– ANAIS –

5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VOLUME 2: ARTIGOS COMPLETOS



– EDIÇÃO LUSO-BRASILEIRA –

2026

Comissão Organizadora NACIONAL
Dr. Cristiano Poleto – IPH/UFRGS (**Presidente**)
Dr. Francisco Lledo dos Santos – UNEMAT
Dr. André Luis Sotero Salustiano Martim – UNICAMP
Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves – UFTM
Dr. Mário Sérgio da Luz – UFTM

Comissão Organizadora LOCAL
Dra. Cristiane Kreutz – UTFPR (**Presidente**)
Dra. Maristela Denise Moresco Mezzomo – UTFPR

Comissão Organizadora INTERNACIONAL
Dr. Jorge M. G. P. Isidoro – Univ. Algarve, Portugal (**Presidente**)
Dr. João L. M. Pedroso de Lima – Univ. Coimbra, Portugal
Dr. Manuel J. S. Feliciano – Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
Dr. Vítor Jorge Pais Vilar – Universidade do Porto, Portugal

Comissão Organizadora de SESSÕES, PRÉ-EVENTOS e EVENTOS CONCOMITANTES
Dr. Tiago de Vargas – IPH/UFRGS
Dra. Maria Cristina de Almeida Silva – IPH/UFRGS
Dra. Franciéle Schwanck Carlos – IPH/UFRGS
Dra. Tássia dos Anjos Tenorio De Melo – UFPE
Dra. Zildamara dos Reis Holsback – UEMS
Dr. Hugo Morais de Alcântara – UFCG
Dr. Ibraim Fantin da Cruz – UFMT
Dra. Patrícia Diniz Martins – UFTM
Dr. Rodrigo Bruno Zanin – UNEMAT
Dr. Fábio Martins Ayres – UEMS

ANAIS DO 5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VOLUME 2 – ARTIGOS COMPLETOS

2026

Copyright © **2026,** *by* **IAHR Publishing.**
Direitos Reservados en 2026 por **IAHR Publishing**.
Organização Geral da obra: Poleto, Cristiano; Kreutz, Cristiane; Mezzomo, Maristela Denise Moresco; dos Santos, Francisco Lledo; Martim, André Luis Sotero Salustiano; Gonçalves, Julio Cesar de Souza Inácio; da Luz, Mário Sérgio; Isidoro, Jorge M. G. P.
Diagramação: Cícero Manz Fagotti
Edição: Cristiano Poleto
Revisão: Elissandro Voigt Beier
Capa: Cícero Manz Fagotti

Copyright © *2026, by* **IAHR Publishing.**
Derechos Reservados en 2026 por **IAHR Publishing**.
Organización General de la Obra:
Maquetación: Cícero Manz Fagotti
Edición: Cristiano Poleto
Relectura General: Elissandro Voigt Beier
Portada: Cícero Manz Fagotti

Anais do 5º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental - Volume 2 / Organizadores: Poleto, Cristiano; Kreutz, Cristiane; Mezzomo, Maristela Denise Moresco; dos Santos, Francisco Lledo; Martim, André Luis Sotero Salustiano; Gonçalves, Julio Cesar de Souza Inácio; da Luz, Mário Sérgio; Isidoro, Jorge M. G. P. – IAHR Publishing, 2026.

889p.: il.;
ISBN • 97890837148-13

CDD: 600

É AUTORIZADA a livre reprodução, total ou parcial, por qualquer meio, sem autorização escrita do Editor ou dos Organizadores.

ES AUTORIZADA la libre reproducción, total o parcial, por cualquier medio, sin autorización escrita del Editor o de los Organizadores.

Comissão Organizadora NACIONAL

Dr. Cristiano Poleto (Presidente)
IPH/UFRGS

Dr. Francisco Lledo dos Santos
UNEMAT

Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves
UFTM

Dr. André Luis Sotero Salustiano Martim
UNICAMP

Dr. Mário Sérgio da Luz
UFTM

Comissão Organizadora LOCAL

Dra. Cristiane Kreutz (Presidente)
UTFPR

Dra. Maristela Denise Moresco Mezzomo
UTFPR

Comissão Organizadora INTERNACIONAL

Dr. Jorge M. G. P. Isidoro (Presidente)
Universidade do Algarve, Portugal

Dr. João L. M. Pedroso de Lima
Universidade de Coimbra, Portugal

Dr. Manuel J. S. Feliciano
Instituto Politécnico de Bragança, Portugal

Dr. Vítor Jorge Pais Vilar
Universidade do Porto, Portugal

Comissão Científica

ALINE FERRÃO CUSTODIO PASSINI - UFSM

ÁLVARO JOSÉ BACK - EPAGRI/SC

ALEJANDRO GUERRA - UNICURITIBA

ANDREA SARTORI JABUR - UTFPR

AMANDA GONÇALVES KIELING - UNISINOS

AMINTAS NAZARETH ROSSETE - UNEMAT

ANDRÉ LUIS SOTERO SALUSTIANO MARTIM - UNICAMP

ANDREZZA MARQUES FERREIRA - CEMADEN

ADRIANO FRUTOSO DA SILVA - UFRR

ARTUR JORGE DE JESUS GONÇALVES - INST. POL. DE BRAGANÇA, PORTUGAL

BRENNO SANTOS LEITE - UFV

CARLA ELOÍSA DINIZ DOS SANTOS - UFTM

CARLOS ALBERTO MENDES MORAES - UNISINOS

CAROLINA BUSO DORNFELD - UNESP

CELSO MACIEL DA COSTA - UERGS

CÍNTIA SOARES - UFSC

CLAUDIA TELLES BENATTI - UEM

CRISTIANE KREUTZ - UTFPR

CRISTHIANE MICHIKO PASSOS OKAWA - UEM

CRISTIANO POLETO - IPH/UFRGS

CRISTOVÃO V. S. FERNANDES - UFPR

DIEGO ANDRADE LEMOS - UFSCAR

DINÉIA TESSARO - UTFPR

DIOGO COSTA BUARQUE - UFES

EDUARDO ANTONIO MAIA LINS - IFPE

ELIZABETE YUKIKO NAKANISHI BAVASTRI - UFPR

EMERSON MACHADO DE CARVALHO - UFSB

EMÍLIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI - UFPR

FABIANO QUADROS RÜCKERT - UFMS

FÁBIO MARTINS AYRES - UEMS

FÁTIMA APARECIDA DA SILVA IOCCA - UNEMAT

FERNANDA BAY HURTADO - UNIR

FERNANDA MIRANDA ZOPPAS - UNL, ARGENTINA

FERNANDO NEVES LIMA - UNIFEI

FERNANDO HERMES PASSIG - UTFPR

FERNANDO PERIOTTO - UFSCAR

FLAVIA SCHWARZ FRANCESCHINI ZINANI - IPH/UFRGS

FLÁVIO TELES CARVALHO DA SILVA - FAPEMAT

FLAVIO BENTES FREIRE - UTFPR

FRANCIÉLE SCHWANCK CARLOS - IPH/UFRGS

FRANCISCO JOSÉ DE PAULA FILHO - UFCA

FRANCISCO LLEDO DOS SANTOS - UNEMAT

FRANCISCO DE ASSIS DOURADO DA SILVA - UERJ

GERALDO DE FREITAS MACIEL - UNESP

GRAZIELE RUAS LAGOAS DA SILVA - UNESP

HUGO MORAIS DE ALCÂNTARA - UFCG

HYGOR ARISTIDES VICTOR ROSSONI - UFV

IBRAIM FANTIN DA CRUZ - UFMT

INDIANARA FERNANDA BARCAROLI - UDESC

JANAINA LOPES LEITINHO - UFC

JOEL DIAS DA SILVA - FURB

JOÃO PEDROSO DE LIMA - UNIVERSIDADE DE COIMBRA / PORTUGAL

JOICE KURITZA DENCK GONÇALVES - UFPR

JORGE MANUEL GUIEIRO PEREIRA ISIDORO - UNIV. DO ALGARVE / PORTUGAL

JORGE LUIS DE OLIVEIRA PINTO FILHO - UFERSA

JOSÉ AUGUSTO COSTA GONÇALVES - UNIFEI

JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO - UFC

JOSÉ GILBERTO DALFRÉ FILHO - UNICAMP

JOSIANE TERESINHA CARDOSO - UDESC

JULIO CESAR DE SOUZA INÁCIO GONÇALVES - UFTM

KARINA BRUNO LIMA - UFRGS

KÁTIA VALÉRIA MARQUES CARDOSO PRATES - UTFPR

LAURA MARIA CANNO FERREIRA FAIS - UNICAMP

LILIANE LAZZARI ALBERTIN - UNESP

LUCIANA TURATTI - UNIVATES

LUCIJANE MONTEIRO DE ABREU - UNB

LUCIO DE SOUZA - UERJ

LUISA GARDÊNIA A. T. FARIAS - UFC

LUIS EDUARDO A. S. SUZUKI - UFPEL

MANUEL FELICIANO - INST. POL. DE BRAGANÇA, PORTUGAL

MARCELO GIOVANELA - UCS

MARCELO BORTOLI - UTFPR

MARIA CRISTINA DE ALMEIDA SILVA - UFRGS

MARIA CRISTINA DE OLIVEIRA - UNB

MARIA CRISTINA BORBA BRAGA - UFPR

MARIA CRISTINA BUENO COELHO - UFT

MARIA DE LOS ANGELES PEREZ LIZAMA - UNICESUMAR

MARLENE GUEVARA DOS SANTOS - UERGS

MÁRIO SÉRGIO DA LUZ - UFTM

MARISTELA DENISE MORESCO MEZZOMO - UTFPR

MAURICIO VICENTE ALVES - UNOESC

MAURÍCIO DE ANDRADES PAIXÃO - IPH/UFRGS

MICHAEL MANNICH - UFPR

MIGUEL MANSUR AISSE - UFPR

MORGANA SILVA - UFPEL

NARA LUÍSA REIS DE ANDRADE - UNIR

NATAN PADOIN - UFSC

PATRÍCIA DINIZ MARTINS - UFTM

PEDRO ALVES DA SILVA FILHO - UFRR

PEDRO ANTONIO ROEHE REGINATO - UFRGS

RAPHAEL CORRÊA MEDEIROS - UTFPR

REGINA TIEMY KISHI - UFPR

RENATO MIRANDA - USP

RICARDO HENRIQUE MORETON GODOI - UFPR

RICARDO JUNIOR DE ASSIS FERNANDES GONÇALVES - UEG

RODRIGO BRUNO ZANIN - UNEMAT

ROSANE FREIRE BOINA - UNESP

RONALTON EVANDRO MACHADO - UNICAMP

SIBELE AUGUSTA FERREIRA LEITE - UFV

SIDNEI LUÍS BOHN GASS - UNIPAMPA

SIMONE ANDREA FUREGATTI - UNESP

STENIO DE SOUSA VENANCIO - UFTM

TASSIA DOS ANJOS TENORIO DE MELO - UFPE

THIAGO MORAIS DE CASTRO - UTFPR

TIAGO DE VARGAS - UFRGS

VERALDO LIESENBERG - UDESC

ZILDAMARA DOS REIS HOLSBACK - UEMS



ORGANIZAÇÃO

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

UFTM
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

UNEMAT
Universidade do Estado de Mato Grosso

1 2 9 0
UNIVERSIDADE D COIMBRA

UNICAMP

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

UFCG
Universidade Federal de Campina Grande

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

UAlg
UNIVERSIDADE DO ALGARVE

ipb
INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA

UEMS
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

U.PORTO

PATROCÍNIO

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CAPES

Laboprime

SpInLab
Spatial Information Laboratory

envex
engenharia e consultoria

TEKS
Produtos e Sistemas
Remediação Ambiental

AgSolve

ARAUCÁRIA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA O PARANÁ

FUNTEF-PR

APOIO

FABHAT
FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ

ALTO TIETÊ

REVISTA ENSAIOS DE GEOGRAFIA
PosGeo
Universidade Federal Fluminense

IAHR
AIRH
International Association for Hydro-Environment Engineering and Research
Hosted by
Spain Water and IWHR, China

ProfÁgua

SUMÁRIO

1. AGRICULTURA REGENERATIVA

INTERFACES ENTRE AGROECOLOGIA, CAMPESINATO E TECNOLOGIAS APLICADAS AO DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL NOS AGRESTES DE PERNAMBUCO 16

MICROALGAS DERIVADAS DO TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUAIS E *Bacillus aryabhattai* COMO BIOINSUMOS COMPLEMENTARES PARA A PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE AMARANTO 24

POTENCIAL ANTAGÔNICO COMPARATIVO DE *Aspergillus niger* E *Bacillus subtilis* NO BIOCONTROLE DE *Fusarium sp.* IN VITRO 32

DA SUSTENTABILIDADE À REGENERAÇÃO: CRITÉRIOS E PARÂMETROS PARA A CACAUICULTURA REGENERATIVA NA AMAZÔNIA 38

ESTUDOS CIENTÍFICOS DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA 45

2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

DETERMINAÇÃO E SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE NA BACIA DO RIO UBERABINHA 51

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA OBTIDA EM POÇOS TUBULARES LOCALIZADO NA ZONA RURAL DO MUNICÍPIO DE QUEIMADAS-PB 58

ESTUDO DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA CIDADE DE LAGOA SECA-PB: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E SEUS IMPACTOS NA SAÚDE PÚBLICA 64

PROPOSED ALTERNATIVE METHOD FOR REMOVING IRON FROM GROUNDWATER 70

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL DOS AQUÍFEROS EM MARABÁ (PA) UTILIZANDO O MÉTODO GOD 78

PANORAMA DA CONTAMINAÇÃO POR NITRATO EM AQUÍFEROS NO BRASIL: EVIDÊNCIAS DE UMA REVISÃO SISTEMÁTICA 85

ANÁLISE DAS ESTRUTURAS QUE CONDICIONAM A INTERFERÊNCIA ENTRE POÇOS DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG). 94

QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM POÇOS TUBULARES E SUA RELAÇÃO COM ÁGUAS SUPERFICIAIS EM ÁREA DE AGRICULTURA FAMILIAR NA BAIXADA CUIABANA (MT) 102

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUSTENTABILIDADE HÍDRICA NO SEMIÁRIDO NORDESTINO: UMA ANÁLISE DA GESTÃO ATUAL 107

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM POÇOS URBANOS 115

SOLAR PHOTODECOMPOSITION FOR REMOVING BTEX (BENZENE, TOLUENE, ETILBENZENO E XILENO) COMPOUNDS FROM GROUNDWATER CONTAMINATED BY GASOLINE STATION ACTIVITIES 121

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM POÇOS TUBULARES: INFLUÊNCIA DAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS EM GRÃO-PARÁ/SC 128

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO AQUÍFERO FRATURADO SERRA GERAL ATRAVÉS DE ÍNDICES DE SÉRIES TEMPORAIS: UM ESTUDO COMPARATIVO DE TIPOLOGIAS DE RESPOSTA 135

ANÁLISE ESPACIAL DE VARIÁVEIS CONDICIONANTES À RECARGA AQUÍFERA NO DISTRITO FEDERAL COMO BASE PARA MODELAGEM MULTICRITÉRIO AHP 142

CONSERVAÇÃO DE NASCENTES NO SEMIÁRIDO CEARENSE: DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA NASCENTE DO RIO JAGUARAPI E PROPOSTA DE REVITALIZAÇÃO 152

3. Cultura, Arte e Comunicação Ambiental

UMA PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DA ANTIGA CAPTAÇÃO CURRAIS E PEDRAS 159

MAQUETE COMO MEIO DE COMUNICAÇÃO PARA APRESENTAÇÃO DE PROJETOS DE ENGENHARIA JUNTO A COMUNIDADE DA LAGOA DO JACARÉ 165

A SEMIÓTICA COMO FERRAMENTA NA ENGENHARIA AMBIENTAL: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E IMPACTO SOCIOPOLÍTICO DE "PRIMAVERA SILENCIOSA" 172

ESTRATÉGIAS DE DIVULGAÇÃO E COMUNICAÇÃO CIENTÍFICA SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA EM AMBIENTES URBANOS: ANÁLISE DE PLATAFORMAS DE MÍDIAS DIGITAIS 178

A ARTE COMO ARQUIVAMENTO SENSÍVEL DAS RELAÇÕES: BLOCOS DE SENSAÇÕES E MODELAGEM 3D 185

O FIM NÃO É O FIM: PRA ONDE VAI O SEU RESÍDUO? - DOCUMENTÁRIO SOBRE A GRSU NO MUNICÍPIO DE CAMPINA DO MONTE ALEGRE - SP. 192

4. Desastres Naturais

DESASTRE NATURAL E A POSSÍVEL DESERTIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE ITAPAJÉ 197

RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM DESASTRES HIDROLÓGICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA 203

CLASSIFICAÇÃO DE TORNADOS NO PARANÁ: ANÁLISE CRÍTICA DA APLICAÇÃO DA ESCALA FUJITA MELHORADA NO CONTEXTO CONSTRUTIVO BRASILEIRO 210

INUNDAÇÕES URBANAS EM ÁGUAS DE SANTA BÁRBARA: CONDICIONANTES E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO 217

ANÁLISE DE DESASTRE NATURAL A PARTIR DE PUBLICAÇÕES NA MÍDIA: O CASO DO CIM-COIMBRA, 2026, PORTUGAL 224

DA FRAGMENTAÇÃO À INTEGRAÇÃO: GESTÃO DE RISCOS GEOTÉCNICOS E PLANEJAMENTO URBANO EM MEDELLÍN E ITABIRITO (MG) 230

AHP-TOPSIS NO MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE TRAVESSIA DE CURSOS D'ÁGUA DANIFICADAS EM NOVA PALMA (RS) 238

METODOLOGIA DO VALOR INFORMATIVO (VI) PARA DETERMINAÇÃO DE CARTA DE SUSCETIBILIDADE A DESASTRES HIDROLÓGICOS 246

OCUPAÇÃO DE ENCOSTAS NA SERRA DO MAR: AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA E IMPLICAÇÕES AO PLANEJAMENTO TERRITORIAl 254

ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CHEIAS CALIBRADOS A PARTIR DE DIFERENTES ABORDAGENS: O CASO DO RIO HERCÍLIO EM IBIRAMA/SC 262

5. Descarbonização

ALÉM DA EFICIÊNCIA: O PAPEL DA INDÚSTRIA 4.0 COMO CATALISADORA DA DESCARBONIZAÇÃO GLOBAL 269

A IMPORTÂNCIA DA QUANTIFICAÇÃO DOS GASES DE EFEITO NAS UNIVERSIDADES DE ENSINO SUPERIOR 277

INFLUENCE OF SOLAR RADIATION ON THE CO2 DYNAMICS IN A CHAMBER WITH *Spathiphyllum wallisii* 284

EXPERIÊNCIAS COM A DESCARBONIZAÇÃO DE OPERAÇÕES PORTUÁRIAS NO BRASIL 292

DESIGUALDADES ECONÔMICAS NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS NO PARANÁ.....298

SUBSTRATO GEOPOLIMÉRICO COM PROPÓSITO DE CAPTURA DE CO_2.....304

DESCARBONIZAÇÃO DAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR DA PERSPECTIVA DAS UNIDADES ADMINISTRATIVAS.....311

POTENCIAL DE MEDIDAS RELACIONADAS ÀS FLORESTAS COMERCIAIS E NATIVAS NA MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO PARANÁ: 2025 - 2050.....317

CONTRIBUIÇÃO DO USO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO.....325

ANÁLISE DAS BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO DE MEDIDAS DE DESCARBONIZAÇÃO NO SETOR AGROPECUÁRIO DO PARANÁ.....333

PLATAFORMA DIGITAL PARA INVENTÁRIO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO PODER JUDICIÁRIO: INTEGRAÇÃO MULTIDISCIPLINAR E CONFORMIDADE COM *GHG PROTOCOL* 339

AVALIAÇAO DAS EQUAÇÕES DE VAN DER WAALS E CLAPEYRON EM COMPOSTOS DE CARBONO 347

O POTENCIAL DAS AGROFLORESTAS NA PRESERVAÇÃO DO CERRADO FRENTE AO MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO COMO INSTRUMENTO DE SUSTENTABILIDADE..... 353

IMPOSTOS DE CARBONO NA CONSTRUÇAO CIVIL; TRANSIÇÃO VERDE OPORTUNIZADA PELAS TAXAS DE CO2 360

6. Economia Circular e Bioeconomia

BONSAIS QUE SALVAM VIDAS: EMPREENDEDORISMO SOCIOAMBIENTAL NO TERCEIRO SETOR.....367

POLÍTICAS PÚBLICAS E ECONOMIA CIRCULAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO PROJETO BAMB NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO.....373

THE LIFE CYCLE OF ELECTRONIC EQUIPMENT: BETWEEN SOCIAL RISKS AND SUSTAINABLE OPPORTUNITIES 380

VIABILIDADE ECONÔMICA DO *UPGRADING* DE BIOGÁS DE ATERRO PARA PRODUÇÃO DE BIOMETANO: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA GLOBAL.....387

METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO PARA A VALORIZAÇÃO DE LODOS INDUSTRIAIS DENTRO DE UMA ECONOMIA CIRCULAR 394

AVALIAÇÃO SOCIOAMBIENTAL DE UMA EMPRESA DE RECICLAGEM COM INCLUSÃO DE MÃO DE OBRA PRISIONAL: UM ESTUDO DE CASO.....401

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS NA SÍNTESE DE MATERIAIS ADSORVENTES PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO.....407

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE VIDRO MOÍDO NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.....414

MALVA FIBER BIOMATS (*Urena lobata* L.) AS AN ALTERNATIVE TO PLASTIC MULCH: TECHNOLOGICAL INNOVATION AND BIOECONOMIC POTENTIAL IN THE AMAZON 422

APPLICATION OF CIRCULAR ECONOMY IN URBAN SOLID WASTE MANAGEMENT: STRATEGIES, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES FOR SUSTAINABLE CITIES.....427

TOWARD SOCIO-ENVIRONMENTAL SHARED VALUE NETWORKS: AN INTEGRATED MODEL OF GOVERNANCE, VALUE CO-CREATION, AND TERRITORIAL DYNAMICS.....434

MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DO GEL C-S-H EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UMA REVISÃOSOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR....442

UTILIZAÇÃO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO ADSORVENTE PARA REMOÇÃO DE CORANTE INDUSTRIAL EM MEIO AQUOSO: ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO, OTIMIZAÇÃO, CINÉTICA, ISOTERMAS E TERMODINÂMICA....448

ECONOMIA CIRCULAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL: INCORPORAÇÃO DE LODO CARBONATADO COMO MATERIAL SUPLEMENTAR NA PRODUÇÃO E DESEMPENHO DE ARGAMASSAS 457

ECOLOGIA INDUSTRIAL NO SEMIÁRIDO: POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA URINA HUMANA COM USO DE CINZAS DE BIOMASSA NA AGRICULTURA FAMILIAR....465

USO DE LODO DE ESGOTO COMO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E COMPARATIVA....472

MATERIAIS ALTERNATIVOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE SISTEMÁTICA SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR E DO DESEMPENHO TECNOLÓGICO....479

TRANSIÇÃO CIRCULAR NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA 487

PLACAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO DE CONCRETO EMBORRACHADO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E CONTRIBUIÇÃO À ECONOMIA CIRCULAR....496

OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE BIOPROCESSOS: MELAÇO DE SOJA COMO SUBSTRATO PARA A PRODUÇÃO DE PROTEÍNA RECOMBINANTE (sfGFP) 502

ECONOMIA CIRCULAR NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: USO DA BORRACHA DE PNEU COMO MODIFICADOR DO LIGANTE ASFÁLTICO....508

ANÁLISE TÉCNICA E AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA....514

ECONOMIA CIRCULAR NA PAVIMENTAÇÃO: APLICAÇÃO DE MISTURAS SOLO-RAP EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS 520

TRADE-OFFS NA SELEÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS: EVIDÊNCIAS DE UM ESTUDO MULTICASOS EM CONTEXTO ORGANIZACIONAL 526

ECONOMIA CIRCULAR NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: VIABILIDADE DO EMPREGO DE BORRACHA DE PNEUS TRATADA....533

7. EDUCAÇÃO AMBIENTAL

IMPLANTAÇÃO DE UM VIVEIRO FLORESTAL EXPERIMENTAL E ANÁLISE DA ESPÉCIE AZEITONA ROXA (*Syzygium cumini*) NA CIDADE DE MANAUS/AM 540

INTERESSE PELOS TEMAS DAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS NO ENSINO FUNDAMENTAL II 548

ESTUDO PRELIMINAR SOBRE A ATUAÇÃO DE BITUCAS DE CIGARRO NO DESENVOLVIMENTO DE LARVAS DE *Artemia salina* 556

DESMITIFICANDO O ODOR NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM: SENSIBILIZAÇÃO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS....561

CONTRAMÃO DA EDUCAÇÃO: A FUNBOSQUE DO RECONHECIMENTO COMO REFERÊNCIA NA EDUCAÇÃO AMBIENTAL E PATRIMONIAL NA AMÉRICA LATINA E O RISCO DA EXTINÇÃO 566

EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM RESÍDUOS SÓLIDOS E FORMAÇÃO SUSTENTÁVEL NO AMBIENTE ESCOLAR....573

GAMIFICAÇÃO APLICADA AO TEMA RESÍDUOS SÓLIDOS EM AMBIENTE ESCOLAR 580

EDUCAÇÃO AMBIENTAL COMO FERRAMENTA DE TRANSFORMAÇÃO: PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS EM ESCOLAS DO ENSINO INFANTIL E FUNDAMENTAL....587

PLANTAS MEDICINAIS COMO FERRAMENTA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL: SABERES TRADICIONAIS E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE NO CONTEXTO AMAZÔNICO 595

REVISÃO CRÍTICA DAS PERSPECTIVAS CONTEMPORÂNEAS E DOS DESAFIOS ESTRUTURAIS DA EDUCAÇÃO AMBIENTAL NO BRASIL 602

A EDUCAÇÃO AMBIENTAL NO MUNICÍPIO DE PEDREGULHO/SP: ANÁLISE DOCUMENTAL DA LEGISLAÇÃO, PROGRAMAS E INSTRUMENTOS DE GESTÃO PÚBLICA 607

INTEGRAÇÃO ENTRE CIÊNCIA CIDADÃ E PLUVIôMETROS ANALÓGICOS COMO SUBSÍDIO À MEDIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO.....611

FOMENTANDO A CIÊNCIA CIDADÃ NA EDUCAÇÃO BÁSICA COM PLUVIÔMETROS ARTESANAIS.....618

ENTRE A SAÚDE E O MEIO AMBIENTE: DESCARTE CORRETO DE MEDICAMENTOS VENCIDOS E EDUCAÇÃO AMBIENTAL COMO FERRAMENTAS DE TRANSFORMAÇÃO SOCIAL.....624

INVESTIGAÇÃO DA RESERVA PATRIMONIAL DO PATRIMÔNIO NATURAL DA UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL (UNISC) POR MEIO DE TÉCNICAS GEOESPACIAIS E IMPRESSÃO 3D VISANDO A EDUCAÇÃO AMBIENTAL E A REPRESENTAÇÃO DAS ÁREAS DE RISCOS.....631

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA G5 AMBIENTAL PARA A PRESERVAÇÃO DO BIOMA CAATINGA: UM RELATO DE EXTENSÃO EM ESCOLAS MUNICIPAIS DE CARUARU - PE.....639

ENSINAR O CERRADO A QUEM PROJETA NO CERRADO: UMA EXPERIÊNCIA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL NO ENSINO DE ARQUITETURA E URBANISMO.....644

EDUCAÇÃO AMBIENTAL CONTEXTUALIZADA: COMO COMPREENDER O COTIDIANO VISANDO ESTIMULAR O PROTAGONISMO ESTUDANTIL? 650

EDUCAÇÃO AMBIENTAL E SANEAMENTO ECOLÓGICO: DESENVOLVIMENTO DO JOGO DIDÁTICO CONSTRUA SEU TEVAP PARA O ENSINO FUNDAMENTAL II 657

O USO DO FOLCLORE NA EDUCAÇÃO AMBIENTAL: UMA EXPERIÊNCIA COM O SACI-PERERÊ NO ESCOTISMO.....665

EDUCAÇÃO AMBIENTAL E TERRITORIALIZAÇÃO: ANÁLISE DA EFETIVIDADE DO PROGRAMA CONECTANDO SABERES NA REDE PÚBLICA DE ENSINO DE MARAGOGI - AL.....672

ALGAS DE ÁGUA DOCE: UM MUNDO MICROSCÓPICO DO PANTANAL DE POCONÉ - PORTO CERCADO E SUA IMPORTÂNCIA PARA A EDUCAÇÃO AMBIENTAL 680

EDUCAÇÃO AMBIENTAL: CONTRIBUIÇÃO PARA RESILIÊNCIA CLIMÁTICA URBANA.....687

REAPROVEITAMENTO DE MATERIAL FRESADO ASFÁLTICO (RAP) EM MISTURAS COM SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO SUSTENTÁVEL.....694

ESTUDO TÉCNICO-AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DE RAP EM SOLOS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO.....701

EDUCAÇÃO CLIMÁTICA E RECURSOS HÍDRICOS: A PROPOSTA DA OFICINA “DO CICLO DA ÁGUA À AÇÃO - ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS PARA O DIA A DIA”.....707

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS A PARTIR DO USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UM ESTUDO LUZ DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL.....714

ESTRATÉGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA POLÍTICA ESTADUAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM MATO GROSSO: O PROJETO "FOLHAS QUE FLORESCEM" 720

EDUCAÇÃO AMBIENTAL NA PRIMEIRA INFÂNCIA: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA G5 AMBIENTAL E GEORREFERENCIAMENTO NO ESTUDO DE CASO DE UMA ESCOLA PÚBLICA EM CARUARU - PE.....724

8. Energias Renováveis

SOCIAL ACCEPTANCE OF WIND ENERGY IN BRAZIL: ONSHORE AND OFFSHORE PERSPECTIVES 733

REPOWERING OF ONSHORE WIND FARMS AS AN ALTERNATIVE TO DECOMMISSIONING: EVIDENCE FROM A PRISMA SYSTEMATIC REVIEW 741

ANÁLISE DO TEOR DE UMIDADE EM ÓLEO RESIDUAL TRATADO COM RESÍDUOS DE ARGAMASSA 749

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BIODEGRADABILIDADE DE RESÍDUOS DE SOJA OZONIZADOS EM ph NEUTRO PARA APLICAÇÃO EM BIOGÁS 757

ESTRATÉGIAS EMERGENTES DE PRÉ-TRATAMENTO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA PARA BIOCOMBUSTÍVEIS 763

SOLUÇÃO ECOLÓGICA PARA DANOS POR CUPINS EM USINAS FOTOVOLTAICAS 771

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA COM PRÉ-TRATAMENTOS BIOLÓGICOS: TENDÊNCIAS OBSERVADAS NOS ÚLTIMOS 20 ANOS 777

POTENCIAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO DE RESÍDUOS DA BOVINOCULTURA LEITEIRA 785

POTENCIAL DE CO-LOCALIZAÇÃO ENTRE AQUICULTURA MARINHA E ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO LITORAL DO RIO DE JANEIRO: UMA ANÁLISE BASEADA EM EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS 791

PLANEJAMENTO ESPACIAL MARINHO DA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL COM ENFOQUE EM POTENCIAIS ÁREAS PARA A INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE 798

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E TÉRMICA DA BIOMASSA DE PIAÇAVA (Attalea funifera): POTENCIAL PARA APLICAÇÕES ENERGÉTICAS E SUSTENTÁVEIS 806

ROTAS TECNOLÓGICAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO: UMA REVISÃO DA APLICAÇÃO DE MÉTODOS QUANTITATIVOS NA BIOECONOMIA CIRCULAR 813

PERSPECTIVAS DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE FRUTAS E VEGETAIS: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO 820

INFLUENCE OF FEEDSTOCK THERMAL DEGRADATION ON THE PERFORMANCE OF DIESEL-BIODIESEL BLENDS 825

INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS NO PROCESSAMENTO DE AÇAÍ: ENERGIA FOTOVOLTAICA E CAPTAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL 831

VIABILIDADE DE ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO: UMA ANÁLISE ENTRE SMR, ELETRÓLISE E FOTOCATÁLISE 837

CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DO VENTO E SEU POTENCIAL EÓLICO EM ITAJAÍ/SC UTILIZANDO A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL 844

9. ESG e Compliance Ambiental

ECONOMIA CIRCULAR NAS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS: EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS DAS PRÁTICAS AMBIENTAIS 851

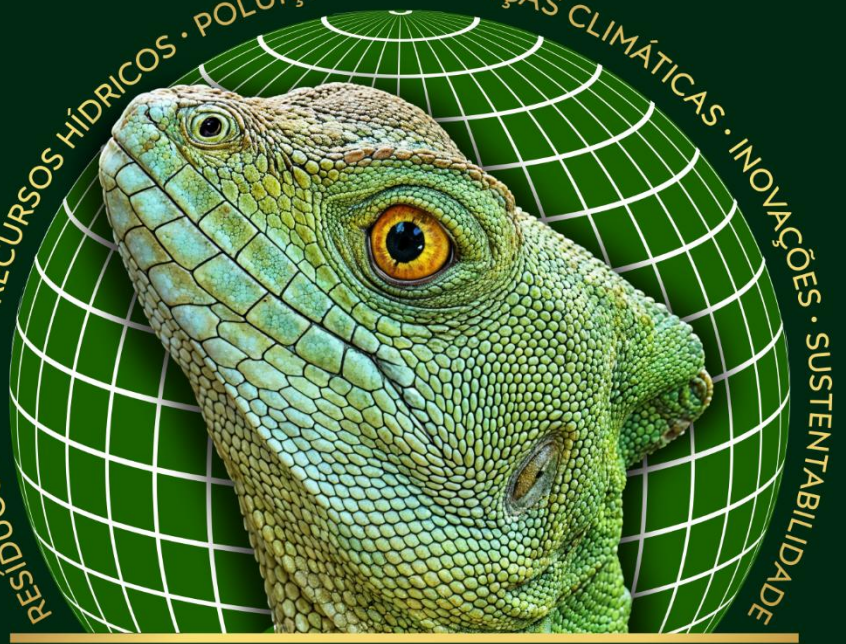
O PROGRAMA PRODUTOR DE ÁGUA DO RIO VERMELHO –PAGAMENTO POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM SÃO BENTO DO SUL - SC 858

ESTUDO DA FROTA DE ÔNIBUS E EMISSÕES DE POLUENTES À LUZ DA FERRAMENTA ENVIRONMENTAL, SOCIAL, AND GOVERNANCE (ESG) 867

PERSPECTIVA DA SUSTENTABILIDADE NO PROCESSAMENTO DE CHAPAS METÁLICAS: UM ESTUDO DE CASO 874

PRÁTICAS ESG EM UMA PEQUENA EMPRESA COUREIRO-CALÇADISTA: EVIDÊNCIAS, LACUNAS E DESAFIOS 882

ARTIGOS COMPLETOS



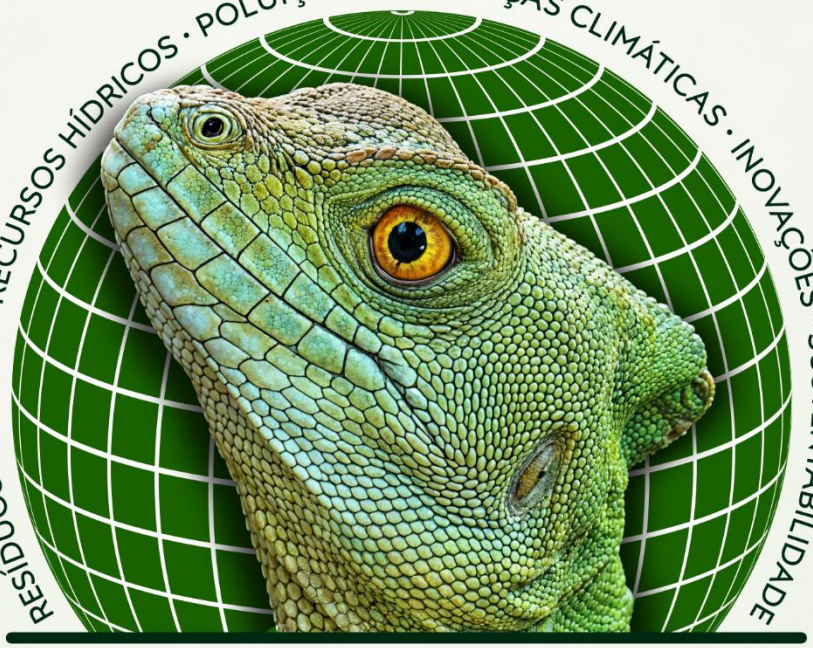
5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

– EDIÇÃO LUSO-BRASILEIRA –

2026

ÁREA TEMÁTICA 1

AGRICULTURA REGENERATIVA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

INTERFACES ENTRE AGROECOLOGIA, CAMPESINATO E TECNOLOGIAS APLICADAS AO DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL NOS AGRESTES DE PERNAMBUCO

1 Jailson de Arruda Almeida, 2 Maria Rita Ivo de Melo Machado
1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: jailson.arruda@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: mariarita.machado@ufrpe.br

Palavras-chave: Agricultura familiar; territorialidade; tecnologias sociais.

Resumo

O artigo faz uma análise das relações entre Agroecologia, campesinato e o uso de tecnologias no desenvolvimento territorial dos Agrestes de Pernambuco. A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, orientada pela metodologia de imersão territorial, desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Territorial (PPGADT/UFRPE). Como etapa inicial, foram realizadas atividades preparatórias, incluindo análise documental e encontros virtuais com organizações locais, que subsidiaram o delineamento das atividades de campo. Na sequência, foram realizadas vivências em experiências agroecológicas nos municípios de Bonito, Caruaru, Garanhuns e Pesqueira. A produção dos dados ocorreu por meio de observação participante, rodas de conversa e registros em caderno de campo, posteriormente sistematizados e analisados com base em categorias temáticas. Os resultados indicam que a Agroecologia vem se consolidando como estratégia fundamental para o fortalecimento do campesinato, ao promover sistemas produtivos sustentáveis, ampliar a autonomia dos sujeitos e valorizar saberes tradicionais. Além disso, as experiências analisadas evidenciam o papel das tecnologias sociais e das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) na dinamização dos territórios, ainda que sua incorporação ocorra de forma gradual e desigual. Conclui-se que a articulação entre Agroecologia, campesinato e tecnologias é decisiva para a construção de formas de desenvolvimento territorial mais justas, sustentáveis e sensíveis às realidades locais, contribuindo para o fortalecimento do protagonismo dos sujeitos do campo nos Agrestes pernambucanos.

Introdução

Nas últimas décadas, a Agroecologia vem se consolidando como base científica para um novo paradigma de desenvolvimento rural. Diante da atual crise socioambiental, tal enfoque apresenta-se como alternativa viável e necessária, ao constituir uma resposta crítica à agricultura convencional e articular diferentes formas de conhecimento na promoção de sistemas agrícolas sustentáveis, resilientes e adaptados às realidades locais (CAPORAL; COSTABEBER; PAULUS, 2009).

Fundamentada em saberes tradicionais e em abordagens interdisciplinares, a Agroecologia incorpora dimensões sociais, políticas e culturais, como justiça social, soberania alimentar e empoderamento comunitário. Sob essa perspectiva, destaca-se como estratégia relevante para mitigar os impactos das mudanças climáticas, promover a equidade social e fortalecer cadeias produtivas locais (HECHT, 1993; MOLINA, 2011; BORSATTO; DO CARMO, 2012). Além disso, dialoga com a necessidade de reconstrução de modelos de desenvolvimento rural que superem a lógica do progresso linear (ALMEIDA, 1997), ampliando o debate para além da dimensão produtiva.

Mais do que uma abordagem técnico-produtiva, a Agroecologia pode ser compreendida como ciência, movimento político e prática social (ABA, 2025), de modo articulado às disputas em torno do território e dos modelos de desenvolvimento. Sob essa ótica, o território não se reduz a uma base físico-geográfica, mas constitui-se como espaço de relações de poder, apropriação e construção social (HAESBAERT, 2006; RAFFESTIN, 2008). Assim, o desenvolvimento deixa de ser entendido como um processo neutro ou universal, passando a ser concebido como construção histórica e territorialmente situada, influenciada por dinâmicas locais, formas de governança e relações de poder (FUINI; PIRES, 2008; SOUZA, 2008), frequentemente tensionadas pela atuação do capital e por processos de concentração e monopolização.

Diante dessas disputas, a Agroecologia afirma-se como proposta contra-hegemônica, ao defender formas de desenvolvimento territorial baseadas na valorização dos saberes locais, na autonomia dos sujeitos e na construção de alternativas ao modelo dominante. Ao adotar o agroecossistema como unidade de análise, reforça sua natureza sistêmica e sua capacidade de integrar dimensões ecológicas, econômicas e sociais (CAPORAL; COSTABEBER, 2004). Contudo, conforme alertam Giraldo e Rosset (2021), o campo agroecológico também é atravessado por tensões, podendo inclusive ser apropriado por lógicas convencionais.

As múltiplas expressões do campesinato materializam, no território, práticas, saberes e modos de vida construídos historicamente pelas comunidades rurais. Essas experiências desempenham papel central na promoção de formas sustentáveis de agricultura, especialmente no que se refere à adaptação às condições ambientais locais e à resistência aos processos de homogeneização produtiva. Embora a agricultura familiar constitua uma categoria ampla, o campesinato se destaca por sua especificidade social, econômica e cultural (GODOY; MENEZES; MARIN, 2009).

Para além de uma categoria produtiva, o campesinato configura uma forma particular de relação com o território, marcada pela centralidade da família, pela autonomia relativa e pela construção de modos de vida orientados pelo valor de uso e pela reprodução social (WANDERLEY, 1996; PLOEG, 2006). Em contraste com o modelo empresarial de agricultura,

orientado pela maximização do lucro e pela mercantilização dos recursos, afirma-se como expressão contemporânea de resistência e de construção de alternativas ao modelo hegemônico de desenvolvimento. No Brasil, essa trajetória foi historicamente moldada pela concentração fundiária, pela herança escravocrata e pela expansão da fronteira agrícola, fazendo da luta pela terra e da busca por condições dignas de reprodução social elementos estruturantes da experiência camponesa (MARTINS, 1981).

No interior dessas dinâmicas territoriais e produtivas, a tecnologia assume papel central. Conforme argumenta Vieira Pinto (2005), sua incorporação no meio rural constitui um processo socialmente construído e orientado por interesses específicos, podendo tanto reforçar relações de dominação quanto contribuir para processos emancipatórios. Em diálogo com essa abordagem, Freire (1983; 2001) destaca a importância de compreender a tecnologia a partir da realidade dos sujeitos e de seus territórios, evitando sua imposição de forma verticalizada.

Nessa direção, destacam-se as Tecnologias Sociais, entendidas como soluções construídas de forma participativa e voltadas à resolução de problemas concretos das populações (RODRIGUES; BARBIERI, 2008; ITS, 2024). Quando articuladas à Agroecologia, tais tecnologias potencializam a autonomia dos sujeitos e contribuem para a construção de sistemas produtivos mais sustentáveis (NEVES; LIMA; GONÇALVES, 2020; SILVEIRA et al., 2013), fortalecendo estratégias de desenvolvimento territorial enraizadas nas realidades locais.

No Agreste pernambucano, essas dinâmicas assumem contornos específicos em função das condições ambientais, sociais e históricas do território. A convivência com a irregularidade climática, associada a limitações estruturais, impõe desafios significativos ao modo de vida camponês, ao mesmo tempo em que estimula práticas criativas, adaptativas e resilientes de produção e organização social.

Face ao exposto, e considerando a natureza interdisciplinar dos processos agroecológicos, a diversidade das expressões do campesinato, as disputas em torno do território e o papel estratégico das tecnologias no fortalecimento do desenvolvimento territorial, este artigo tem como objetivo analisar as interfaces entre Agroecologia, campesinato e tecnologias aplicadas ao desenvolvimento territorial nos Agrestes de Pernambuco.

Material e Métodos

O presente estudo delimitou-se à região do Agreste de Pernambuco, composta por 71 municípios distribuídos em três sub-regiões: Agreste Meridional, Agreste Central e Agreste Setentrional (CONDEPE/FIDEM, 2026). Essa região ocupa uma área de aproximadamente 24.752,17 km² — correspondente a 24,7% da extensão do estado — e abriga uma população de 2.367.487 habitantes, segundo dados do IBGE (2022).

O Agreste Meridional, localizado na porção sudeste do estado, faz fronteira com Alagoas e com as regiões da Mata Sul, Agreste Central e Sertão do Moxotó. Abrange uma área de 10.916 km², com densidade demográfica de 61,53 habitantes por km², distribuídos em 26 municípios. Dentre eles, destaca-se Garanhuns, o mais populoso, com 142.506 habitantes (IBGE, 2022).

A região do Agreste Central, por sua vez, situa-se na parte leste de Pernambuco e limita-se com a Paraíba, além das regiões da Mata Sul, Agreste Setentrional, Agreste Meridional e Sertão do Moxotó. Composta por 27 municípios, possui extensão territorial de 10.299 km² e densidade populacional de 112,07 habitantes por km², totalizando 1.154.300 habitantes. O município de Caruaru é o mais populoso da região (IBGE, 2022).

Já o Agreste Setentrional, situado ao norte do estado, faz fronteira com a Paraíba, a Mata Norte e o Agreste Central. Essa sub-região abrange uma área de 3.540 km² e apresenta a maior densidade demográfica entre as três, com 152,96 habitantes por km², somando uma população de 541.480 habitantes, distribuída em 19 municípios (IBGE, 2022).

Do ponto de vista metodológico, esta pesquisa foi desenvolvida no contexto das atividades formativas do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Territorial (PPGADT), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), durante o semestre 2024.2. O trabalho foi vinculado, especialmente, às disciplinas Agroecologia, Território e Desenvolvimento; História Social do Campesinato no Semiárido; e TIC Aplicada ao Desenvolvimento Territorial.

A principal estratégia metodológica adotada foi a imersão territorial, compreendida como uma abordagem qualitativa que possibilita a vivência direta e aprofundada dos contextos locais. Tal abordagem proporciona uma compreensão mais densa e sensível da realidade, indo além da dimensão teórica ao estimular aprendizagens contextualizadas e críticas (PACÍFICO et al., 2020).

A etapa preparatória da imersão ocorreu nos dias 26, 27 e 28 de setembro de 2024, por meio de encontros virtuais com representantes de diferentes territórios e organizações, realizados via *Google Meet* nas instalações da UFRPE. Participaram representantes dos seguintes grupos e instituições:

- Rede SEMEAM/IPA (Garanhuns/PE);
- Cáritas Diocesana (Pesqueira/PE);
- Associação Vida Agroecológica (Bonito/PE);
- Território Xukuru (Pesqueira/PE);
- Assentamento Normandia (Caruaru/PE);
- Quilombo Castainho (Garanhuns/PE);
- Agroflor (Bom Jardim/PE).

Durante essa fase inicial, os estudantes receberam materiais de apoio (textos e vídeos), a partir dos quais produziram sínteses coletivas fundamentadas no eixo temático: Espaços, sujeitos e práticas biodiversas nos Agrestes Pernambucanos: uma

abordagem agroecológica e territorial. As reflexões se organizaram em torno de sete eixos analíticos: 1) ciência, movimento e prática; 2) mercados, organização coletiva e autonomia; 3) políticas públicas; 4) disputas de espaço e poder; 5) desenvolvimento territorial; 6) tecnologias da informação e comunicação; e 7) gestão local e territorial.

Na etapa seguinte, realizada nos dias 13, 14 e 15 de novembro de 2024, foi conduzida a imersão de campo nos territórios estudados, com visitas a experiências e espaços emblemáticos dos Agrestes Pernambucanos. Os roteiros incluíram:

- Bonito/PE: visita ao Mercado da Vida, espaço de comercialização agroecológica, e a um sítio de agricultores familiares;
- Caruaru/PE: visita ao Assentamento Normandia, referência na reforma agrária e agroecologia;
- Garanhuns/PE: visita ao IPA e à Rede SEMEAM, além do Laboratório Multidisciplinar de Tecnologias Sociais na UFAPE;
- Pesqueira/PE: participação no XII Urubá Terra — Encontro de Agricultura e Partilha das Sementes Tradicionais do Povo Xukuru do Ororubá, realizado na Casa de Sementes Mãe Zenilda.

A abordagem qualitativa empregada neste estudo, comum em pesquisas de natureza antropológica, geográfica e sociológica, utilizou como principais instrumentos de coleta de dados a observação participante, as rodas de conversa informais e os relatos orais. Durante a imersão, foram feitos registros sistemáticos em caderno de campo, com anotações e reflexões sobre as vivências.

A análise dos dados se deu com base em categorias temáticas definidas previamente, em consonância com os conteúdos das disciplinas cursadas, e articuladas com o referencial teórico do estudo. Para fins de análise, foram consideradas apenas as experiências que integraram ambas as etapas da imersão — a preparatória e a de campo —, com foco nos Agrestes Meridional e Central, destacando-se os municípios de Bonito, Caruaru, Garanhuns e Pesqueira.

Resultados e Discussão

No território do Agreste Central de Pernambuco, a primeira experiência vivenciada ocorreu no Mercado da Vida, localizado no município de Bonito. Inaugurado em dezembro de 2016, esse espaço é fruto da mobilização coletiva de famílias agroecológicas da região, em articulação com movimentos populares e com o apoio da UFRPE, do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA) e da gestão municipal. Trata-se de um ambiente voltado à comercialização de produtos agroecológicos, resultado de um trabalho associativo promovido pela Associação Vida Agroecológica de Bonito/PE (Figura 01).



Figura 01: Visita ao Mercado da Vida, em Bonito/PE.
Fonte: Almeida (2024)

Na sequência, foi realizada visita a um sítio conduzido por dois agricultores familiares. Durante a visita, observou-se a adoção de práticas agroecológicas, embora ainda persista certa resistência por parte de outros produtores da região quanto à incorporação de métodos e técnicas dessa natureza. Um dos momentos mais marcantes foi o relato de um agricultor, que justificou sua adesão à Agroecologia ao afirmar: “meu pai foi vítima do uso de agrotóxicos”, revelando o impacto direto que experiências pessoais podem exercer sobre decisões produtivas e formas de resistência.

Apesar de não enfrentarem dificuldades significativas relacionadas ao acesso à água, os agricultores apontaram obstáculos para a consolidação de práticas agroecológicas e associativas, como a distância entre as propriedades, a escassez de tempo e os altos custos com combustível. Um deles destacou a satisfação em produzir seu próprio alimento como motivação para permanecer no campo; no entanto, demonstrou preocupação com a ausência de interesse do filho pela continuidade da atividade agrícola: “o filho não tem vocação para a agricultura, mas para o estudo; ele quer voar, sair daqui”. Esse depoimento revela um tensionamento entre o projeto coletivo familiar — historicamente fundamental para a reprodução social camponesa — e os projetos individuais contemporâneos, configurando um dos elementos da crise do campesinato apontada por Woortmann (2018).

Nesta vivência, foi possível identificar traços característicos do modo de vida camponês, como a autonomia relativa dos agricultores — que relataram experiências anteriores com os mercados institucionais (PNAE e PAA), abandonados devido à demora nos pagamentos —, a importância do grupo doméstico na organização das atividades cotidianas, a autarcia produtiva — com famílias produzindo boa parte dos bens necessários à sua subsistência — e a mediação com o mercado por meio de atores externos, como o governo e instituições de apoio (MENDRAS, 1976).

Em relação às TICs, observou-se um uso ainda limitado. A Associação possui um perfil no Instagram e o Mercado da Vida é divulgado pela Prefeitura, mas não há sistemas de controle de custos ou ferramentas de gestão mais estruturadas, o que compromete a sustentabilidade econômica do empreendimento.

No município de Caruaru, a vivência foi realizada no Assentamento Normandia, vinculado ao Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra (MST), que reúne uma Associação com 12 famílias, além de assentados individuais. A gestão do assentamento é articulada à estrutura organizativa nacional do MST, que possui uma geopolítica própria. Um dos assentados relatou que a comunidade enfrenta intensos conflitos, incluindo repressão, tentativas de cooptação e processos de judicialização.

A história do Assentamento é marcada por lutas e resistências em torno do acesso à terra, refletindo a análise de Martins (1981), que compreende a reforma agrária como um instrumento fundamental para a transformação das estruturas fundiárias no Brasil e para garantir o direito à terra às famílias camponesas. A adoção da Agroecologia ocorreu, segundo os relatos, "naturalmente", como resposta às dificuldades econômicas enfrentadas pelos assentados. Atualmente, há produção de milho crioulo, uma agroindústria de beneficiamento de frutas e mandioca, além da produção artesanal de bolos. "Ou a gente evolui para a Agroecologia, ou a reforma agrária perde a sua importância", afirmou um dos moradores, ressaltando o papel estratégico da Agroecologia na consolidação da reforma agrária.

O Assentamento também abriga o Centro de Formação Paulo Freire, fundado em 1999, voltado à educação popular e à formação de educadores e lideranças. Trata-se de um espaço central no processo de transição agroecológica, tendo em vista que muitos assentados participaram de formações nesse campo desde o início de seu funcionamento. No tocante às TICs, destacam-se parcerias internacionais para o desenvolvimento de maquinários agrícolas apropriados. Como relatou um assentado: "no Brasil, só tem duas ou três fábricas de máquinas; então, vamos buscar tecnologia apropriada na China". Esse depoimento evidencia a busca por tecnologias condizentes com as necessidades do território, ressaltando a importância do uso crítico e consciente da tecnologia, conforme defende Freire (2001).

No Agreste Meridional, mais especificamente em Garanhuns, a experiência com a Rede de Sementes Crioulas — Rede SEMEAM — revelou importantes contribuições à Agroecologia e ao desenvolvimento territorial. Criada em 2015, a Rede atua na articulação de espaços de diálogo e ações participativas voltadas à valorização da agrobiodiversidade e à conservação das sementes crioulas da agricultura familiar camponesa.

Entre suas principais ações, destacam-se pesquisas participativas, catalogação de sementes, criação de casas e bancos comunitários de sementes, além da realização de feiras, intercâmbios, seminários e oficinas (Figura 02). Para uma das voluntárias da Rede SEMEAM, "sementes crioulas são autonomia; são crioulas porque vão de acordo com a realidade de cada território". Uma agricultora guardiã relatou que possui autonomia para definir o melhor período de plantio, o que contribui para a preservação da diversidade genética local. Essa relação entre semente, território e autonomia dialoga com o conceito de "autonomia relativa" descrito por Mendras (1976), ao mesmo tempo em que reforça a transmissão intergeracional de saberes — traço distintivo das comunidades camponesas.



Figura 02: Cartaz de divulgação da 9º Feira de Troca de Sementes Crioulas.
Fonte: Almeida (2024)

As feiras de trocas foram descritas como espaços de socialização de experiências e fortalecimento das identidades culturais, indo além da simples comercialização. Segundo a voluntária da Rede, "elas trazem contribuições enormes e compartilhamento de aprendizagens; é respeito às tradições, compromisso social que vai além da comercialização". Em sua edição mais recente, foi realizada a 9ª Feira de Troca de Sementes Crioulas, sediada na Gerência Regional do IPA, em Garanhuns, com o tema: "Sementes crioulas e emergência climática: alternativa ancestral para a continuidade da vida".

Apesar dos avanços, um dos desafios relatados refere-se à ausência de sistematização das informações, o que dificulta a elaboração de projetos e a consolidação de dados. Embora utilizem redes sociais e possuam registros fotográficos, ainda não há um catálogo organizado das sementes.

Ainda em Garanhuns, foi realizada visita ao Laboratório Multidisciplinar de Tecnologias Sociais (LMTS), da UFAPE, voltado à formação de estudantes da área de Computação e ao desenvolvimento de soluções voltadas à inclusão social e tecnológica (Figura 03). Entre os projetos em andamento, destacam-se aplicativos para análise do metabolismo social agrário, apoio à comercialização de produtos do Mercado da Vida (em Bonito/PE) e gestão de bancos de sementes vinculados à COPPABACS. Tais iniciativas reforçam o papel das tecnologias sociais na promoção do desenvolvimento territorial e na emancipação dos sujeitos, conforme argumentam Rodrigues e Barbieri (2008).



Figura 03: Visita ao Laboratório Multidisciplinar de Tecnologias Sociais (LMTS).
Fonte: Almeida (2024)

Por fim, retornando ao Agreste Central — no município de Pesqueira —, a vivência se deu no território indígena Xukuru do Ororubá, durante o "XII Urubá Terra – Encontro de Agricultura e Partilha das Sementes Tradicionais", que teve como tema "Agricultura do encantamento: ancestralidade, saber e tradição" (Figura 04).



Figura 04: Visita à Casa da Semente Mãe Zenilda Xukuru do Ororubá.
Fonte: Almeida (2024)

A partir da cosmovisão apresentada por uma das lideranças, compreende-se que "tudo que é vivo é regenerativo, e a agricultura se insere nesse contexto". Nessa perspectiva, o ser humano é parte da natureza, território e produtor de mundo, enquanto o desenvolvimento — como imposição externa — é compreendido como ruptura: "Somos sementes, corpo e casa de espírito! As sementes são os ancestrais que ativam nossas memórias". Tal visão revela uma profunda integração entre espiritualidade, ancestralidade e práticas agrícolas, propondo outras epistemologias para se pensar o campo, o território e a vida.

Considerações Finais

As vivências realizadas durante a imersão nos territórios dos Agrestes Pernambucanos revelaram um conjunto de iniciativas agroecológicas exitosas, evidenciando, ao mesmo tempo, a diversidade e as múltiplas expressões do campesinato na região. O Mercado da Vida, em Bonito/PE, configura-se como um espaço estratégico de comercialização de produtos agroecológicos e de fortalecimento da cooperação entre agricultores; o Assentamento Normandia, em Caruaru/PE, representa a luta histórica pelo acesso à terra e a Agroecologia como instrumento de resistência; a Rede SEMEAM, em Garanhuns/PE, destaca-se como referência no resgate, manejo e conservação das sementes crioulas e ancestrais; o Laboratório Multidisciplinar de Tecnologias Sociais, da UFAPE, também em Garanhuns, desponta como espaço de inovação voltado à criação de soluções tecnológicas alinhadas às práticas agroecológicas; e o território indígena Xukuru do Ororubá, em Pesqueira/PE, expressa, por meio de sua cosmovisão, a valorização da ancestralidade, do saber e da tradição em suas práticas agrícolas.

O campesinato, em suas múltiplas formas de existência nos Agrestes de Pernambuco, encontra na Agroecologia uma via de fortalecimento de sistemas produtivos sustentáveis, adaptados às especificidades territoriais e socioculturais. Nesse contexto, as TICs, assim como as tecnologias sociais, exercem um papel relevante na transição para sistemas agroalimentares mais sustentáveis, não obstante seu uso ainda seja incipiente em boa parte das experiências observadas.

Por fim, as interações entre Agroecologia, campesinato e tecnologias voltadas ao desenvolvimento territorial demonstram que os camponeses dos Agrestes, apesar dos inúmeros desafios, continuam resistindo à expansão do capital e reivindicando o direito à terra. O fortalecimento dessas comunidades passa, cada vez mais, pela valorização das práticas agroecológicas e pelo reconhecimento do campesinato como sujeito central na construção de modelos de desenvolvimento territorial mais justos, sustentáveis e enraizados nas realidades locais.

Referências Bibliográficas

ABA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AGROECOLOGIA. Estatuto da Associação Brasileira de Agroecologia. São Paulo, SP: ABA, 2015. 12p.

ALMEIDA, J. Da ideologia do progresso à idéia de desenvolvimento (rural) sustentável. In: ALMEIDA, J.; NAVARRO, Z. (Org.). **Reconstruindo a agricultura**: idéias e ideais na perspectiva do desenvolvimento rural sustentável. Porto Alegre: UFRS, 1997. p. 33-55.

BORSATTO, R. S.; DO CARMO, M. S. Agroecologia e sua epistemologia. **Interciência**, v. 37, n. 9, p.711-716. Set. 2012.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia**: alguns conceitos e princípios. Brasília: MDA/SAF/DATER-IICA, 2004.

CAPORAL, F. R.; PAULUS, G.; COSTABEBER, J. A. (Orgs.). **Agroecologia**: uma ciência do campo da complexidade. Brasília: 2009.

CONDEPE/FIDEM. Divisão Geopolítica: conheça a divisão geopolítica do estado. Disponível em: http://www.bde.pe.gov.br/estruturacaogeral/mesorregioes.aspx. Acesso em 24. Mar. 2026.

FREIRE, P. A máquina está a serviço de quem? **Revista BITS**, São Paulo, v. 1, n. 7, p. 6, 2001.

FREIRE, P. **Extensão ou comunicação?**. 7. ed. Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1983.

FUINI, L. L.; PIRES, E. L. S. As dimensões da governança territorial: delineamento preliminar de aspectos teóricos e morfológicos. *In*: SAQUET, M. A.; SPOSITO, E. S. (Orgs.). **Territórios e territorialidades**: teorias, processos e conflitos. São Paulo: Expressão Popular: UNESP. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2008.

GIRALDO, O. F.; ROSSET, P. M. Principios sociales de las agroecologías emancipadoras. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 58, 2021.

GODOY, E. P.; MENEZES, M, A.; MARIN, R. A. (Orgs.). **Diversidade do campesinato: expressões e categorias**. São Paulo: Editora UNESP; Brasília, DF: Núcleo de Estudos Agrários e Desenvolvimento Rural, 2009.

HAESBAERT, R. Ordenamento territorial. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 26, n. 1, p.117-124, 2006.

HECHT, S. A evolução do pensamento agroecológico. **Revista Agroecologia e Desenvolvimento**. ASPTA, 1993.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

ITS – Instituto de Tecnologia Social. **Institucional**: Sobre nós. Disponível em: https://itsbrasil.org.br/institucional-sobre-nos. Acesso em: 10. Dez. 2024.

MARTINS, J. S. **Os camponeses e a política no Brasil**: as lutas sociais no campo e seu lugar no processo político. Petrópolis: Vozes, 1981.

MENDRAS, H. **Sociétés paysannes**. Paris, A. Colin, 1976.

MOLINA, M. G. Introducción a la agroecología. Sociedad Española de Agricultura Ecológica (SEAE), 2011.

NEVES, E. F.; LIMA, M. M. T.; GONÇALVES, G. E. Agroecologia e tecnologia social como caminhos para o desenvolvimento rural integral: uma aproximação. **Economia e Desenvolvimento**, v. 32, n. Esp., p. e9, 2020.

PACÍFICO, D. A.; BOLZAN, W. D.; RODE, E. L.; BLASIUS, M. B. Imersão na realidade rural como metodologia de ensino: a experiência da disciplina Vivência em Agricultura Familiar. **Revista Docência do Ensino Superior**, Belo Horizonte, v. 10, p. 1-19, 2020.

PLOEG, J. D.V. O modo de produção camponês revisitado. *In*: SCHNEIDER, S. (Org.). **A diversidade da agricultura familiar**. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

RAFFESTIN, C. A produção das estruturas territoriais e sua representação. *In*: SAQUET, M. A.; SPOSITO, E. S. (Orgs.). **Territórios e territorialidades**: teorias, processos e conflitos. São Paulo: Expressão Popular: UNESP. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2008.

RODRIGUES, I.; BARBIERI, J. C. A emergência da tecnologia social: revisitando o movimento da tecnologia apropriada como estratégia de desenvolvimento sustentável. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 42, p. 1069-94, nov./dez. 2008.

SILVEIRA, A. C. M.; ROSA, R.; HILLIG, C.; FLORES, D. TICs para inclusão social: o projeto institucional da UFSM. *In*: SILVEIRA, A. C. M. **TICs para inclusão social**: cidadania, educação ambiental e agroecologia. Santa Maria: FACOSUFSM, 2013.

SOUZA, E. B. C. O território e a região: análise de políticas públicas. *In*: SAQUET, M. A.; SPOSITO, E. S. (Orgs.). **Territórios e territorialidades**: teorias, processos e conflitos. São Paulo: Expressão Popular: UNESP. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2008.

VIEIRA PINTO, A. **O conceito de tecnologia**. Rio de Janeiro: Contraponto, 197?.

WANDERLEY, M. N. B. Raízes históricas do campesinato brasileiro. XX Encontro Anual da ANPOCS. Caxambu: 1996.

WOORTMANN, K. “Com parente não se neguceia”. O campesinato como ordem moral. **Anuário Antropológico**, v. 12, n. 1, p. 11–73, 2018.

MICROALGAS DERIVADAS DO TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUAIS E *BACILLUS ARYABHATTAI* COMO BIOINSUMOS COMPLEMENTARES PARA A PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE AMARANTO

1 Bianca Dionísio, 2 Inês Cechin, 3 Gustavo Henrique Ribeiro da Silva

[1]Departamento de Ciências Biológicas, Faculdade de Ciências, UNESP/Bauru, e-mail: bianca.dionisio@unesp.br; 2Departamento de Ciências Biológicas, Faculdade de Ciências, UNESP/Bauru, e-mail: ines.cechin@unesp.br; 3Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia, UNESP/Bauru, e-mail: gustavo.ribeiro@unesp.br.

Palavras-chave: esgoto; bioinsumos; reciclagem de nutrientes.

Resumo

O rápido crescimento populacional tem aumentado a demanda por água e alimentos, intensificando a geração de esgoto e os impactos ambientais associados. As águas residuárias contêm elevada carga de matéria orgânica, nutrientes e diversos poluentes. Uma alternativa sustentável para o tratamento desses efluentes é o uso de microalgas nativas, que atuam como agentes de biorremediação ao remover nutrientes do meio aquático e que, posteriormente, podem ser utilizadas como fertilizantes em cultivos agrícolas, promovendo o crescimento das plantas e contribuindo para uma agricultura mais sustentável. Além disso, rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR) têm sido amplamente utilizadas na agricultura para estimular o desenvolvimento das culturas. Objetivo desse estudo foi avaliar os efeitos da aplicação combinada de microalgas e *Bacillus aryabhattai* na produção de biomassa, características fisiológicas e estado nutricional do gênero *Amaranthus* durante o estágio inicial de crescimento em condições de casa de vegetação. Quatro tratamentos foram estabelecidos: controle (T1), 4 g de microalgas isoladamente (T2), 4 g de microalgas + 5 mL de *B. aryabhattai* (T3) e 4 g de microalgas + 10 mL de *B. aryabhattai* (T4). A formulação contém a cepa CMAA 1363 de *B. aryabhattai* (1×10^8 UFC mL^{-1}) como componente microbiano ativo, juntamente com substâncias húmicas e outros agentes de formulação (espessante, conservante e água). A aplicação de microalgas promoveu aumentos significativos na taxa fotossintética e no acúmulo de matéria seca da parte aérea. A associação de microalgas com *B. aryabhattai* resultou em incrementos adicionais no desempenho fotossintético das plantas e na produção de biomassa sem diferenças significativas entre as doses bacterianas avaliadas ao final do experimento. Os teores foliares de N, K, Cu, Fe, Mn e Zn foram elevados pela aplicação de microalgas, sendo ainda mais acentuados na presença de 10 mL de *B. aryabhattai.* Essas respostas estão provavelmente associadas a melhorias no estado nutricional das plantas, possivelmente medidas pela inoculação com *B. aryabhattai*. Em conjunto, os resultados indicam que a aplicação de microalgas associada a rizobactérias promotoras de crescimento representa uma estratégia promissora para integrar tratamento sustentável de águas residuárias e aumento da produtividade vegetal, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Introdução

O rápido crescimento populacional tem intensificado a demanda por recursos naturais, especialmente por água, resultando em um aumento expressivo na geração de esgoto doméstico e urbano. Estima-se que mais de 80% das águas residuárias geradas globalmente ainda sejam descartadas no ambiente sem tratamento adequado, agravando problemas de poluição hídrica e comprometendo a qualidade dos ecossistemas aquáticos (UNESCO, 2023). Essa água residuária é caracterizada pela grande quantidade de matéria orgânica, nutrientes minerais (notadamente nitrogênio e fósforo), além da presença de elementos potencialmente tóxicos, como fármacos, metais pesados e outros micropoluentes emergentes (Zhang et al., 2021; Verlicchi et al., 2022). A liberação inadequada desses contaminantes em corpos d'água pode desencadear processos como eutrofização, toxicidade para organismos aquáticos e riscos à saúde humana, especialmente em regiões com infraestrutura sanitária limitada (Li et al., 2020; Sharma et al., 2023). O grande desafio está em remover os poluentes e a matéria orgânica da água para que possa ser devolvida para os corpos d'água sem afetar o meio ambiente.

O esgoto sanitário é tratado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), onde ocorrem o tratamento primário, secundário e algumas vezes o tratamento terciário, compostos por processos físicos, químicos e biológicos para remover sólidos, areia, matéria orgânica, nutrientes e patógenos. Para a retirada de matéria orgânica algumas ETEs no Brasil utilizam o tratamento anaeróbio seguido por aeróbio, onde microrganismos heterotróficos consomem a matéria orgânica disponível. Uma opção amplamente utilizada são os reatores UASB – do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket.*

Um biotratamento alternativo e complementar as ETEs que tem sido explorado nos últimos anos são as microalgas, além de promoverem um tratamento sustentável e de baixo custo para remover matéria orgânica, nutrientes, metais pesados, patógenos e fármacos presentes no esgoto sanitário, podendo ser incluídas como tratamento secundário ou terciário nas ETEs, também podem gerar biomassa com potencial para biofertilizante. As microalgas são comumente cultivadas em sistemas abertos como lagoas ou tanques, esses fotobiorreatores sendo utilizados para cultivos em larga escala, principalmente, devido ao baixo custo de construção e manutenção (Santos et al., 2021). Um exemplo de lagoa utilizada é o sistema *High Rate Algal Pond*

(HRAPs), o qual utiliza microalgas nativas do esgoto, e se mostrou promissor em reduzir significativamente a concentração de bactérias, como *Escherichia coli* e coliformes totais (Ruas et al., 2022; Pompei et al., 2023). Se essas microalgas forem cultivadas em esgoto sanitário pós UASB, ou seja, após o tratamento anaeróbio, a retenção de nutrientes se torna mais oportuna (LI et al., 2019). As microalgas conseguem retirar macronutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), nutrientes essenciais para seu crescimento, além de serem capazes de assimilar micronutrientes como magnésio (Mg), zinco (Zn) e cobalto (Co) e de contribuírem com o sequestro de CO_2, por serem organismos fotossintéticos (Acién Fernández, et al., 2018, Bharti, 2025, Suleiman, 2020). Fertilizantes se tornaram indispensáveis na agricultura, para atender a alta demanda global por alimentos, entretanto, o uso excessivo de fertilizantes químicos pode causar degradação do solo, eutrofização e contaminação de aquíferos (Junior, 2025). Nos últimos anos, as microalgas tornaram-se um produto agrícola sustentável devido ao aumento da disponibilidade de nutrientes, à melhoria do crescimento das plantas e dos rendimentos das culturas, e à manutenção do carbono orgânico e da fertilidade do solo, através do aumento da atividade microbiana no solo (Solomon et al., 2023)

Outro grupo relevante de microrganismos na agricultura são as rizobactérias, bactérias associadas às rizosferas das plantas. Dependendo da espécie e das interações estabelecidas com o hospedeiro, elas podem promover o crescimento vegetal e são conhecidas como Rizobactérias Promotoras de Crescimento de Plantas (PGPR) (Vessey, 2003). As PGPR promovem o crescimento por meio da produção de hormônios e da melhoria na absorção de nutrientes (Gupta et al., 2015), além de poderem mitigar estresses abióticos e bióticos, como limitações nutricionais, calor, seca, exposição a poluentes e efeitos antagonistas contra fitopatógenos. Elas também podem liberar fósforo (P) solúvel na solução do solo. Espécies do gênero *Bacillus* se destacam pela capacidade de produzir sideróforos que auxiliam na solubilização e quelação do ferro (Tsotetsi et al., 2022). Entre elas, *Bacillus aryabhattai* pode produzir diversos fitohormônios e ajudar a manter o equilíbrio hormonal tanto em condições de estresse quanto em condições normais. *Bacillus aryabhattai* foi encontrada na rizosfera de *Cereus jamacaru*, uma importante espécie de cato nativa do bioma Caatinga (Kavamura et al., 2013) caracterizado por um clima quente e semiárido, com chuvas irregulares e longos períodos de seca. Essa cepa permanece ativa durante condições de seca, conferindo tolerância à seca por meio do estímulo ao desenvolvimento e crescimento das raízes (Embrapa, 2024).

Estudos demostram que sistemas de co-cultura de microalgas e *B. aryabhattai* têm sido utilizados como uma abordagem promissora para o tratamento biológico de águas residuais, promovendo a remoção N e P (Dong et al., 2025). No entanto, estudos que investigam especificamente a aplicação combinada de microalgas e *B. aryabhattai* no crescimento de plantas ainda são escassos, e as evidências diretas dessa combinação ainda são limitadas. Essa lacuna é particularmente evidente no que se refere aos seus efeitos complementares na fisiologia vegetal, no desempenho fotossintético e na dinâmica de nutrientes. Tal abordagem merece investigação adicional, uma vez que as microalgas podem atuar como um insumo orgânico rico em nutrientes, enquanto as PGPR podem favorecer a mobilização, a absorção e o desempenho fisiológico no uso de nutrientes. Portanto, o presente estudo busca preencher essa lacuna de conhecimento, avaliando a aplicação combinada de microalgas derivadas do tratamento de esgoto com *B. aryabhattai* em plantas de *Amaranthus cruentus* em condições controladas de estufa.

O cultivo de *Amaranthus* destaca-se por sua elevada importância agronômica e por seu valor nutricional e nutracêutico. Suas sementes são ricas em minerais, amido, proteínas, lipídios e vitaminas, além de serem isentas de glúten (Malik, 2023., Alemayehu, 2015). Recentemente, uma nova espécie adaptada às condições de clima e solo brasileiros foi desenvolvida pela Embrapa Cerrados, denominada *A. cruentus* L., variedade BRS Alegria (Spehar et al., 2003). Este estudo avaliou os efeitos combinados de microalgas e *B. aryabhattai* cepa CMAA 1363 na produção de biomassa da parte aérea, nas trocas gasosas foliares e no teor de nutrientes nas folhas de plantas de *A. cruentus* em condições de casa de vegetação. Hipotetizou-se que a aplicação combinada de microalgas e *B. aryabhattai* promoveria melhor desempenho das plantas em relação à aplicação isolada de microalgas.

Material e Métodos

Obtenção do efluente e cultivo das microalgas

O esgoto foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do distrito de Candeia, em Bauru-SP, o qual já tinha passado pelo tratamento em reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) para remoção dos altos níveis de matéria orgânica, porém ainda com grande concentração de nutrientes. Posteriormente esse efluente foi utilizado como meio de cultivo para o crescimento das microalgas nativas do esgoto. Inicialmente, foi cultivado o inóculo de microalgas em ambiente controlado: iluminação com lâmpadas fluorescentes com fotoperíodo de 12/12 horas e temperatura de 25 a 32 ºC por 12 dias, permitindo o crescimento das microalgas nativas no meio por ficoprospecção. Em seguida no reator do tipo *High Rate Algal Pond* (HRAP), foi adicionado o inóculo em uma proporção de 10% do volume operacional da lagoa (15 litros) e 90% de efluente (135 litros). Após 7 dias de cultivo, o efluente foi transferido para bombonas de 200 L para passar pelo processo de sedimentação naturalmente. Depois de 7 dias de sedimentação, as microalgas depositadas no fundo foram separadas da água de reuso, secas em estufa de circulação forçada a 65ºC, trituradas e posteriormente armazenadas para aplicação nas plantas.

Condições de cultivo do Amaranto

Sementes de *A. cruentus* cv. BRS Alegria foram semeadas em vasos plásticos de 4 L contendo uma mistura de substrato composta por 1 parte de substrato comercial Carolina® e 2 partes de vermiculita de granulação média (1:2 v/v). As plantas foram mantidas sob fotoperíodo natural em casa de vegetação, com temperaturas médias mínimas e máximas de 18,9 °C e 33,2 °C respectivamente.

As plantas foram divididas em quatro tratamentos: T1: substrato + 0 g de microalgas + 0 mL de *B. aryabhattai*; T2: substrato + 4 g de microalgas secas + 0 mL de *B. aryabhattai*; T3: substrato + 4 g de microalgas secas + 5 mL de *B. aryabhattai*; e T4: substrato + 4 g de microalgas secas + 10 mL de *B. aryabhattai*.
As microalgas foram aplicadas inicialmente na semeadura e incorporadas superficialmente. O bioinsumo Auras® (contendo *B. aryabhattai* CMAA 1363 (1×10^8 UFC mL^{-1}), substâncias húmicas, espessante, conservante e água) foi diluído (5 ou 10 mL em 100 mL de água por vaso) e aplicado 16 dias após a semeadura. Uma segunda aplicação de microalgas ocorreu 26 dias após a semeadura.

Medidas de trocas gasosas

A taxa fotossintética (*A*), a condutância estomática (g_s), a taxa de transpiração (*E*) e a concentração intercelular de CO_2 (*Ci*) foram medidas semanalmente a partir 22º dia após a semeadura, utilizando um analisador de gás infravermelho (IRGA – LCpro, ADC BioScientific Ltd., Reino Unido). As medições foram realizadas na folha mais jovem completamente expandida, entre 8h e 10h da manhã, sob condições ambientais. Uma radiação fotossinteticamente ativa de 900 µmol m^{-2} s^{-1} foi fornecida por uma fonte de luz (matriz de diodos contendo LEDs azuis a 470 nm e vermelhos a 660 nm) acoplada à câmara foliar. As folhas foram mantidas nessa irradiação até que as taxas fotossintéticas em estado estacionário fossem atingidas. A razão A/Ci foi utilizada para estimar a eficiência instantânea de carboxilação.

Determinação de massa seca e quantificação de nutrientes nas folhas e nas microalgas

Ao final do período experimental, as plantas foram colhidas e separadas em folhas e caules. As amostras foram secas em estufa a 65 °C e posteriormente pesadas para a determinação da massa seca da parte aérea. As folhas maduras foram separadas, secas, moídas e submetidas à análise de nutrientes. As microalgas secas e as amostras vegetais foram analisadas quanto aos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), de acordo com os procedimentos descritos no Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Condicionadores de Solo (Brasil, 2017).

Resultados e Discussão

Os tratamentos que receberam microalgas e microalgas associadas a *B. aryabhattai* apresentaram taxas de fotossíntese maiores do que o tratamento controle. Esses resultados podem estar relacionados com o aumento dos teores de nutrientes nas folhas em resposta a adição de microalgas e sua combinação com *B. aryabhattai* (Tabela 1). O tratamento que recebeu 10 mL de *B. aryabhattai* apresentou uma diferença significativa na fotossíntese em relação aos outros tratamentos, possuindo as maiores taxas fotossintéticas e mostrando o efeito sinérgico entre as microalgas e as rizobactérias em alta concentração. É possível notar nos resultados uma correlação positiva entre a fotossíntese (*A*) e a condutância estomática (g_s), conforme ocorre uma queda na g_s, ocorre uma queda em *A* (Fig. 1C, 1A), e um aumento progressivo na concentração de CO_2 na cavidade subestomática (*Ci*) do início ao final do experimento (Fig. 1D). O fechamento estomático sem alteração na capacidade do mesófilo inevitavelmente reduz *Ci*. Embora houve fechamento estomático ao longo do experimento, a concentração do CO_2 aumentou indicando que a queda da taxa de fotossíntese não resultou de uma limitação estomática, mas de uma limitação não-estomática. O aumento na C_i foi maior nas plantas controle quando comparado com os demais tratamentos, embora não significativo no final do experimento (Fig. 1D). Limitações não-estomáticas incluem uma diminuição da condutância do mesófilo das cavidades subestomáticas para os cloroplastos e/ou restrições bioquímicas relacionadas à atividade da Rubisco e à capacidade de transporte de elétrons (Farquhar et al., 1980; Flexas et al., 2002). A partir da segunda medida, 29 dias após o plantio, nota-se uma queda na transpiração (*E*) nas plantas sendo mais acentuada no controle e nas plantas que não receberam *B. aryabhattai* (Fig. 1), devido ao fechamento estomático que resultou em uma perda menor de água por transpiração.

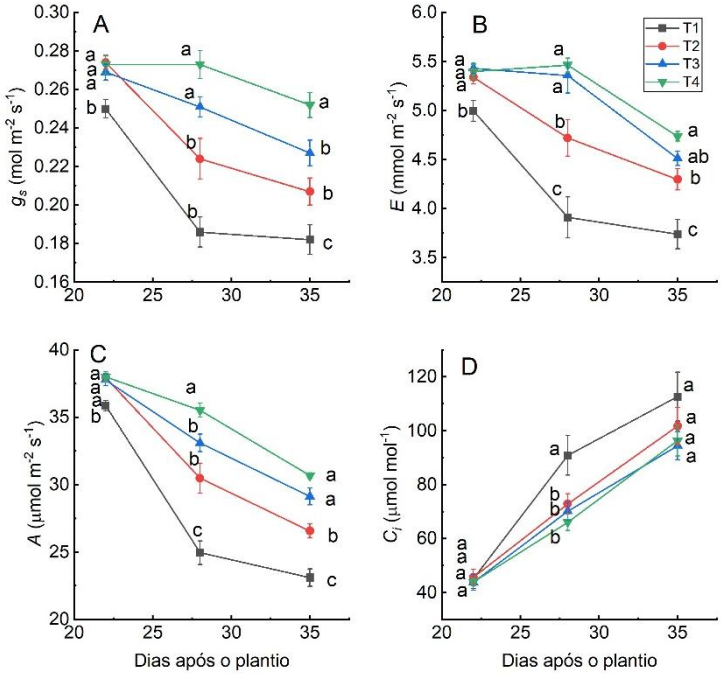


Figura 01: Condutância estomática (g_s, A), transpiração (E, B), fotossíntese (A, C) e concentração de CO_2 na cavidade subestomática, transpiração (Ci, D) de plantas de amaranto cultivadas sob adição de microalgas e *Bacillus aryabhattai*. Valores são a média ± erro da média para 10 repetições. T1 = Substrato + 0 g de microalgas + 0 mL de *Bacillus aryabhattai*; T2 = Substrato + 4 g de microalgas + 0 mL de *Bacillus aryabhattai*; T3 = Substrato + 4 g de microalgas + 5 mL de *Bacillus aryabhattai*; T4 = Substrato + 4 g de microalgas +10,0 mL de *Bacillus aryabhattai*. Fonte: autora.

A redução na eficiência de carboxilação indica limitações bioquímicas na assimilação de CO_2, possivelmente associadas à menor atividade da Rubisco ou a restrições no ciclo de Calvin. Ao longo do período de amostragem, observou-se uma redução acentuada na eficiência de carboxilação, particularmente em plantas controle, sem aplicação de microalgas e *B. aryabhattai*, à medida que as plantas avançavam nos estágios de desenvolvimento e ingressavam na fase reprodutiva (Fig. 2), possivelmente refletindo limitações bioquímicas associadas ao processo de senescência foliar. Durante essa fase, as plantas experimentam maiores demandas energéticas associadas à formação de inflorescências e sementes. A redução na capacidade fotossintética em folhas mais velhas é comumente associada à exportação ativa de nutrientes e assimilados para estruturas reprodutivas em desenvolvimento (Kitajima et al., 2022), acelerando a senescência foliar e limitando a fixação de carbono. No entanto, mesmo nessas condições, o tratamento com a maior dose de *B. aryabhattai* apresentou desempenho superior, embora não significativo no final do experimento, sugerindo maior eficiência na utilização de microalgas quando combinado com à inoculação bacteriana. Essa resposta provavelmente está associada a concentrações mais elevadas de nitrogênio foliar em comparação com os outros tratamentos, sustentando a capacidade de carboxilação durante o estágio reprodutivo.

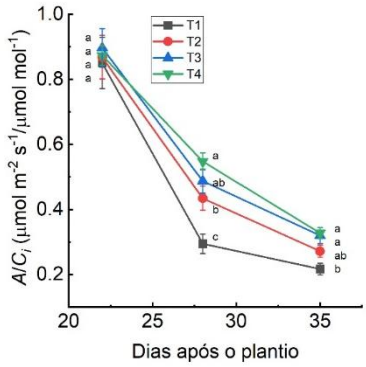


Figura 02: Razão entre fotossíntese (*A*) e concentração de CO_2 na cavidade subestomática. Valores são a média ± erro da média para 10 repetições. T1 = Substrato + 0 g de microalgas + 0 mL de *Bacillus aryabhattai*; T2 = Substrato + 4 g de microalgas + 0 mL de *Bacillus aryabhattai*; T3 = Substrato + 4 g de microalgas + 5 mL de *Bacillus aryabhattai*; T4 = Substrato + 4 g de microalgas +10,0 mL de *Bacillus aryabhattai*. Fonte: autora.

A produção de massa seca pelas plantas está diretamente relacionada à disponibilidade e ao equilíbrio de nutrientes essenciais no sistema solo–planta. Nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio desempenham papéis centrais na fotossíntese, na síntese de compostos estruturais e no metabolismo energético, influenciando diretamente o crescimento e a acumulação de biomassa. Em particular, o nitrogênio é um componente fundamental de proteínas, clorofila e enzimas-chave, como a Rubisco, estando fortemente associado à capacidade fotossintética e, consequentemente, à produção de matéria seca. Além disso, micronutrientes como ferro, manganês e zinco participam de processos enzimáticos e redox, contribuindo para a eficiência metabólica das plantas. Dessa forma, o suprimento adequado de nutrientes não apenas sustenta o crescimento vegetal, mas também determina a eficiência de conversão de carbono assimilado em biomassa. A adição de microalgas promoveu um aumento de massa seca da parte aérea em relação ao controle, tanto na fração foliar quanto na fixação caulinar, corroborando os resultados de Ferreira et al. (2025). Os tratamentos T3 e T4 apresentaram os maiores valores de biomassa total, indicando que a aplicação de *B. aryabhattai* promoveu aumento significativo em relação ao T2, que recebeu apenas microalgas. No entanto, não foram observadas diferenças significativas entre as dosagens de 5 mL e 10 mL, sugerindo respostas semelhantes entre os níveis de inoculação e evidenciando o efeito complementar entre as microlagas e o bioinsumo microbiano.

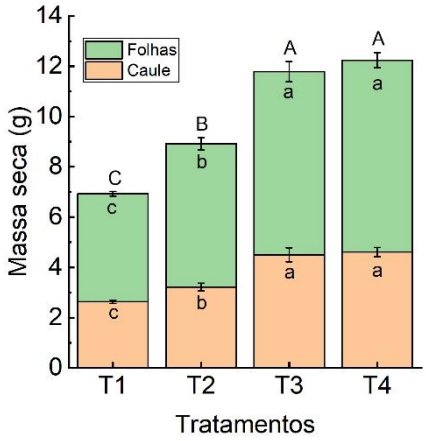


Figura 03: Partição da massa seca da parte aérea de plantas de amaranto cultivadas sob adição de microalgas e *Bacillus aryabhattai*. Valores são a média ± erro da média para 10 repetições. T1 = Substrato + 0 g de microalgas + 0 mL de *Bacillus aryabhattai*; T2 = Substrato + 4 g de microalgas + 0 mL de *Bacillus aryabhattai*; T3 = Substrato + 4 g de microalgas + 5 mL de *Bacillus aryabhattai*; T4 = Substrato + 4 g de microalgas +10,0 mL de *Bacillus aryabhattai*. Diferenças significativas (*P* <0,05) referentes ao órgão analisado são representadas por letras minúsculas diferentes e diferenças significativas da comparação entre os tratamentos em relação à massa seca total são representadas por letras maiúsculas. Fonte: autora.

A biomassa de microalgas apresentou elevadas concentrações de N, Cu, Fe e Zn, acima do intervalo considerado ideal para o crescimento de *A. cruentus*, o que provavelmente contribuiu para o aumento das concentrações desses elementos nos tecidos foliares das plantas. Apesar das concentrações relativamente elevadas de Cu, Fe e Zn nas microalgas, não foram observados aumentos expressivos nas concentrações foliares nem sintomas visuais de toxicidade nas plantas de *A. cruentus*. Esse resultado sugere que a disponibilidade desses elementos pode ser modulada por interações no solo ou por mecanismos fisiológicos das plantas, evitando o acúmulo excessivo nos tecidos vegetais. Nos tratamentos que receberam *B. aryabhattai*, observou-se um aumento nos teores foliares de N, Cu, Fe, Mn e Zn, principalmente o tratamento T4, que recebeu 10 mL de bioinsumo. Esses resultados sugerem, mais uma vez, que o *B. aryabhattai* pode ter potencializado a absorção dos nutrientes fornecidos pelas microalgas. Estudos anteriores demonstram que *B. aryabhattai* aumenta a disponibilidade de micronutrientes como Cu, Mn e Zn (Ramesh et al., 2014; Rafique et al., 2025; Srithaworn et al., 2023) através de mecanismos que incluem solubilização de nutrientes, produção de sideróforos e modificação da rizosfera.

Tratamento	Macronutrientes (g kg^{-1})					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Ideal Amaranto[1]	28,0	6,4	60,0	7,0	13,9	3,9
Microalgas	55	8,7	10	10	3,2	12,9
T1: 0 g + 0 mL	15,8	8	22	9	16	5
T2: 4 g + 0 mL	21,8	7,6	21	7	17,2	4,3

T3: 4 g + 5 mL	21,9	8	22	9	18	4
T4: 4 g + 10 mL	22,2	8	23	6	16	5
Tratamento	Micronutrientes (mg kg^{-1})					
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
Ideal Amaranto[1]	–	15,0	229,0	359,0	36,0	–
Microalgas	36	32	4408	104	220	–
T1: 0 g + 0 mL	27	8	72	56	45	–
T2: 4 g + 0 mL	23	10	77	56	47	–
T3: 4 g + 5 mL	25	10	76	60	49	–
T4: 4 g + 10 mL	24	11	88	75	57	–

Tabela 01: Teores de macro e micronutrientes das microalgas secas e das folhas de amaranto. Os valores são as médias de análise em triplicata. Fonte: Autora e [1](Raij *et al*., 1997).

Considerações Finais

Os resultados obtidos indicam que a aplicação combinada de microalgas e *Bacillus aryabhattai* pode favorecer o desempenho fisiológico e o acúmulo de biomassa no *A. cruentus*, possivelmente por meio de maior disponibilidade e aproveitamento de nutrientes. A biomassa de microalgas demonstrou potencial como biofertilizante, e sua associação com a rizobactéria esteve relacionada a incrementos na absorção de nutrientes e na produção de massa seca, com destaque para o tratamento T4.

Sob a perspectiva da sustentabilidade, esses achados reforçam o potencial do uso integrado de microalgas e microrganismos promotores de crescimento como uma abordagem alinhada aos princípios da economia circular, ao permitir a reciclagem de nutrientes provenientes de resíduos e a redução da dependência de insumos sintéticos. Dessa forma, essa estratégia pode contribuir para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais eficientes, resilientes e ambientalmente sustentáveis. No entanto, estudos adicionais em condições de campo e ao longo de ciclos completos de cultivo são necessários para confirmar a consistência desses efeitos e avaliar possíveis impactos a longo prazo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP (2024/09344-9) e ao CNPq (301994/2025-0) pela concessão da bolsa e aos Departamentos de Engenharia Civil e Ambiental e de Ciências Biológicas da UNESP pela infraestrutura que possibilitou o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ACIÉN FERNÁNDEZ FG, GÓMEZ-SERRANO C, FERNÁNDEZ-SEVILLA JM. Recovery of nutrients from wastewaters using microalgae. **Frontiers in Sustainable Food Systems.** 2018; 2:59.

ALEMAYEHU FR, BENDEVIS M, JACOBSEN SE. The potential for utilizing the seed crop amaranth (*Amaranthus* spp.) in East Africa as an alternative crop to support food security and climate change mitigation. **Journal of Agronomy and Crop Science**. 2015; 201(5):321–329.

BHARTI, S. et al. A critical review on the symbiotic effect of bacteria and microalgae on treatment of sewage with biofertilizer production. **Journal of Environmental Management**, v. 373, n. 123704, jan. 2025.

BRASIL. **Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA, 2017. ISBN 978-85-7991-109-5

DONG, J., PENG, S., ZHANG, X., XIE, Z., MENG, R., XI, Y., & KONG, W. (2025). Construction of a co-culture system of Bacillus aryabhattai and Desmodesmus sp. and its performance in treating simulated wastewater with high nitrogen and phosphorus. **Algal Research**, 89, 104070.

FARQUHAR, G.D.; VON CAEMMERER, S.; BERRY, J.A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species. **Planta**, 1980, 149, 78–90.

FERREIRA, E. T., CAETANO, L. E. S., CANDIDO, J. M. B., CECHIN, I., & DA SILVA, G. H. R. (2025). Enhancing Plant Growth and Photosynthesis with Biofertilizers from Sewage Treatment. ***Agronomy***, *15*(3), 610.

FLEXAS, J., & MEDRANO, H. (2002). Drought-inhibition of photosynthesis in C_3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. ***Annals of botany***, *89*(2), 183-189.

GUPTA, G.; PARIHAR, S. S.; AHIRWAR, N. K.; SNEHI, S. K.; SINGH, V. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. **Journal of Microbial and Biochemical Technology**, 2025 v. 7, n. 2, p. 96-102.

JUNIOR, M. J. et al. From wastewater to fields: Exploring the scale-up and economic viability of biofertilizer production from microalgae cultivated in wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 117047, jan. 2025.

KAVAMURA, V.N.; SANTOS, S.N.; DA SILVA, J.L.; PARMA, M.M.; ÁVILA, L.A.; VISCONTI, A.; ZUCCHI, T.D.; TAKETANI, R.G.; ANDREOTE, F.D.; DE MELO, I.S. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. Microbiological research 2013, 168, 183–191.

KITAJIMA, K.; MULKEY, S.S.; SAMANIEGO, M.; WRIGHT, S.J. Decline of photosynthetic capacity with leaf age and position in two tropical pioneer tree species. **American Journal of Botany**, 2002, 89, 1925–1932.

LI, S.; SHI, W.; XU, L.; JIANG, C.; ZHANG, Q. Nutrient removal and eutrophication control in wastewater treatment: A review. Sci. Total Environ. 2020, 731, 139174.

LIMA, E. **Bioinsumo Auras é destaque no Balanço Social 2023 da Embrapa** . Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/88762663/bioinsumo-auras-e-destaque-no-balanco-social-2023-da-embrapa>. Acesso em: 18 mar. 2026.

MALIK, M., SINDHU, R., DHULL, S. B., BOU-MITRI, C., SINGH, Y., PANWAR, S., & KHATKAR, B. S. (2023). Nutritional composition, functionality, and processing technologies for amaranth. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2023(1), 1753029.

POMPEI, Caroline Moco Erba et al. **Assessment of total coliforms and *E. coli* removal in algae-based pond under tropical temperature in addition of carbon dioxide (CO2) and shading**. Ecological Engineering, v. 196, p. 107102, 2023.

RAFIQUE, E.; MUMTAZ, M.Z.; LI, L.; ULLAH, I.; CHOHAN, T.A.; ALAM, M.W.; MUSTAFA, A.; ALSAKKAF, W.A.; ALI, H.M. Plant Growth Promoting Rhizobacteria Regulated Nutrient Uptake in Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Wild) Under Nutrient-Deficient Conditions Through Solubilizing Insoluble Minerals. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition,** 2025, pp. 1–24.

RAIJ, B. V *et al*. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997.

RAMESH, A.; SHARMA, S.K.; SHARMA, M.P.; YADAV, N.; JOSHI, O.P. Inoculation of zinc solubilizing *Bacillus aryabhattai* strains for improved growth, mobilization and biofortification of zinc in soybean and wheat cultivated in Vertisols of central India. **Applied Soil Ecology,** 2014, 73, 87–96.

RUAS, Graziele et al. **The effect of CO2 addition and hydraulic retention time on pathogens removal in HRAPs**. Water Science and Technology, v. 82, n. 6, p. 1184-1192, 2020.

SANTOS, Beatriz et al. Produção de biomassa microalgal em escala: desafios e oportunidades. In: Severo, Ihana Aguiar et al. *Microalgas: potenciais, aplicações e desafios.* Canoas: Mérida, 2021. p. 8-44

SHARMA, J.; KUMAR, V.; KUMAR, R.; et al. Emerging contaminants in water and wastewater: Sources, impacts, and remediation strategies. Chemosphere 2023, 311, 136990.

SOLOMON, W., MUTUM, L., JANDA, T., & MOLNÁR, Z. (2023). Potential benefit of microalgae and their interaction with bacteria to sustainable crop production. *Plant Growth Regulation*, *101*(1), 53-65.

SPEHAR CR, TEIXEIRA DL, CABEZAS WARL, ERASMO EAL. Amaranth BRS-Alegria: alternative for diversification of cropping systems. Pesquisa **Agropecuaária Brasileira**. 2003; 38:659–663.

SRITHAWORN, M.; JAROENTHANYAKORN, J.; TANGJITJAROENKUN, J.; SURIYACHADKUN, C.; CHUNHACHART, O. Zinc solubilizing bacteria and their potential as bioinoculant for growth promotion of green soybean (*Glycine max* L. Merr.). **PeerJ 2023**, 11, e15128.

SULEIMAN, A. K. A. et al. From toilet to agriculture: Fertilization with microalgal biomass from wastewater impacts the soil and rhizosphere active microbiomes, greenhouse gas emissions and plant growth. **Resources, conservation and recycling**, v. 161, n. 104924, set. 2020.

TSOTETSI, T., NEPHALI, L., MALEBE, M., & TUGIZIMANA, F. Bacillus for plant growth promotion and stress resilience: what have we learned? **Plants**. 2022; 11(19), 2482.

UNESCO. United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water; UNESCO: Paris, France, 2023.

VERLICCHI, P.; AL AUKIDY, M.; ZAMBELLO, E. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load, and environmental risk after a secondary treatment—A review. Sci. Total Environ. 2022, 429:123–155.
VESSEY, J.K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil.** 2003; 255: 571-586.

ZHANG, D.; GERSBERG, R.M.; NG, W.J.; TAN, S.K. Removal of pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment: A review. Sci. Total Environ. 2021, 498: 26–42.

POTENCIAL ANTAGÔNICO COMPARATIVO DE *Aspergillus niger* E *Bacillus subtilis* NO BIOCONTROLE DE *Fusarium sp*. IN VITRO

1 Isadora Maria Lopes Trombini, 2 Maria Vitória Figueiroba, 3 Giovana Santana Gonçalves, 4 Ana Carolina Frabi Americo, 5 Andressa Almeida Bertolla, 6 Adriele Rodrigues dos Santo, 7 Cristian Coelho Silva, 6 Paulo Agenor Alves Bueno

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: trombini@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: mariavitoriafigueiroba@gmailcom; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: giovanasantana@alunos.utfpr.edu.br; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: anaamerico@alunos.utfpr.edu.br; 5 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: andressabertolla@alunos.utfpr.edu.br; 6 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: adrielesantos@utfpr.edu.br; 7 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: cristiancoelhosilva@gmail.com; 8 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: pauloaabueno@gmail.com

Palavras-chave: Antagonismo; Insumos biológicos; controle biológico.

Resumo

A intensificação dos sistemas agrícolas e o uso excessivo de fungicidas têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis no controle de fitopatógenos. Dentre essas, espécies do gênero *Fusarium* destacam-se por causar doenças que comprometem significativamente a produtividade agrícola. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de *Aspergillus niger* e *Bacillus subtilis* como agentes de controle biológico frente a *Fusarium* sp. Os ensaios foram conduzidos *in vitro* utilizando três metodologias: confronto direto (contato físico), confronto indireto (interação à distância) e avaliação de metabólitos voláteis (exposição gasosa). Foram testadas diferentes concentrações dos antagonistas, e a eficiência foi determinada por meio da Porcentagem de Inibição do Crescimento Micelial (PICM).Os resultados demonstraram que o método de confronto direto apresentou os maiores níveis de inibição, com destaque para *A. niger*, que atingiu 100% de inibição nas maiores concentrações, evidenciando elevada capacidade de exclusão competitiva. *Bacillus subtilis*, por sua vez, apresentou desempenho mais versátil, com atividade antagonista observada também nos métodos de confronto indireto e metabólitos voláteis, ainda que com menores percentuais de inibição. Esses resultados indicam que *A. niger* atua predominantemente por competição direta, enquanto *B. subtilis* apresenta mecanismos adicionais baseados na produção de metabólitos difusíveis e compostos voláteis.Dessa forma, conclui-se que ambos os microrganismos apresentam potencial para o controle biológico de *Fusarium* sp., com mecanismos de ação complementares. A integração desses agentes pode representar uma estratégia promissora para o manejo sustentável de doenças, contribuindo para a redução do uso de fungicidas químicos e para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais equilibrados.

Introdução

A crescente demanda por alimentos, impulsionada pelo aumento populacional, tem levado à intensificação dos sistemas agrícolas, com práticas voltadas à proteção das colheitas e ao aumento da produtividade (FAO, 2021; Kantor *et al*., 2022). Diante das restrições sobre a expansão do uso da terra para uso agropecuário no Brasil, a ampliação da produtividade se apresenta como uma ótima saída (Saath; Fachinello, 2018). Entretanto, esse processo tem sido acompanhado pelo uso excessivo de pesticidas, especialmente agrotóxicos, associados a impactos ambientais como contaminação de águas subterrâneas, degradação do solo e redução da biodiversidade microbiana (Zhang *et al*., 2016; Gupta *et al*., 2020).

Os fungos fitopatogênicos estão entre os principais alvos desses defensivos, sendo responsáveis por grandes perdas agrícolas. O gênero *Fusarium* destaca-se por causar doenças em culturas como soja, milho, trigo, arroz, algodão, tomate e banana, afetando desde o sistema radicular até as partes aéreas das plantas, comprometendo o desenvolvimento vegetal e a produtividade (Shan *et al*., 2017; Wang *et al*., 2019). Entre essas doenças, a fusariose, causada por *Fusarium solani* f. sp. *glycines*, provoca sintomas como amarelecimento e desfolha após infecção radicular (Westhphal e*t al.*, 2008). Além disso, essas espécies podem sobreviver no solo por meio de estruturas resistentes, como clamidósporos, tolerando variações ambientais e garantindo sua persistência mesmo na ausência do hospedeiro (Zhao *et al*., 2018).

Considerando os impactos causados por *Fusarium*, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de controle. Ao longo da história, o manejo dessas doenças tem sido fundamentado na utilização de defensivos químicos, especialmente fungicidas sintéticos. No entanto, embora amplamente empregados, esses compostos podem resultar em aumento de custos, riscos ambientais e seleção de patógenos resistentes, o que limita sua eficácia a longo prazo devido aos impactos negativos associados ao seu uso contínuo. (Rakhimova *et al*., 2022; Rocha; Moura, 2013).

Frente a essas limitações, o controle biológico se apresenta como uma alternativa promissora. Essa abordagem utiliza microrganismos antagonistas capazes de inibir o desenvolvimento de fitopatógenos por meio de diferentes mecanismos, incluindo a competição por nutrientes e espaço, a produção de metabólitos antimicrobianos, o parasitismo e a indução de resistência em plantas hospedeiras (Tang *et al*., 2020; Hermosa *et al*., 2022).

Entre esses microrganismos, *Aspergillus niger* destaca-se pela produção de compostos antifúngicos e pela capacidade de competir com patógenos do solo, reduzindo o crescimento de *Fusarium* (Silva *et al*., 2022; Wang *et al*., 2023). Esse fungo

vem ganhando notoriedade como agente de biocontrole por ser capaz de produzir metabólitos como ácidos orgânicos e enzimas hidrolíticas, que contribuem diretamente para a inibição desse fitopatógeno (Spampinatto, 2021). Além disso, apresenta características favoráveis à aplicação agrícola, como rápida adaptação a diferentes condições ambientais, elevada capacidade de colonização e contribuição ao crescimento vegetal (Yin *et al.*, 2013; Zhang *et al*., 2016; Arora; Verma, 2017).

De maneira semelhante, bactérias como *Bacillus subtilis* são amplamente utilizadas no controle de doenças radiculares, atuando por meio da produção de compostos antimicrobianos e da promoção do crescimento das plantas (Li *et al*., 2013; Stein, 2005; Tan *et al*., 2013). O antagonismo microbiano ocorre principalmente pela síntese de polipeptídeos com ação antimicrobiana, bem como pela capacidade de colonização da rizosfera e pela indução de respostas de defesa nas plantas. Nesse contexto, esses organismos não apenas reduzem a ação de patógenos, mas também favorecem o desenvolvimento vegetal, tornando-se ferramentas importantes no manejo sustentável (Stein, 2005; Tan *et al*., 2013; Silva *et al*., 2004).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade antagônica de *Aspergillus niger* e a atividade antimicrobiana de *Bacillus subtilis* frente a espécies de *Fusarium*, investigando seu potencial como agentes de controle biológico no manejo da fusariose. A aplicação dessas estratégias pode contribuir para a redução do uso de insumos químicos e para a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas às demandas ambientais e aos desafios da agricultura moderna.

Material e Métodos

Os experimentos foram conduzidos no laboratório de Microbiologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão, utilizando os microrganismos *Aspergillus niger*, *Bacillus subtilis* e *Fusarium* sp. Os inóculos de *A. niger* e *B. subtilis* foram obtidos a partir de estoques puros mantidos no laboratório, sendo utilizadas as cepas ATCC 16888 e ATCC 6051, respectivamente. O fungo *Fusarium* sp. foi isolado a partir de sementes de soja contaminadas, sendo repicado sucessivamente em meio Ágar Batata Dextrose (BDA) até a obtenção de colônias com características morfofisiológicas típicas, garantindo a pureza das culturas utilizadas.

Para a preparação dos cultivos fúngicos, colônias bem desenvolvidas de *A. niger* e *Fusarium* sp., previamente cultivadas em meio BDA, foram transferidas para novas placas contendo o mesmo meio estéril, utilizando técnica de estriamento, e incubadas a 25 °C por sete dias, até a obtenção de crescimento micelial e esporulação adequados. Durante esse período, buscou-se assegurar a uniformidade do crescimento e a ausência de contaminações.

Para *B. subtilis*, colônias cultivadas em meio Ágar Triptona de Soja (TSA) foram transferidas para caldo Mueller Hinton (MHB) e incubadas a 36 °C por 24 horas, visando a obtenção de cultura ativa. Após esse período, a suspensão bacteriana foi homogeneizada e padronizada conforme a escala de McFarland 0,5, com auxílio de homogeneizador orbital, sendo posteriormente diluída em solução salina estéril a 0,85%, assegurando a uniformidade dos inóculos utilizados.

A suspensão de esporos de *A. niger* foi preparada por raspagem das colônias em solução salina 0,85%, seguida de homogeneização e contagem em câmara de Neubauer, resultando em concentração de $3,5 \times 10^7$ esporos/mL. Para os ensaios experimentais, foram utilizados volumes padronizados de inóculo (10 µL, 20 µL e 40 µL) para ambos os microrganismos antagonistas.

O inóculo de *Fusarium* sp. foi padronizado por meio da retirada de discos de micélio com aproximadamente 0,5 cm de diâmetro, obtidos de colônias previamente cultivadas por sete dias, garantindo uniformidade entre as unidades experimentais.

Os ensaios de antagonismo foram conduzidos *in vitro* com o objetivo de avaliar a capacidade de inibição do crescimento de *Fusarium* sp. pelos microrganismos antagonistas, considerando diferentes formas de interação. Para *Aspergillus niger*, foram empregados os métodos de confronto indireto e confronto direto, enquanto para *Bacillus subtilis* foram utilizados os métodos de confronto indireto, confronto direto e avaliação de metabólitos voláteis.

No método de confronto indireto (distância de 1cm), discos de *Fusarium* sp. foram posicionados a aproximadamente 0,5 cm da borda de placas contendo meio BDA, enquanto o microrganismo antagonista (*A. niger* ou *B. subtilis*) foi inoculado no lado oposto da placa, na respectiva concentração, mantendo-se a mesma distância da borda. Placas controle foram preparadas contendo apenas o patógeno e solução salina ou água destilada. Esse arranjo experimental permitiu avaliar a interação sem contato físico direto, considerando principalmente a ação de metabólitos difusíveis e a competição por nutrientes e espaço.

No confronto direto (contato físico), o antagonista (*A. niger* ou *B. subtilis*) foi distribuído sobre a superfície do meio BDA com auxílio de alça de Drigalski, utilizando os volumes de 10 µL, 20 µL e 40 µL. Em seguida, um disco de *Fusarium* sp. foi inoculado no centro da placa, permitindo a interação direta entre os microrganismos. Placas controle também foram preparadas na ausência do antagonista. Esse método possibilitou avaliar mecanismos de antagonismo dependentes de contato direto, como competição, sobreposição de crescimento e ação localizada de compostos antimicrobianos.

A avaliação de metabólitos voláteis (exposição gasosa), foi realizada exclusivamente para *Bacillus subtilis*. Para isso, placas contendo o antagonista em meio TSA e placas contendo o patógeno em meio BDA foram preparadas separadamente. Após a inoculação, as placas foram sobrepostas, de modo que suas aberturas ficassem em contato, sendo posteriormente seladas, permitindo a interação apenas por compostos voláteis, sem contato físico entre os microrganismos. As mesmas concentrações previamente definidas foram aplicadas, juntamente com os respectivos controles.

Todos os experimentos foram incubados por sete dias a 25 ± 2 °C, com fotoperíodo de 12h. As avaliações do crescimento fúngico foram realizadas nos dias 1, 4 e 7 após a inoculação, por meio de medições com régua, registrando-se o crescimento do micélio ou o diâmetro dos halos em centímetros, conforme metodologia descrita por Hendricks, Christman e Roberts (2017).

Para permitir a comparação padronizada entre os diferentes métodos de antagonismo e entre os agentes biológicos avaliados, os dados de crescimento micelial de *Fusarium* sp. foram convertidos em Porcentagem de Inibição do Crescimento

Micelial (PICM). O cálculo foi realizado a partir da relação entre o crescimento observado nas placas controle e o crescimento observado em cada tratamento, utilizando-se a Equação (01) abaixo:

$$PICM = \left(\frac{Cresc.Testemunha - Cresc.Tratamento}{Cresc.Testemunha}\right) x\ 100 \quad (01)$$

A utilização desse índice permitiu expressar de forma quantitativa a eficiência de cada microrganismo antagonista nas diferentes dosagens e metodologias empregadas, tornando possível a comparação integrada entre confronto direto, confronto indireto e metabólitos voláteis.

Após a obtenção dos percentuais, os resultados foram organizados em tabelas e representações gráficas comparativas, sendo interpretados de forma descritiva com base na tendência de inibição observada entre os tratamentos.

A partir da padronização experimental adotada para ambos os microrganismos antagonistas, os resultados foram analisados de forma conjunta, permitindo a comparação direta entre os diferentes mecanismos de antagonismo expressos por *Aspergillus niger* e *Bacillus subtilis* frente ao crescimento de *Fusarium* sp.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos nos ensaios de antagonismo *in vitro* demonstraram que o potencial de biocontrole de *Aspergillus niger* e *Bacillus subtilis* frente a *Fusarium* sp. varia significativamente em função do método de interação e da concentração dos agentes antagonistas. Para permitir uma análise comparativa padronizada, a eficiência foi expressa em Porcentagem de Inibição do Crescimento Micelial (PICM), possibilitando a integração dos resultados obtidos nos métodos de confronto direto, confronto indireto e metabólitos voláteis.

Os valores de PICM obtidos para cada tratamento estão apresentados na Tabela 01, permitindo a comparação entre os diferentes métodos e agentes biológicos. De maneira geral, observou-se tendência de aumento na inibição do fitopatógeno com o incremento da concentração dos antagonistas, com destaque para o método de confronto direto, que apresentou os maiores índices de eficiência (Figura 01).

Método de Avaliação	Agente Antagonista	10µL	20µL	30µL
Confronto direto	*Aspergillus niger*	85,93%	100%	100%
	Bacillus subtilis	52,63%	60,53%	68,42%
Confronto indireto	*Aspergillus niger*	0,00%	3,70%	7,41%
	Bacillus subtilis	0,00%	2,63%	15,79%
Metabólitos voláteis	*Bacillus subtilis*	0,00%	0,00%	5,26%

Tabela 01 - Porcentagem de Inibição do Crescimento Micelial (PICM) de *Fusarium* sp. sob ação de *Aspergillus niger* e *Bacillus subtilis* em diferentes métodos de antagonismo e dosagens de inóculo.
Fonte: Autoria Própria (2026)

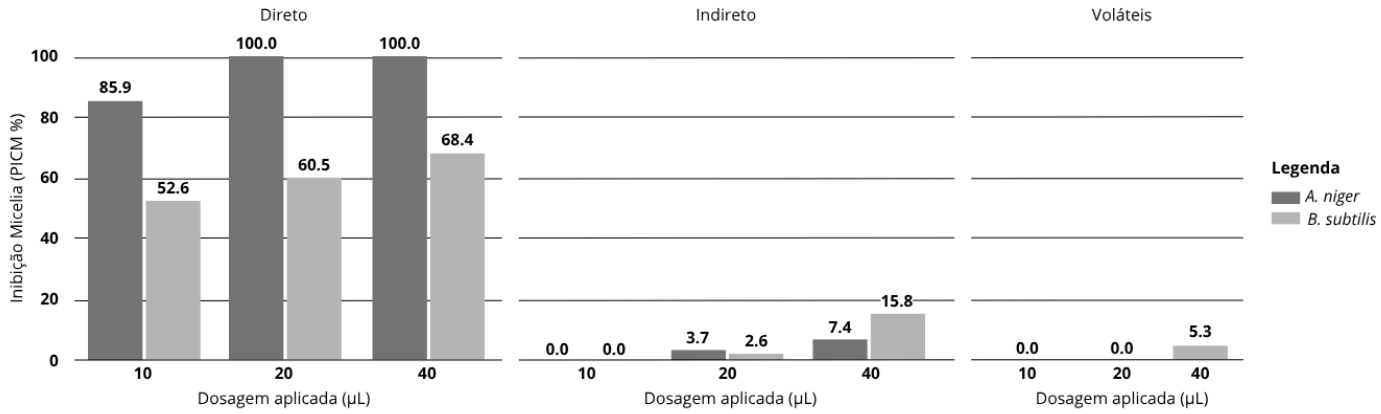


Figura 01 - Porcentagem de Inibição do Crescimento Micelial (PICM) de *Fusarium* sp. obtida nos métodos de confronto direto, confronto indireto e metabólitos voláteis, utilizando *Aspergillus niger* e *Bacillus subtilis* em dosagens de 10, 20 e 40 µL.
Fonte: Autoria Própria (2026)

No confronto direto, *Aspergillus niger* apresentou desempenho superior entre todos os tratamentos, atingindo 85,93% de inibição na menor concentração e alcançando 100% de inibição do crescimento micelial de *Fusarium* sp. nas concentrações intermediária e máxima. Esse comportamento evidencia a elevada capacidade competitiva do fungo em condições de contato físico, caracterizando um mecanismo de exclusão direta do patógeno.

Esse resultado está de acordo com a literatura, que aponta o gênero *Aspergillus* como altamente competitivo devido à sua elevada taxa de crescimento e à capacidade de modificar o microambiente por meio da produção de ácidos orgânicos, como o ácido oxálico, promovendo acidificação do meio e dificultando o estabelecimento de outros microrganismos (Zhang *et al*., 2016; Wang *et al*., 2023). Nesse contexto, o fungo atua como uma barreira física e metabólica, impedindo a colonização do substrato pelo fitopatógeno.

Para *Bacillus subtilis*, o confronto direto também demonstrou atividade antagonista relevante, com aumento progressivo da inibição em função da concentração, atingindo 68,42% na maior dosagem. Embora inferior ao observado para *A. niger*, esse desempenho indica que a bactéria também possui capacidade de antagonismo por contato, associada principalmente à produção de metabólitos antimicrobianos e à competição por espaço.

No método de confronto indireto, observou-se redução expressiva da eficiência de inibição para ambos os microrganismos, indicando que a ausência de contato físico limita a atuação antagonista. *Aspergillus niger* apresentou baixos percentuais de inibição, enquanto *Bacillus subtilis* demonstrou desempenho ligeiramente superior na maior concentração, atingindo 15,79%.

Esse comportamento sugere que *B. subtilis* apresenta maior capacidade de produzir compostos difusíveis ativos no meio de cultura. Tal característica está associada à produção de lipopeptídeos das famílias surfactina, iturina e fengicina, amplamente descritos como agentes antifúngicos capazes de causar lise celular e inibir a germinação de esporos (Yu *et al*., 2013; Bettiol; Morandi, 2009).

No método de metabólitos voláteis, avaliado exclusivamente para *Bacillus subtilis*, observou-se ausência de inibição nas menores concentrações e uma resposta discreta na maior dosagem, com 5,26% de inibição. Apesar do baixo percentual, esse resultado confirma a capacidade da bactéria de produzir compostos orgânicos voláteis (VOCs) biologicamente ativos.

De acordo com Gao *et al*. (2018), os VOCs produzidos por espécies de *Bacillus* possuem alta mobilidade no ambiente, sendo capazes de atuar à distância, permeando substratos e contribuindo tanto para a supressão de patógenos quanto para a indução de resistência sistêmica em plantas. A baixa eficiência observada neste estudo pode estar relacionada à dependência da densidade populacional bacteriana e à limitação experimental do sistema fechado utilizado.

A análise integrada dos resultados evidencia estratégias distintas de antagonismo entre os microrganismos avaliados. *Aspergillus niger* apresentou maior eficiência em condições de contato físico direto, atuando predominantemente por mecanismos de exclusão competitiva e ocupação de nicho. Por outro lado, *Bacillus subtilis* demonstrou maior versatilidade, apresentando atividade antagonista por diferentes vias, incluindo produção de metabólitos difusíveis e compostos voláteis.

Essa distinção funcional permite interpretar que, enquanto *A. niger* atua como um agente de exclusão competitiva direta, funcionando como um "escudo físico", *B. subtilis* comporta-se como uma "fábrica química", produzindo uma diversidade de compostos bioativos capazes de atuar mesmo na ausência de contato direto. Do ponto de vista aplicado, os resultados sugerem que o uso de *A. niger* pode ser mais indicado para situações que demandam rápida ocupação do nicho ecológico e supressão imediata do patógeno, enquanto *B. subtilis* pode oferecer proteção complementar por meio de mecanismos bioquímicos mais abrangentes.

A integração desses microrganismos, portanto, representa uma estratégia promissora para o manejo biológico de doenças, uma vez que combina mecanismos distintos de ação, reduzindo a probabilidade de falhas no controle e minimizando a dependência de fungicidas sintéticos. Conforme destacado por Melo e Azevedo (2008), o uso de agentes biológicos com

múltiplos modos de ação reduz a pressão de seleção para resistência, contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis. Além disso, a utilização de bioinsumos microbianos está alinhada com práticas de produção integrada, promovendo a preservação da microbiota do solo e reduzindo impactos ambientais associados ao uso de defensivos químicos (Bettiol, 2011).

Considerações Finais

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que tanto *Aspergillus niger* quanto *Bacillus subtilis* apresentam potencial como agentes de controle biológico contra *Fusarium* sp., porém com desempenhos distintos em função do mecanismo de ação e da forma de interação com o fitopatógeno.

O método de confronto direto destacou-se como o mais eficiente entre os ensaios realizados, evidenciando a elevada capacidade competitiva de *A. niger*, que alcançou inibição total do crescimento micelial de *Fusarium* sp. nas maiores concentrações testadas. Esse comportamento reforça o papel do fungo como um agente de exclusão competitiva altamente eficaz, atuando principalmente por ocupação de nicho e competição por recursos, o que o torna promissor para aplicações em ambientes onde o contato direto com o patógeno é favorecido.

Por outro lado, *Bacillus subtilis* apresentou desempenho mais versátil, demonstrando atividade antagonista não apenas em condições de contato direto, mas também por meio da produção de metabólitos difusíveis e compostos voláteis. Embora os níveis de inibição observados nesses métodos tenham sido inferiores aos do confronto direto, esses resultados evidenciam a capacidade da bactéria de atuar à distância, ampliando seu potencial de aplicação em sistemas agrícolas mais complexos, como solos estruturados e rizosfera.

A análise integrada dos resultados evidencia que os microrganismos avaliados apresentam mecanismos complementares de ação. Enquanto *A. niger* atua predominantemente como um agente de bloqueio físico e metabólico local, *B. subtilis* se destaca pela produção de compostos bioativos com maior mobilidade no ambiente. Essa complementaridade sugere que o uso combinado desses agentes pode potencializar a eficiência do controle biológico, contribuindo para estratégias mais robustas e sustentáveis no manejo de doenças causadas por *Fusarium*.

Dessa forma, o presente trabalho reforça a viabilidade do uso de microrganismos como alternativa aos fungicidas químicos, destacando sua importância na redução de impactos ambientais e no desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis. Estudos futuros são recomendados para avaliação desses agentes em condições de campo, bem como para a investigação de formulações consorciadas que explorem a sinergia entre fungos e bactérias no controle de fitopatógenos.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio em formato de bolsa às alunas, Isadora (DIREC), Andressa (DIREC) e Ana (DIRPPG).

Referências Bibliográficas

ARORA, D.; VERMA, S. Antagonistic Fungal Bioagents and Their Mechanism of Action. In: SINGH, D. P. et al. **Bioactive Compounds in Agricultural Soils**. Springer, 2017. p. 107–128.

BETTIOL, W. Biocontrole de doenças de plantas: 30 anos de pesquisas no Brasil. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, 2011.

BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, 2009.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of Food and Agriculture 2021**. Rome: FAO, 2021.

GAO, Z. et al. Volatile organic compounds produced by Bacillus subtilis CF-3 inhibit mycelial growth of Monilinia fructicola. **Food Control**, v. 84, p. 35-44, 2018.

GUPTA, R. et al. Role of microbial biocontrol agents in sustainable agriculture. **Environmental Sustainability**, 2020.
HENDRICKS, K. E.; CHRISTMAN, M. C.; ROBERTS, P. D. A statistical approach for evaluating biological control interactions. **Plant Disease**, 2017.

HERMOSA, R. et al. The dual role of fungi in the biological control of plant diseases. **Plants**, v. 11, n. 3, p. 318, 2022.

KANTOR, R. S. et al. Microbial interactions and plant health. **Annual Review of Phytopathology**, 2022.

LI, S. et al. Antagonist Bacillus subtilis HJ5 controls Verticillium wilt of cotton by root colonization and biofilm formation. **Biol Fertil Soils**, Berlim, v. 49, n. 01, p. 295-303, 2013. DOI: 10.1007/s00374-012-0718-x. Disponível em: Antagonist Bacillus subtilis HJ5 controls Verticillium wilt of cotton by root colonization and biofilm formation | SpringerLink. Acesso em: 31 mar. 2023.

MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L. Microbiologia Ambiental. 2. ed. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, 2008.

RAKHIMOVA, T. et al. Microbial antagonism and its applications in agriculture. **Microbiological Research**, 2022.

ROCHA, D. J. A.; MOURA, A. B. Controle biológico da murcha de tomateiro causada por Ralstonia solanacearum e Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici por rizobactérias. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 38, n. 5, p. 423-430, 2013.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. Piracicaba, SP: **RESR**, v. 56, n. 02, p.195-212. 2018.

SHAN, Y. et al. Antifungal activity of microbial metabolites. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2017.

SILVA, C. R. et al. Uso de microrganismos no controle de doenças de plantas. **Revista de Agricultura**, 2022.

SILVA, H. S. A. et al. Induction of systemic resistance by Bacillus cereus against tomato foliar diseases under field conditions. **Journal of Phytopathology**, Berlin, v. 152, n. 6, p. 371-375, 2004.

SPAMPINATTO, G. Soybean sudden death syndrome: fungal pathogenesis and plant response. **Plant Pathology**, Hoboken, v. 70, n. 5, p. 1103–1113, 2021.

STEIN, T. et al. Antagonistic microorganisms in agriculture. **Journal of Applied Microbiology**, 2005.

TAN, S. et al. The effect of organic acids from tomato root exudates on rhizosphere colonization of Bacillus amyloliquefaciens T-5. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 15-22, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.011

TANG, X. et al. Mechanisms of microbial antagonism in plant disease control. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 2020.

WANG, Q. et al. The production of oxalate by Aspergillus niger under different lead concentrations. **Agronomy**, v. 13, n. 4, p. 1182, 2023.

WANG, Y. et al. Mechanisms of microbial antagonism. **Frontiers in Microbiology**, 2019.

WESTHPHAL, A. et al. Sudden death syndrome of soybean. **The Plant Health Instructor**, 2008. DOI: 10.1094/PHI-I-2008-0102-01.

YIN, C. et al. Biological control of plant pathogens using microbial agents. **Frontiers in Microbiology**, 2013.

YU, G. et al. Genomic Diversity and Evolution of Bacillus subtilis. **PLOS ONE**, 2013.

ZHAO, X. et al. Biological control of fungal diseases in plants. **Plant Pathology Journal**, 2018.

ZHANG, Q. et al. Microbial biocontrol strategies in agriculture. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 2016.

DA SUSTENTABILIDADE À REGENERAÇÃO: CRITÉRIOS E PARÂMETROS PARA A CACAUICULTURA REGENERATIVA NA AMAZÔNIA

1 Andrielle Leal da Silva, 2 Wagner Luiz Ramos Barbosa, 3 Loarena Leal Cruz, 4 Raab da Silva Noleto, 5 Saullo Sandro de Campos Pereira

1 Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Universidade Federal do Pará, e-mail:eng.andriellels@gmail.com; 2 Núcleo de Meio Ambiente / Universidade Federal do Pará, e-mail: barbosa@ufpa.br; 3 Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade do Estado do Pará, e-mail: loarenacruz@gmail.com; 3 Universidade Federal Rural da Amazônia, e-mail: raab.noleto20@gmail.com. 4 Secretaria Municipal de Desenvolvimento Econômico e Trabalho do Estado de São Paulo, e-mail: saullo.s.pereira22@gmail.com.

Palavras-chave: Cacauicultura Regenerativa; sistemas socioecológicos e complexos; Índice de Regeneratividade do Cacau.

Resumo

A intensificação das mudanças climáticas e a crescente degradação ambiental na Amazônia têm evidenciado os limites dos modelos agrícolas convencionais, impulsionando a busca por sistemas produtivos mais resilientes, integrados e adaptativos. Nesse contexto, a cacauicultura destaca-se como atividade estratégica, especialmente quando associada a sistemas agroflorestais, capazes de conciliar produção, conservação da biodiversidade e geração de renda. Contudo, a transição da sustentabilidade para a regeneração ainda carece de critérios técnicos consolidados e de uma base conceitual robusta que oriente sua implementação e avaliação. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo identificar e sistematizar critérios e parâmetros para a caracterização da cacauicultura regenerativa na Amazônia, com base na análise de protocolos de agricultura regenerativa e na comparação entre os modelos convencional, sustentável e regenerativo. Metodologicamente, trata-se de uma pesquisa qualitativa, de caráter exploratório e analítico, fundamentada em revisão de literatura e análise documental de normas, indicadores e do Protocolo de Agricultura Regenerativa. A abordagem adotada é interdisciplinar e orientada pela perspectiva dos sistemas complexos, integrando dimensões ecológicas, produtivas, socioeconômicas, culturais e institucionais. Como principal resultado, o estudo propõe um conjunto estruturado de parâmetros organizados em seis dimensões interdependentes, além da criação do Índice de Regenerativdade do Cacau (IRC), instrumento capaz de mensurar o nível de regenerativdade dos sistemas produtivos. Os resultados indicam que a cacauicultura regenerativa se caracteriza pela regeneração da saúde do solo, aumento da biodiversidade, balanço positivo de carbono, conservação da água, redução de insumos externos e fortalecimento da resiliência climática e social, aliados à governança e inclusão produtiva. A aplicação simulada do IRC evidenciou sua capacidade de diferenciar níveis de transição entre sistemas produtivos. Conclui-se que a cacauicultura regenerativa deve ser compreendida como um sistema socioecológico complexo, cuja efetividade depende da integração entre práticas, protocolos e políticas públicas, configurando-se como um paradigma emergente para o desenvolvimento sustentável na Amazônia.

Introdução

A Amazônia constitui um dos mais relevantes sistemas socioecológicos do planeta, desempenhando papel central na regulação climática global, na conservação da biodiversidade e na sustentação de modos de vida de populações tradicionais. No entanto, a intensificação de pressões antrópicas, associadas à expansão de modelos agrícolas convencionais, tem contribuído para a degradação ambiental, a simplificação dos ecossistemas e o aumento da vulnerabilidade socioeconômica. Esses processos evidenciam os limites de abordagens produtivas baseadas na homogeneização e no uso intensivo de insumos externos, reforçando a necessidade de transição para modelos mais integrados e resilientes.

Sob a perspectiva dos sistemas complexos, tais dinâmicas não podem ser compreendidas de forma isolada ou linear, uma vez que envolvem múltiplas interações entre componentes ecológicos, sociais, econômicos e institucionais. Conforme argumentam Fenzl e Machado (2009, p. 32), "a sustentabilidade de sistemas complexos depende da capacidade de manter suas funções diante de múltiplas interações dinâmicas", o que exige abordagens analíticas que considerem a interdependência entre escalas e dimensões. Nesse sentido, os sistemas produtivos agrícolas devem ser interpretados como sistemas socioecológicos, nos quais práticas produtivas, organização social e processos ecológicos estão profundamente interligados.

A agricultura convencional, ao priorizar a maximização da produtividade no curto prazo, tem historicamente negligenciado essa complexidade, resultando em processos de degradação do solo, perda de biodiversidade e aumento das emissões de gases de efeito estufa. Em resposta a essas limitações, a agricultura sustentável emerge como uma tentativa de mitigar impactos negativos, incorporando práticas conservacionistas e maior eficiência no uso de recursos. No entanto, essa abordagem, em muitos casos, mantém a lógica produtivista, não sendo suficiente para reverter os passivos ambientais acumulados.

Mais recentemente, a agricultura regenerativa tem se consolidado como um paradigma emergente, ao propor não apenas a mitigação de impactos, mas a restauração ativa dos processos ecológicos. Essa abordagem busca promover a saúde do solo, a biodiversidade, o sequestro de carbono e a resiliência dos sistemas produtivos, articulando dimensões ecológicas e socioeconômicas. Nesse contexto, a necessidade de instrumentos que orientem e mensurem a transição para sistemas regenerativos torna-se central. Como destacado por Mangabeira et al. (2025, p. 4), torna-se essencial estabelecer critérios, indicadores e índices capazes de avaliar o nível de transição para sistemas regenerativos.

A importância dessa abordagem reside no fato de que avaliações convencionais, baseadas em indicadores isolados, são insuficientes para capturar a complexidade dos sistemas produtivos. Segundo Mangabeira et al. (2025, p. 5), "a caracterização de sistemas de produção de forma convencional tem se limitado à escala da propriedade rural, sem enfoque sistêmico e sem considerar as dimensões territoriais e geoespaciais". Dessa forma, a adoção de metodologias multicritério torna-se fundamental para integrar diferentes dimensões ambiental, econômica, social e de governança na avaliação da sustentabilidade e regenerativiade.

No contexto amazônico, a cacauicultura apresenta-se como uma atividade estratégica para essa transição, especialmente quando associada a sistemas agroflorestais. Esses sistemas, ao integrarem diversidade de espécies e funções ecológicas, permitem conciliar produção agrícola com restauração ambiental. No entanto, a consolidação da chamada cacauicultura regenerativa ainda enfrenta desafios conceituais e operacionais, sobretudo no que se refere à definição de critérios claros que permitam distinguir práticas regenerativas de abordagens meramente sustentáveis.

Além disso, a incorporação de protocolos de agricultura regenerativa evidencia a necessidade de mensuração e monitoramento contínuo dos sistemas produtivos. Conforme destacam Mangabeira et al. (2025, p. 6), "os indicadores são instrumentos que permitem quantificar e qualificar fenômenos complexos, tornando-os compreensíveis e passíveis de monitoramento ao longo do tempo". Essa capacidade de mensuração é fundamental para orientar políticas públicas, investimentos e estratégias de desenvolvimento territorial.

Diante desse cenário, torna-se evidente que a cacauicultura regenerativa deve ser compreendida não apenas como um conjunto de práticas agrícolas, mas como um sistema socioecológico complexo, no qual a regeneração ambiental, a resiliência climática e a inclusão socioeconômica estão interdependentes. Assim, este estudo parte do pressuposto de que a transição da sustentabilidade para a regeneração implica uma mudança paradigmática, baseada na integração entre ciência, práticas produtivas e instrumentos de governança, com potencial para redefinir os rumos do desenvolvimento agrícola na Amazônia.

Material e Métodos

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza exploratória e analítica, fundamentada em revisão bibliográfica e análise documental de protocolos de agricultura regenerativa. A abordagem metodológica está ancorada na integração entre os referenciais de sistemas complexos e sistemas socioecológicos, permitindo compreender a cacauicultura regenerativa como um sistema dinâmico, adaptativo e multiescalar.

A perspectiva dos sistemas complexos orienta a análise ao reconhecer que os sistemas produtivos agrícolas são compostos por múltiplos elementos interdependentes, cujas interações não lineares produzem comportamentos emergentes. Conforme destacam Fenzl e Machado (2009, p. 32), a sustentabilidade depende da capacidade desses sistemas de manter suas funções diante de interações dinâmicas, o que exige abordagens que integrem diferentes dimensões e escalas. Complementarmente, a abordagem de sistemas socioecológicos permite compreender a inseparabilidade entre componentes ecológicos e sociais, reconhecendo que práticas produtivas, organização social e governança territorial constituem um único sistema integrado.

Nesse contexto, o procedimento metodológico central consistiu na análise do Protocolo de Agricultura Regenerativa Sustentável, que propõe uma estrutura de avaliação baseada em critérios, indicadores e índices agregados para mensuração do nível de regenerativiade dos sistemas produtivos. De acordo com Mangabeira et al. (2025), a avaliação da sustentabilidade e da regenerativiade requer metodologias multicritério capazes de integrar dimensões ambientais, econômicas, sociais e institucionais, superando abordagens convencionais baseadas em análises isoladas.

A partir desse referencial, os critérios foram organizados em seis dimensões estruturais interdependentes: (i) ambiental, (ii) produtiva, (iii) biodiversidade, (iv) socioeconômica, (v) governança e (vi) cultural. Essa estrutura reflete a natureza sistêmica dos agroecossistemas e sua inserção em contextos territoriais mais amplos, permitindo analisar simultaneamente processos ecológicos, dinâmicas produtivas e relações sociais.

Essas dimensões são operacionalizadas por meio de práticas regenerativas, tais como manejo da cobertura do solo, incremento da matéria orgânica, diversificação de espécies, integração de sistemas agroflorestais, sequestro de carbono e redução do uso de insumos externos. Tais práticas constituem elementos-chave para a ativação de processos ecológicos e para o fortalecimento da resiliência dos sistemas produtivos, sendo traduzidas em indicadores qualitativos e quantitativos.

A utilização de critérios e indicadores segue uma abordagem multicritério, na qual diferentes variáveis são integradas para representar a complexidade dos sistemas analisados. Conforme Mangabeira et al. (2025, p. 5), "a avaliação baseada em múltiplos critérios permite integrar dimensões diversas e construir índices capazes de representar o desempenho de sistemas complexos". Nesse sentido, os indicadores foram utilizados como instrumentos de síntese, capazes de traduzir fenômenos complexos em métricas comparáveis, facilitando a análise do nível de regenerativiade.

Por fim, os dados foram analisados por meio de interpretação qualitativa e análise comparativa entre modelos produtivos o convencional, o sustentável, o regenerativo (mais holístico), com o objetivo de identificar os parâmetros que caracterizam a cacauicultura regenerativa enquanto sistema socioecológico complexo**.** Essa integração metodológica permite não apenas avaliar práticas produtivas, mas compreender os processos de transição e transformação dos sistemas agrícolas na Amazônia.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciam que a caracterização da cacauicultura regenerativa não pode ser reduzida a um conjunto isolado de práticas, mas deve ser compreendida como a expressão de um sistema socioecológico complexo, no qual interagem

dimensões ecológicas, produtivas, sociais e institucionais. Essa abordagem dialoga diretamente com a perspectiva de sistemas complexos, segundo a qual o comportamento do sistema emerge das interações entre seus componentes, e não de elementos isolados (FENZL; MACHADO, 2009).

A partir da análise dos protocolos de agricultura regenerativa, foi possível sistematizar um conjunto de parâmetros organizados em seis dimensões estruturais interdependentes: ambiental, produtiva, biodiversidade, socioeconômica, governança e cultural. Esses parâmetros refletem a necessidade de uma avaliação multicritério, capaz de capturar a complexidade dos agroecossistemas amazônicos (MANGABEIRA et al., 2025).

Tabela-síntese dos parâmetros da cacauicultura regenerativa

Dimensão	Parâmetros	Indicadores	Base teórica (ABNT)
Ambiental	Saúde do solo	Matéria orgânica (%), cobertura do solo, atividade biológica	IMAFLORA (2023); MANGABEIRA et al. (2025)
	Água	Infiltração, retenção hídrica, erosão	EMBRAPA (2022)
Biodiversidade	Diversidade funcional	Nº de espécies (fauna e flora), estratificação vegetal	EMBRAPA (2022); IMAFLORA (2023), MANGABEIRA et al. (2025)
Produtiva/ Agropecuária	Sistema agroflorestal	Diversificação de cultivos, consórcios	EMBRAPA (2022), MANGABEIRA et al. (2025)
	Insumos	Redução de insumos externos (%), utilização de bioinsumos	IMAFLORA (2023), MANGABEIRA et al. (2025)
Climática	Carbono	Estoque de carbono (t/ha), emissões evitadas	RAINFOREST ALLIANCE (2021), MANGABEIRA et al. (2025)
Socioeconômica	Inclusão produtiva	Renda, participação familiar, segurança alimentar, sucessão familiar	BRASIL (2024), MANGABEIRA et al. (2025)
Governança	Monitoramento	Adoção de protocolos, certificações	RAINFOREST ALLIANCE (2021)
Cultural	Saberes locais	Uso de práticas tradicionais, diversidade cultural	MANGABEIRA et al. (2025)

Essa sistematização demonstra que a regenerativide emerge da integração entre dimensões, e não da adoção isolada de práticas. Nesse sentido, a cacauicultura regenerativa deve ser interpretada como um sistema adaptativo, capaz de reorganizar seus processos internos frente a perturbações, característica típica de sistemas complexos.

Integração com sistemas socioecológicos e complexos

A análise dos resultados permite compreender a cacauicultura regenerativa como um sistema socioecológico complexo (SEC), no qual componentes ecológicos e sociais não apenas coexistem, mas co-evoluem de forma dinâmica, interdependente e não linear. Sistemas socioecológicos complexos podem ser definidos como arranjos integrados em que processos biofísicos (como ciclos de nutrientes, biodiversidade e clima) e processos sociais (como organização produtiva, governança e cultura) interagem continuamente, produzindo comportamentos emergentes, adaptação e resiliência ao longo do tempo.

Diferentemente de abordagens reducionistas, que analisam isoladamente variáveis produtivas ou ambientais, a perspectiva de sistemas complexos reconhece que o funcionamento do sistema resulta das interações entre suas partes, e não apenas da soma delas. Nesse sentido, a regenerativide não é uma característica intrínseca a práticas específicas, mas uma propriedade emergente, resultante da qualidade e intensidade das interações entre múltiplas dimensões.

Na cacauicultura regenerativa, essas interações podem ser compreendidas a partir de seis dimensões estruturais:

1. Dimensão ambiental - Responsável pela base biofísica do sistema, envolvendo solo, água e ciclos ecológicos. A regeneração do solo, por exemplo, influencia diretamente a produtividade e a biodiversidade.

2. Dimensão produtiva - Refere-se à organização do sistema agrícola, especialmente à adoção de sistemas agroflorestais. A diversificação produtiva reduz riscos e aumenta a resiliência.

3. Dimensão da biodiversidade - Relaciona-se à diversidade de espécies e funções ecológicas, sendo fundamental para o equilíbrio do sistema e para a regulação natural de pragas, fertilidade e microclima.

4. Dimensão socioeconômica - Inclui geração de renda, segurança alimentar e inclusão produtiva. Sistemas mais diversificados tendem a oferecer maior estabilidade econômica.

5. Dimensão de governança - Abrange mecanismos institucionais, políticas públicas, certificações e monitoramento, sendo essencial para a coordenação e sustentabilidade do sistema no longo prazo.

6. Dimensão cultural - Envolve saberes tradicionais, práticas locais e relações simbólicas com o território, desempenhando papel central na adaptação e continuidade dos sistemas produtivos.

Nesse contexto, as Interações sistêmicas quanto a regenerativide emerge da interação entre essas dimensões. Exemplos dessas interações incluem:

- **Ambiental ↔ Produtiva**: solos saudáveis aumentam produtividade, enquanto sistemas agroflorestais regeneram o solo.

- **Biodiversidade ↔ Climática/Ambiental**: maior diversidade melhora ciclagem de nutrientes e resiliência climática.
- **Socioeconômica ↔ Produtiva**: diversificação reduz vulnerabilidade económica.
- **Governança ↔ Todas as dimensões**: regula, incentiva e monitora práticas regenerativas.
- **Cultural ↔ Produtiva/Ambiental**: saberes tradicionais orientam práticas sustentáveis adaptadas ao territorio.

Essas interações são não lineares e retroalimentadas (feedback loops)**,** característica central de sistemas complexos. Pequenas mudanças em uma dimensão podem gerar impactos significativos em todo o sistema. Conforme argumentam Fenzl e Machado (2009, p. 45), "a compreensão da sustentabilidade exige a integração de múltiplas dimensões em sistemas complexos", reforçando que abordagens fragmentadas são insuficientes para compreender e promover a regeneração.

A inclusão da dimensão cultural amplia significativamente essa análise, ao reconhecer que os sistemas produtivos não são apenas técnicos, mas também sistemas de conhecimento e identidade**,** nos quais os saberes tradicionais desempenham papel fundamental na construção da resiliência socioecológica.

A figura 1 representa a cacauicultura regenerativa como um sistema central, sustentado por seis dimensões interdependentes. As setas indicam fluxos de interação e retroalimentação, evidenciando que não há hierarquia rígida entre dimensões, o sistema funciona por integração e interdependência e que a regeneratividade emerge do equilíbrio dinâmico.

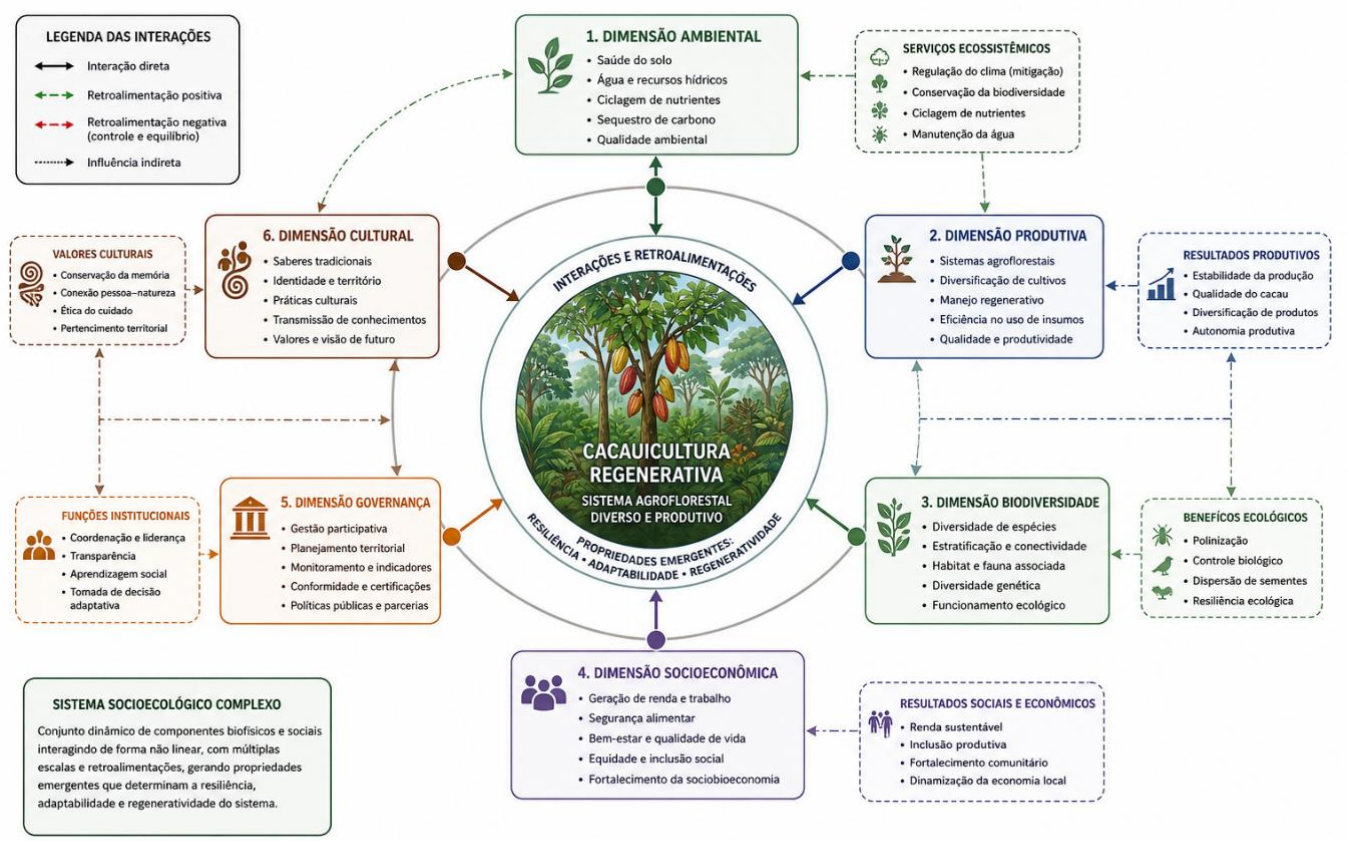


Figura – Representação sistêmica da cacauicultura regenerativa como sistema socioecológico complexo.

Da sustentabilidade à regeneração: uma transição socioecológica em perspectiva complexa.

A análise comparativa dos sistemas agrícolas evidência não apenas diferenças técnicas, mas uma mudança paradigmática na forma de compreender e intervir nos agroecossistemas**.** Historicamente, a agricultura convencional consolidou-se a partir de uma lógica produtivista, orientada pela maximização de rendimentos e pela simplificação dos sistemas, com base em monoculturas e uso intensivo de insumos externos. Esse modelo, embora eficiente no curto prazo, promove processos de degradação ecológica, perda de biodiversidade e crescente vulnerabilidade socioeconômica.

Como resposta a essas limitações, emerge a agricultura sustentável, que busca mitigar impactos negativos por meio de práticas conservacionistas, maior eficiência no uso de recursos e incorporação de princípios ambientais. No entanto, essa abordagem, em muitos casos, mantém a lógica estrutural do sistema convencional, operando ajustes incrementais sem alterar profundamente as relações entre sociedade e natureza. Ou seja, trata-se frequentemente de uma sustentabilidade fraca, centrada na redução de danos, mas não necessariamente na reversão dos passivos ambientais.

A agricultura regenerativa, por sua vez, representa um avanço qualitativo ao propor a restauração ativa dos processos ecológicos, incluindo a regeneração da saúde do solo, o aumento da biodiversidade, o sequestro de carbono e o fortalecimento da resiliência climática. Mais do que conservar, busca-se reconstruir a funcionalidade dos sistemas, promovendo ciclos

ecológicos mais complexos e integrados. Nesse sentido, a regeneração não se limita ao componente biofísico, mas incorpora dimensões sociais, econômicas e territoriais, aproximando-se de uma abordagem sistêmica.

Essa trajetória, do convencional ao sustentável e ao regenerativo pode ser compreendida como uma transição socioecológica, na qual se reconfiguram simultaneamente práticas produtivas, formas de organização social e modos de relação com o território. Tal transição exige superar abordagens fragmentadas e setoriais, adotando uma visão integrada dos sistemas. Como propõe Edgar Morin, "o conhecimento pertinente é aquele capaz de situar qualquer informação em seu contexto e, se possível, no conjunto em que está inscrita", o que implica reconhecer a interdependência entre partes e totalidade.

A partir dessa perspectiva, torna-se evidente que a análise da agricultura não pode ser reduzida a variáveis isoladas como produtividade, uso de insumos ou conservação ambiental, mas deve considerar a complexidade das interações entre dimensões ecológicas, sociais, culturais e institucionais. A fragmentação do conhecimento, típica de abordagens reducionistas, limita a compreensão dos processos de degradação e regeneração, dificultando a construção de soluções efetivas.

Nesse contexto, a cacauicultura regenerativa emerge como uma expressão concreta dessa mudança paradigmática. Ao integrar sistemas agroflorestais, diversidade biológica, práticas culturais e organização social, ela configura-se como um sistema socioecológico complexo, no qual a regeneração ambiental está diretamente associada à inclusão produtiva e ao fortalecimento territorial. Diferentemente de modelos convencionais ou mesmo sustentáveis, a cacauicultura regenerativa opera a partir da lógica da integração e da coevolução entre sociedade e natureza, promovendo múltiplos benefícios simultâneos.

Além disso, essa abordagem se articula com a sociobioeconomia, ao associar a geração de valor econômico à conservação da biodiversidade e ao reconhecimento dos saberes locais. Conforme destacado pelo BRASIL (2024), a sociobioeconomia envolve estratégias de desenvolvimento que integram uso sustentável dos recursos naturais e valorização das comunidades, reforçando a dimensão territorial da sustentabilidade.

Portanto, a transição para a cacauicultura regenerativa não representa apenas uma mudança técnica, mas uma transformação epistemológica e prática, que exige a incorporação do pensamento complexo, a integração de múltiplas escalas e a articulação entre conhecimento científico e saberes tradicionais. Trata-se de um movimento que redefine o papel da agricultura na Amazônia, deslocando-a de um vetor de degradação para um agente ativo de regeneração socioecológica e climática.

Índice de Regeneratividade do Cacau (IRC): fundamentos conceituais e aplicação.

O Índice de Regeneratividade do Cacau (IRC) é proposto como um instrumento analítico e operacional destinado a mensurar o grau de regeneratividade de sistemas de cacauicultura, a partir de uma abordagem multidimensional, sistêmica e integradora. Diferentemente de indicadores tradicionais, que avaliam aspectos isolados (como produtividade ou conservação do solo), o IRC busca capturar a complexidade inerente aos sistemas socioecológicos, considerando simultaneamente dimensões ecológicas, produtivas, sociais, institucionais e culturais.

Sob a perspectiva dos sistemas complexos, a regeneratividade não pode ser reduzida a uma variável única, pois constitui uma propriedade emergente, resultante das interações entre diferentes componentes do sistema (FENZL; MACHADO, 2009). Nesse sentido, o IRC não mede apenas o desempenho de práticas específicas, mas o grau de integração funcional entre dimensões estruturais, refletindo a capacidade do sistema de se regenerar, adaptar-se e manter suas funções ao longo do tempo.

O índice fundamenta-se em seis dimensões interdependentes:

- **Ambiental (A)** – saúde do solo, água e ciclos ecológicos
- **Produtiva (P)** – organização do sistema agroflorestal e eficiência
- **Biodiversidade (B)** – diversidade funcional e estrutural
- **Socioeconômica (S)** – inclusão produtiva, renda e segurança alimentar
- **Governança (G)** – monitoramento, políticas e conformidade
- **Cultural (C)** – saberes tradicionais e relação com o território

A escolha dessas dimensões reflete a necessidade de superar abordagens fragmentadas, incorporando uma visão integrada, conforme defendido pelo pensamento complexo de Edgar Morin, segundo o qual os sistemas devem ser compreendidos a partir da inter-relação entre suas partes e o todo.

Estrutura metodológica do índice

O IRC é calculado a partir da média aritmética simples das seis dimensões:

$$\boldsymbol{IRC = (A + P + B + S + G + C)/6}$$

Cada dimensão é composta por um conjunto de indicadores específicos, avaliados em uma escala de **0 a 10**, permitindo padronização e comparabilidade entre sistemas.

No entanto, é importante destacar que, embora a fórmula utilize média simples, o índice possui **natureza** não linear em sua interpretação, pois as dimensões são interdependentes. Assim, baixos valores em uma dimensão crítica (por exemplo, biodiversidade) podem comprometer o desempenho global do sistema, mesmo que outras dimensões apresentem bons resultados.

Aplicação do IRC: simulação de cenários

Para avaliar a aplicabilidade do índice, foram simulados três cenários representativos de sistemas produtivos:

- Sistema A – Convencional
- Sistema B – Sustentável
- Sistema C – Regenerativo

Resultados simulados

Dimensão	Convencional	Sustentável	Regenerativo
Ambiental	2,5	5,5	8,5
Produtiva	4,0	6,0	8,0
Biodiversidade	1,5	5,0	9,0
Socioeconômica	3,0	6,5	8,5
Governança	2,0	5,5	8,0
Cultural	2,5	6,0	8,5
IRC final	**2,6**	**5,8**	**8,4**

Interpretação analítica dos resultados

Os resultados evidenciam padrões distintos de organização sistêmica:

Sistema A (Convencional – IRC: 2,6)

Caracteriza-se por baixa integração entre dimensões, forte dependência de insumos externos e simplificação ecológica. A baixa biodiversidade compromete a resiliência do sistema, refletindo um estado de baixa complexidade funcional.

Sistema B (Sustentável – IRC: 5,8)

Apresenta avanços importantes, especialmente na gestão de recursos e inclusão socioeconômica. No entanto, ainda opera com limitações estruturais, não atingindo níveis elevados de regeneração. Trata-se de um sistema em transição socioecológica, com ganhos incrementais.

Sistema C (Regenerativo – IRC: 8,4)

Demonstra alta integração entre dimensões, com forte presença de sistemas agroflorestais, diversidade biológica e governança estruturada. Esse sistema apresenta alta complexidade adaptativa, com capacidade de autorregulação e resiliência.

Implicações metodológicas e aplicadas

O IRC apresenta potencial como ferramenta para monitoramento de sistemas produtivos, avaliação de políticas públicas, certificação de práticas regenerativas, tomada de decisão em investimentos sustentáveis. Além disso, permite integrar dimensões frequentemente negligenciadas, como cultura e governança, ampliando a compreensão da sustentabilidade

Considerações Finais

Os resultados deste estudo reforçam que a transição da sustentabilidade para a regeneração na agricultura, especialmente no contexto da cacauicultura amazônica, não pode ser compreendida a partir de abordagens simplificadas ou fragmentadas. Ao contrário, evidencia-se a necessidade de uma análise sistêmica e complexa, capaz de integrar dimensões ecológicas, produtivas, socioeconômicas, institucionais e culturais. Nesse sentido, a cacauicultura regenerativa consolida-se como um sistema socioecológico complexo, no qual a regeneratividade emerge da interação dinâmica e não linear entre múltiplos componentes.

A adoção da perspectiva dos sistemas complexos mostrou-se fundamental para compreender que a sustentabilidade e, sobretudo, a regeneração, ou seja, não se reduz à soma de práticas isoladas, mas depende da qualidade das interações, das retroalimentações e da capacidade adaptativa do sistema. Assim, a regeneratividade deve ser entendida como uma propriedade emergente, diretamente relacionada ao grau de integração entre as dimensões analisadas.

Nesse contexto, a proposição do Índice de Regeneratividade do Cacau (IRC) representa uma contribuição relevante tanto do ponto de vista teórico quanto metodológico. O IRC permite operacionalizar um conceito complexo e ainda em consolidação, transformando-o em um instrumento mensurável, comparável e aplicável à realidade dos sistemas produtivos. Ao incorporar seis dimensões estruturais ambiental, produtiva, biodiversidade, socioeconômica, governança e cultural, o índice amplia significativamente o escopo das avaliações tradicionais, geralmente limitadas a aspectos biofísicos ou produtivos.

A aplicação do IRC por meio de cenários simulados demonstrou sua capacidade de diferenciar níveis de organização e complexidade dos sistemas agrícolas, evidenciando padrões consistentes entre sistemas convencionais, sustentáveis e regenerativos. Os resultados indicaram que sistemas com maior diversidade, integração e governança apresentam níveis mais elevados de regeneratividade, reforçando a hipótese de que a transição socioecológica depende da articulação entre múltiplas dimensões.

Além disso, a simulação do índice revelou seu potencial como ferramenta para análise prospectiva e apoio à tomada de decisão, podendo ser utilizado no monitoramento de políticas públicas, na certificação de sistemas produtivos e na orientação de investimentos voltados à sociobioeconomia. Sua estrutura multicritério permite capturar a complexidade dos sistemas reais, ao mesmo tempo em que oferece uma métrica sintética capaz de facilitar a comunicação entre diferentes atores pesquisadores, gestores públicos e produtores.

Entretanto, destaca-se que o IRC, tal como proposto neste estudo, constitui um modelo inicial que requer validação empírica em campo, por meio da aplicação em diferentes contextos produtivos e territoriais. A incorporação de métodos estatísticos, como análises fatoriais e modelagens multivariadas, poderá contribuir para o refinamento dos indicadores, a

definição de pesos e a verificação da robustez do índice. Nesse sentido, a validação científica do IRC representa um passo fundamental para sua consolidação como ferramenta de uso amplo.

Por fim, este estudo contribui para o avanço do debate sobre agricultura regenerativa ao propor uma abordagem integrada, baseada no pensamento complexo, e ao oferecer um instrumento inovador para sua mensuração. A cacauicultura regenerativa, nesse contexto, emerge não apenas como uma alternativa produtiva, mas como um paradigma de desenvolvimento territorial, capaz de articular conservação ambiental, resiliência climática, inclusão social e valorização dos saberes locais.

Dessa forma, conclui-se que o fortalecimento de sistemas regenerativos na Amazônia depende da integração entre ciência, práticas produtivas e políticas públicas, sendo o IRC uma ferramenta promissora para apoiar essa transição. Ao incorporar a complexidade como princípio analítico, abre-se caminho para uma nova forma de pensar e implementar o desenvolvimento rural, orientada não apenas pela sustentabilidade, mas pela capacidade de regenerar sistemas socioecológicos em sua totalidade.

Comentários finais

Este trabalho evidenciou que a cacauicultura regenerativa deve ser compreendida como um sistema socioecológico complexo, no qual a regeneração resulta da interação entre dimensões ambientais, produtivas, de biodiversidade, socioeconômicas, de governança e culturais. A análise demonstrou que a transição da agricultura convencional para a regenerativa representa uma mudança paradigmática, superando a lógica de mitigação de impactos e incorporando a restauração ativa dos processos ecológicos associada ao fortalecimento das dinâmicas sociais e territoriais.

Outro ponto central foi a sistematização de critérios e parâmetros organizados em seis dimensões interdependentes, permitindo uma abordagem mais integrada dos sistemas produtivos. Nesse contexto, destaca-se a proposição do Índice de Regeneratividade do Cacau (IRC) como uma contribuição inovadora, capaz de traduzir a complexidade da regenerativade em uma métrica operacional. A simulação do índice evidenciou diferenças claras entre sistemas convencionais, sustentáveis e regenerativos, indicando maior desempenho e resiliência nos sistemas com maior nível de integração.

Por fim, conclui-se que o avanço da cacauicultura regenerativa na Amazônia depende da articulação entre ciência, saberes tradicionais e políticas públicas, bem como da validação empírica de instrumentos como o IRC. Assim, o estudo contribui ao oferecer bases conceituais e metodológicas para orientar a transição socioecológica, destacando o potencial da cacauicultura regenerativa como estratégia para promover desenvolvimento sustentável, conservação ambiental e inclusão social na região.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Cacau regenerativo*. Brasília: MAPA/CEPLAC, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/publicacoes/folders/CACAURegenerativa.pdf. Acesso em: 17 de fevereiro de 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. *Plano Amazônia + Sustentável*. Brasília: MMA, 2024.

EMBRAPA. *Sistemas agroflorestais na Amazônia: fundamentos e aplicações*. Brasília: EMBRAPA, 2022.

FENZL, Norbert; MACHADO, José Alberto Costa. *A sustentabilidade de sistemas complexos*. 1. ed. Belém: NUMA/UFPA, 2009.

IMAFLORA. *Protocolo de agricultura regenerativa sustentável*. Piracicaba: Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola, 2023.

MANGABEIRA, João Alfredo de Carvalho et al. *Protocolo de agricultura regenerativa sustentável: critérios, indicadores e índices para avaliação de sistemas produtivos*. Brasília: EMBRAPA, 2025.

RAINFOREST ALLIANCE. *Regenerative agriculture framework*. New York: Rainforest Alliance, 2021.

ESTUDOS CIENTÍFICOS DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

1 Marhia Vithória Dineli da Silva de Holanda Bessa, 2 Lucas Dilan Martins Corrêa, 3 Lucas Covre Chiari, 4 Samara Carbone

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: marhia.bessa@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: lucasdilan2020@gmail.com; 3 Universidade de São Paulo, e-mail: lucas.chiari@usp.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: samara.carbone@ufu.br.

Palavras-chave: Sistemas Agroflorestais; Brasil; Revisão Sistemática.

Resumo

A produção global de alimento vem enfrentando desafios para a superação dos efeitos negativos da agricultura moderna e das pressões das mudanças climáticas. Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) apresentam-se como uma solução regenerativa e resiliente, caracterizados pela associação e interação entre componentes agrícolas, florestais e, eventualmente, animais em uma mesma área de cultivo. Os SAFs favorecem a formação de microclimas locais e aumentam a diversificação produtiva, por isso, estão tornando-se alvo de novos estudos. Nesse contexto, a presente revisão sistemática tem como objetivo identificar as temáticas mais estudadas sobre SAFs no Brasil, por meio dos artigos publicados todos os anos na base de dados *Web Of Science*. Os 73 artigos foram automatizados no *software* RStudio, por meio de *scripts* na linguagem R e analisados com gráficos e informações produzidos pelo *softaware bibliometrix* (versão biblioshiny 5.0). Os resultados encontrados identificaram 3 (três) sistemas (Integração Pecuária- Floreta (IPF), sistema agrossilviopastoril e consórcio entre espécies de interesse comercial e arbóreas) e 2 (duas) espécies (café e cacau) principais como alvo dos estudos já realizados.

Introdução

A produção global de alimentos vem passando por uma ampla reestruturação operacional e paradigmática, orientada tanto à superação dos efeitos negativos da agricultura moderna, como a contaminação de alimentos e recursos naturais pelo uso excessivo de pesticidas (CARNEIRO, 2015), quanto à adequação dos sistemas produtivos às pressões impostas pelas mudanças climáticas.

Diante desse cenário, a necessidade de conciliar soberania e segurança alimentar, conservação ambiental e viabilidade econômica fez com que os conceitos de inovação, resiliência e sustentabilidade se consolidassem como eixos estruturantes para o enfrentamento das crises climática e socioeconômica. Tais eixos impulsionam a busca por práticas regenerativas capazes de restaurar ecossistemas, mitigar emissões de carbono e gerar renda estável no campo. Nesse sentido, a agroecologia tem prestado valiosa contribuição ao enfrentar o modelo produtivo hegemônico e ao apresentar, em suas vertentes, os Sistemas Agroflorestais (FONINI, 2012).

Neste contexto, segundo Altieri (2012), os Sistemas Agroflorestais (SAFs) emergem como uma solução regenerativa e resiliente, caracterizando-se pela associação e interação entre componentes agrícolas, florestais e, eventualmente, animais em uma mesma área de cultivo. Esses sistemas favorecem a formação de microclimas locais benéficos para a produção de alimentos cultivados em consórcio com árvores e fortalecem a segurança socioeconômica dos agricultores por meio da diversificação produtiva (KANDJI et al., 2006).

Dados globais indicam expressiva expansão dos SAFs: entre 2000 e 2010, a área ocupada atingiu cerca de um bilhão de hectares, envolvendo aproximadamente 900 milhões de agricultores (ZOMER et al., 2014). No Brasil, entre 2006 e 2017, a área ocupada por SAFs cresceu, tendo o Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono) como principal indutor por meio de linhas de crédito com juros reduzidos (MAIA et al., 2021). Atualmente, esses sistemas estão presentes em cerca de 52 mil propriedades no bioma Cerrado (IBGE, 2017).

Contudo, nem todos os SAFs apresentam o mesmo desempenho ecológico e produtivo. Santos et al. (2018) propuseram uma categorização que os diferencia em simples (menos de cinco espécies, baixa estratificação, ausência de planejamento baseado na sucessão ecológica) ou biodiversos (mais de cinco espécies, três ou mais camadas, uso de espécies nativas e planejamento sucessional). Os SAFs biodiversos, também conhecidos como agroflorestas sucessionais (MICCOLIS et al., 2016), obtiveram melhores resultados em biodiversidade e serviços ecossistêmicos de provisão, regulação e suporte, quando comparados aos SAFs simples e à agricultura convencional (SANTOS et al., 2018).

Conforme Padovan (2018), a produção de alimentos em sistemas agroflorestais biodiversos configura-se como estratégia valiosa para garantir a segurança alimentar e nutricional das famílias, bem como para a conservação e melhoria dos recursos naturais, fortalecendo a agricultura familiar no caminho da sustentabilidade. Adicionalmente, a reduzida utilização de insumos externos nos SAFs é viabilizada pela otimização dos recursos internos do agroecossistema (FREDERICO; MORAL, 2022). Dessa forma, o ser humano otimiza os recursos ecológicos e, ao mesmo tempo, concilia suas necessidades materiais com a recuperação de áreas degradadas, reconstruindo a relação entre ser humano e natureza (PASINI, 2017).

Diante disso, com a presente preocupação sobre o desenvolvimento de estudos de manejos agroflorestais no Brasil, foi realizada uma revisão sistemática, que tem como objetivo identificar as temáticas mais estudadas sobre SAFs no Brasil, por meio dos artigos publicados na base de dados *Web Of Science*.

Material e Métodos

A metodologia adotada para a revisão sistemática estrutura-se em três fases: (i) Escolha da base de dados e das palavras de busca relacionadas ao tema de estudo; (ii) Exportação dos dados encontrados e escolha do software para análise dos resultados; e (iii) Produção de gráficos com análise dos resultados e leitura dos artigos para discussão.

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura em busca de estudos que relacionam técnicas agroflorestais com os impactos das mudanças climáticas no Brasil. A busca foi conduzida na base de dados *Web of Science Core Collection*, por artigos publicados todos os anos. O filtro *topic* foi adicionado, pesquisando por título, resumo, palavras-chave do autor e palavra-chave adicional. As estratégias de busca foram as palavras-chave "agroflorestal", "mudanças climáticas" e "Brasil" em inglês, respectivamente, da seguinte forma: "*agroforestry*" *AND* "*climate change*" *AND* "*Bra?il*", o operador *AND* foi adicionado para que fossem encontrados artigos que relacionam as palavras escolhidas e o caractere "?" para incluir "Brasil" e "*Brazil*".

Encontrou-se 84 trabalhos que foram exportados com as informações completas no formato BibTeX (.bib) e adicionados a uma pasta na área de arquivos. Os artigos baixados foram automatizados no *software* RStudio, por meio de *scripts* na linguagem R. Adicionou-se os pacotes "*library(bibliometrix)*" e "*library(bibliometrixData)*" no projeto, e no painel de origem *scripts* para converter os arquivos para o formato bibtex compatível com o programa. Os arquivos foram salvos no ambiente de trabalho com 84 observações e 57 variáveis, as observações correspondem a quantidade de artigos e as variáveis a quantidade de informações de cada trabalho. Com os dados no modelo adequado na área de trabalho, adicionou-se o *script* "*library(openxlsx)*" e o comando para tabelar todas as informações no Excel.

Na planilha, a coluna DI (*Digital Object Identifier*) foi selecionada, e com o comando de realce de células de mesmo valor foi verificado que não havia nenhum artigo repetido, mantendo cada trabalho único. Em seguida, a coluna DT (*Document Type*) foi verificada e trabalhos de revisão e capítulos de livros foram excluídos, contabilizando 73 artigos finais para serem analisados. A revisão utilizou apenas artigos originais, para que os resultados não fossem interferidos por trabalhos duplicados. Realizou-se um novo comando no console do RStudio, adicionou-se "*biblioshiny( )*" e a versão Biblioshiny 5.0 foi aberta no navegador. A planilha foi adicionada no bibliometrix e os resultados foram produzidos.

Para análise dos artigos no biblioshiny foi seguido o fluxo de trabalho recomendado para mapeamento científico disponibilizado pelo artigo "*Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis*" disponível pela revista *Journal of Informetrics* com acesso pela plataforma *ScienceDirect* gratuitamente (figura 1).

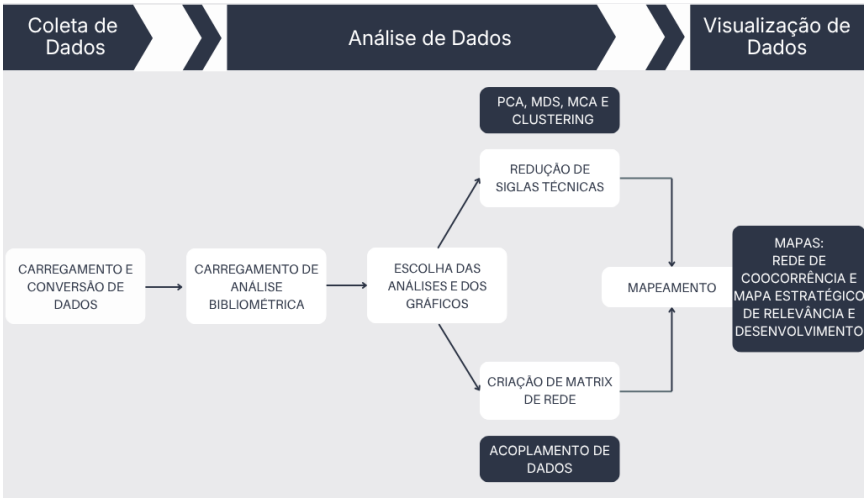


Figura 1: Fluxo de trabalho para Mapeamento Científico no Bibliometrix. Fonte: Autores (Adaptado de Massimo e Corrado), 2017.

Resultados e Discussão

A busca inicial encontrou 83 estudos. Após verificação de artigos repetidos e exclusão de revisões e capítulos de livros, 73 artigos foram selecionados para as análises. O objetivo foi identificar as temáticas mais estudadas sobre SAFs no Brasil. Para isso, foram selecionados dois mapas, um que demonstrou a conexão de palavras-chave por coocorrência, e outro com relevância e desenvolvimento dos artigos por meio das palavras-chave mescladas. O Biblioshiny opera os resultados com análises realizadas pelo algoritmo de agrupamento Louvain e método de associação, disponibiliza informações descritivas sobre os gráficos por meio de IA interna do software. As descrições são limitadas a formulação dos gráficos, para análise do estudo realizado foi necessário realizar a leitura dos artigos.

O Mapa Estratégico de Relevância e Desenvolvimento (figura 2) categorizou os temas com base em duas dimensões: grau de relevância (eixo X) e grau de desenvolvimento (eixo Y). O grau de relevância, mede a centralidade do tema para todo o campo de pesquisa, estes estão bem conectados a demais temas. E o grau de desenvolvimento, mede a densidade - coerência interna e maturidade de discussão - temas de alta densidade possuem conexões numerosas entres as palavras-chave dos artigos.

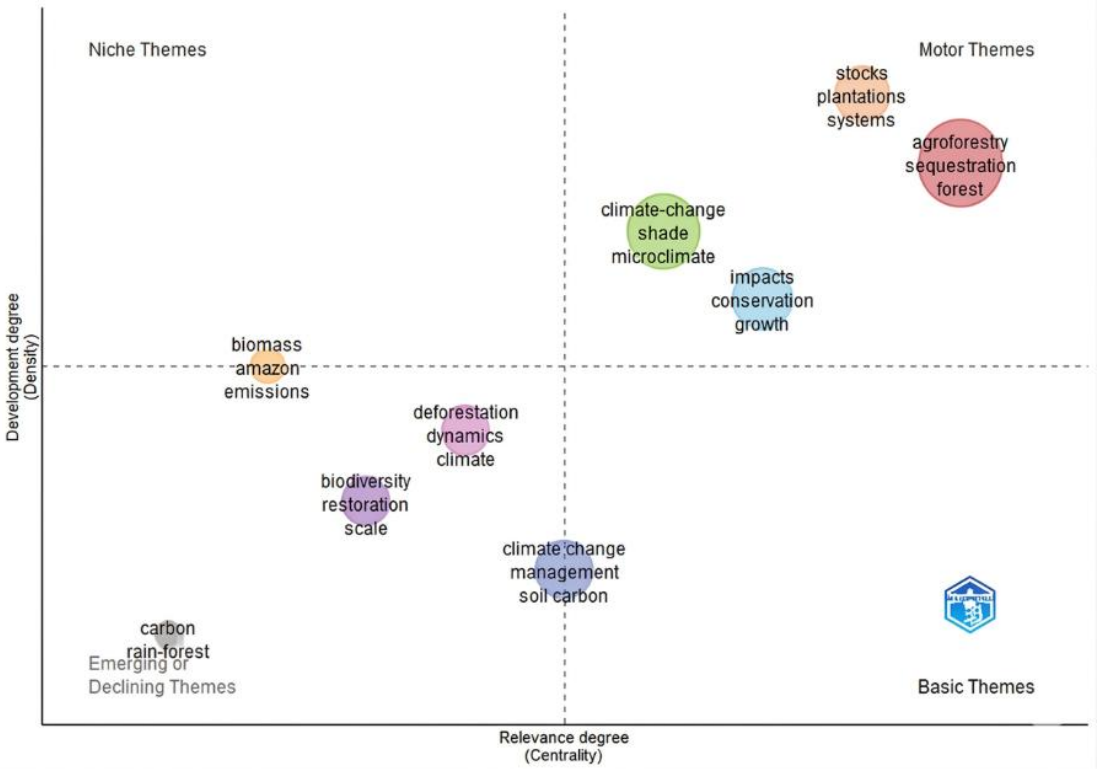


Figura 2: Mapa Estratégico de Relevância e Desenvolvimento.
Fonte: Autores (Adaptação da qualidade realizada com IA) (2026)

As duas dimensões dividem o mapa em quatro quadrantes, cada um representa um nível diferente de desenvolvimento: Temas motores, temas de nicho, temas emergentes e temas básicos. Cada quadrante identificou grupos de palavras-chave que foram organizados nos indicadores circulares coloridos de diferentes tamanhos, quanto maior o marcador circular, maior o nível de desenvolvimento.

Os temas motores são aqueles apresentados no canto superior direito, com 4 (quatro) grupos de palavras-chave, "agroflorestal-sequestro-florestal", "mudanças climáticas-sombra-microclima", "impactos-conservação-crescimento" e "estoque-plantação-sistemas", esses são temas com alta centralidade e alta densidade, bem desenvolvidos, centrais e impulsionam a frente das pesquisas.

Os temas de nicho são os do canto superior esquerdo, com 1 (um) grupo de palavras-chave "biomassa-amazônia-emissões" no círculo laranja, ele se localiza entre o quadrante esquerdo superior e inferior, considerando-o em transição. No quadrante superior apresenta alta centralidade e alta densidade, sendo temas bem desenvolvidos, centrais que também impulsam as pesquisas. Interessante notar que apenas neste nicho apareceu uma palavra informativa do local de estudo, o qual sugere que o bioma amazônico seja um dos mais estudados com SAFs. No entanto, como o mapa estratégico concentra-se apenas nas palavras-chave, é possível, que a maioria dos autores não tenha escolhido menção ao local de estudo como de relevância.

Os temas emergentes são aqueles apresentados no canto inferior esquerdo, organizados em 3 (três) grupos de palavras-chave, "desmatamento-dinâmica-clima", "biodiversidade-restauração-escala" e "carbono-floresta tropical" e são de baixa centralidade e baixa densidade. São temas que podem estar em fase inicial ou perdendo relevância nos campos de pesquisas. Para uma conclusão, seria necessária uma análise temporal.

Os temas básicos estão localizados no canto inferior direito, que há apenas 1 (um) grupo de transição entrando nesse quadrante com as palavras-chave "mudanças climáticas- gerenciamento- carbono do solo". Como temas básicos apresentam alta centralidade e baixa densidade, o que indica que são temas centrais, mas as pesquisas podem estar fragmentadas ou menos desenvolvidas. O mapa estratégico ofereceu uma visão robusta do cenário de pesquisa no Brasil, associado a outros gráficos serviram de base as análises.

A Rede de Coocorrência (figura 3) correlaciona palavras que frequentemente aparecem juntas, o tamanho de cada nó indica a frequência de cada palavra e a espessura das arestas indicam a força da correlação. O algoritmo de Louvain identificou quatro diferentes redes com 4 temas principais: *Agroforestry* (agroflorestal), *climate change* (mudanças climáticas), *climate-change* (mudanças-climáticas) e *stocks* (estoques). Cada tema principal foi agrupado com as palavras-chaves com que mais são relacionadas, organizados em diferentes redes (vermelho, azul, verde e roxo).

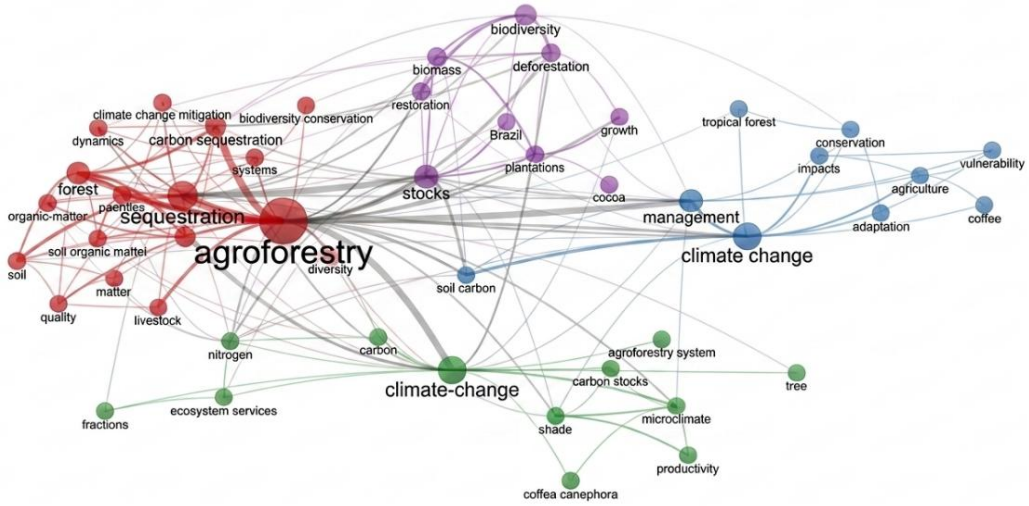


Figura 3: Rede de Coocorrência. Fonte: Autores (Adaptação da qualidade realizada com IA) (2026).

A rede vermelha tem a palavra-chave principal "agrofloresta", que aparece mais relacionada com os termos sequestro, sequestro de carbono e floresta, as palavras com tamanho da fonte menor aparecem menos vezes. O termo agrofloresta aparece nos artigos relacionada com a maioria das outras palavras da rede, em estudos que comparam sistemas agroflorestais com sistemas convencionais, com destaques em análises de carbono no solo e resistência às mudanças climáticas. Os SAFs com destaque nos estudos são: Integração Pecuária- Floreta (IPF), sistema agrossilviopastoril e consórcio entre espécies de interesse comercial e arbóreas.

A rede roxa tem como a palavra-chave principal "estoque", que mostrou mais relações com os termos biodiversidade, biomassa e desmatamento. Nos artigos, o termo estoque aparece para descrever análises de estoque de carbono e/nutrientes no solo, com destaque ao nitrogênio (N). A rede de ligações roxa destaca o termo "cocoa" (cacau) espécie que apresenta destaque pela alta produção de cacau cabruca no estado da Bahia. Os estudos sobre a cabruca comparam sua produtividade com sistemas de produção a céu aberto. De acordo com o Art.15 do Decreto Estadual Nº 15180/2014, entende-se por cabruca o sistema agrossilvicultural com densidade arbórea igual ou maior que 20 (vinte) indivíduos de espécies nativas por hectare, que se fundamenta no cultivo em associação com árvores de espécies nativas ou exóticas de forma aleatória e descontínua no bioma Mata Atlântica. Ao tratar-se de café cabruca, entende-se a produção de cacau em áreas de cabruca.

A rede azul tem a palavra-chave principal mudanças climáticas, que relacionou-se mais vezes com as palavras gerenciamento, floresta tropical, conservação e vulnerabilidade. Muitos estudos focam em regiçoes tropicais no Brasil, para conciliação de produção com conservação da natureza, levando em consideração a vulnerabilidade de muitas espécies as mudanças climáticas. A palavra gerenciamento aparece nos artigos associada ao incentivo de políticas públicas, créditos rurais e auxílio técnico aos produtores campo para ampliação das técnicas agroflorestais.

A rede verde tem a palavra-chave principal mudanças-climáticas, uma variação do termo "climate change" (mudanças climáticas) que apareceu em outros artigos, e está mais relacionada com carbono, microclima e com a palavra-chave em vermelho "agroflorestal". O carbono é estudado nos artigos como indicador do carbono presente no solo de diferentes culturas, pois desenvolve um papel fundamental na ciclagem de nutrientes e também aparece como dióxido de carbono (CO2), importante Gás do Efeito Estufa (GEE) a ser monitorado.

O café aparece como alvo de estudo em 16 artigos, cerca de 22% dos trabalhos, realizando experimentos com a produção de café com sombreamento (por diferentes espécies arbóreas) e sem sombreamento (produção tradicional). As duas espécies com maior destaque são *Coffea canephora* (café Canéfora ou Conillon) e *Coffea arabica* (café arábica) o que pode ser interpretado pelo interesse de mercado nas duas espécies. Devido à diversidade de regiões ocupadas pela cultura do café, a variedade de climas, relevos, altitudes e latitudes, o país produz tipos variados de grãos. As duas principais espécies plantadas são o arábica (80% da área) e, o conilon ou robusta (MAPA, 2017).

Comentários finais

A presente revisão sistemática organizou 73 artigos encontrados na base de dados *Web Of Science*, sistematizados pelo software *RStudio* e com análises realizadas pelo software *bibliometrix* (versão Biblioshiny 5.0), ademais, foi realizada a leitura integral dos estudos para melhor intepretação dos resultados, associadas as descrições disponibilizadas pelo próprio bibliometrix. A revisão identificou 3 (três) sistemas (Integração Pecuária- Floreta (IPF), sistema agrossilviopastoril e consórcio entre espécies de interesse comercial e arbóreas) e 2 (duas) espécies (café e cacau) principais como alvo dos estudos sobre SAFs no Brasil. No entanto, a maioria dos estudos concentra-se na pesquisa dos impactos positivos ambientais das SAFs, tais como o estoque no solo e sequestro de carbono da atmosfera, manejo, conservação e biodiversidade.

A preocupação com os impactos causados pelas mudanças climáticas nas produções de alimentos são a base de muitos estudos, que por meio de projeções climáticas e ambientais avaliam o desempenho dos sistemas agroflorestais. Os autores recomendam que as Figuras 1 e 2 sejam consultadas para ampliar os estudos de SAFs no Brasil.

Referências Bibliográficas

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). **bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis.** *Journal of Informetrics* , 11(4), 959-975.

ALTIERI, Miguel. **Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável**. 3. ed. rev. ampl. São Paulo; Rio de Janeiro: Expressão Popular, 2012.

BRASIL. **Relatório da COP30 consolida 56 decisões e mira implementação global**. Agência Brasil, Rio de Janeiro, 17 mar. 2026. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/meio-ambiente/noticia/2026-03/relatorio-da-cop30-consolida-56-decisoes-e-mira-implementacao-global.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Café.** Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/cafe. Acesso em: 14 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Autorização de manejo da cabruca.** Brasília: MAPA, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/cacau/anos-anteriores/autorizacao-de-manejo-da-cabruca.pdf. Acesso em: 14 jan. 2026.

CARNEIRO, Fernando Ferreira et al. **Dossiê ABRASCO**: **um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde**. EPSJV/Expressão Popular, 2015.

FREDERICO, S. MORAL, Y. P. **Sistema agroflorestal e autonomia: uma revisão sistemática**. Revista NERA, v. 25, n. 63, p. 190-209, mai.-ago., 2022.

FONINI, R. **Agrofloresta e Alimentação: estratégias de adaptação de um grupo quilombola em Barra do Turvo- S**P. 2012. 213f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento), Universidade Federal do Paraná, 2012.
INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/. Acesso em: 23 abril. 2026.

KANDJI, Serigne T. et al. Opportunities for linking climate change adaptation and mitigation through agroforestry systems. In: **World Agroforestry into the Future**. Nairobi: World Agroforestry Centre, 2006. p. 113-122.

MAIA, A. G.; EUSEBIO, G. D. S.; FASIABEN, M. D. C. R. et al. The economic impacts of the diffusion of agroforestry in Brazil. **Land Use Policy**, v. 128, 105489, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105489.

MICCOLIS, A. et al. **Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN: Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF, 2016.

PADOVAN, M. P.; NASCIMENTO, J. S.; ALVES, J. C.; PEREIRA, Z. V.; MOTTA, J. S. Estado da arte de sistemas agroflorestais em bases agroecológicas na região Oeste do Brasil. **Cadernos de Agroecologia**, v. 13, n. 1, p. 1-7, 2018. Disponível em: http://revistas.aba-agroecologia.org.br/index.php/cad/article/view/21495690.

PASINI, F. S. A Agricultura Sintrópica de Ernst Götsch: história, fundamentos e seu nicho no universo da Agricultura Sustentável. Dissertação (mestrado) Programa de Pós graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, Rio de Janeiro, 2017.

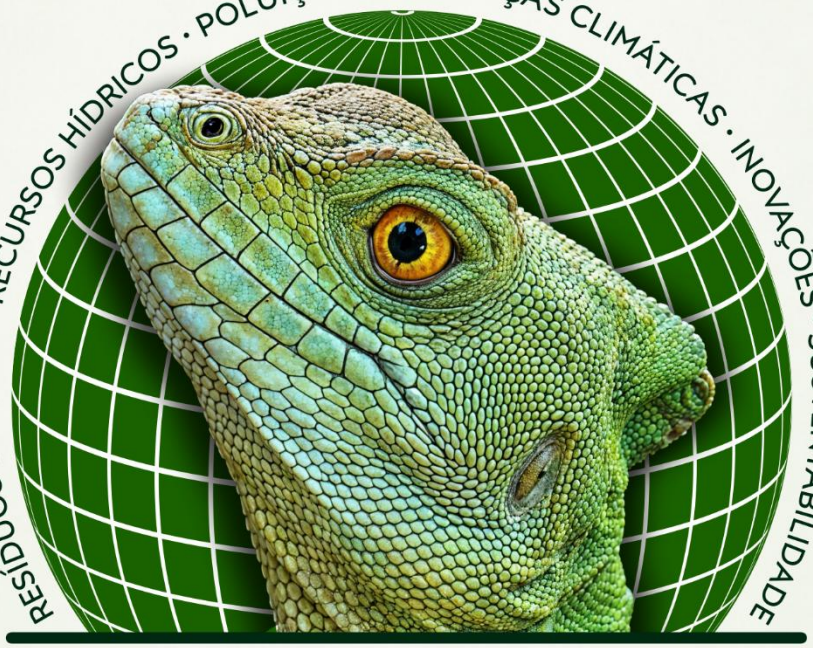
R Core Team (2026). _R: **A Language and Environment for Statistical Computing**_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.<https://www.R-project.org/>.

SANTOS, Pedro Zanetti Freire; CROUZEILLES, Renato; SANSEVERO, Jerônimo Boelsums Barreto. Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agricultural landscapes? A meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 433, p. 140-145, 2019.

ZOMER, Robert J. et al. Trees on farms: an update and reanalysis of agroforestry's global extent and socio-ecological characteristics. **World Agroforestry Centre Working Paper**, n. 179, 2014.

ÁREA TEMÁTICA 2

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

DETERMINAÇÃO E SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE NA BACIA DO RIO UBERABINHA

1 Matheus Fonseca Durães, 2 Lucas de Souza Santos, 3 Maria Fernanda Corrêa de Mello Ruas

1Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos - LCRH, Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: duraes@ufu.br; 2Programa de Pós-graduação em Geografia - PPGEO, Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: lucas.sousasantos6768@gmail.com 3Programa de Pós-graduação em Geografia - PPGEO, Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: mariaruasfernanda@gmail.com

Palavras-chave: Hidrograma; Cerrado; Recarga.

Resumo

O trabalho teve como objetivo determinar a recarga subterrânea a partir da separação do escoamento de base e superficial na bacia do rio Uberabinha. Para isso, foram utilizados os métodos de Barnes e o filtro numérico de Eckhardt em dados fluviométricos e pluviométricos de 2010 a 2023. Os resultados mostraram que os valores de recarga calculados pelos dois métodos foram semelhantes e condizentes com os de outras regiões do Cerrado. O método de Eckhardt apresentou um valor ligeiramente maior, pois considera a recarga potencial a partir das condições hidrogeológicas. Aproximadamente 23% da precipitação anual na bacia foi convertida em recarga efetiva, um valor médio de 327,7 mm e 367,6 mm para Barnes e Eckhardt, respectivamente. A conversão de Cerrado para áreas agrícolas reduz o volume de água infiltrada e a recarga dos aquíferos livres, com reflexos na diminuição da disponibilidade hídrica no período de estiagem.

Introdução

A exaustão dos recursos hídricos numa dada bacia hidrográfica é consequência de práticas agrícolas inadequadas que provocam a degradação dos solos e da vegetação, contribuindo para o aumento do escoamento superficial direto, erosão do solo e transporte de sedimentos que, concomitantemente, reduzem o volume de água infiltrada e a recarga dos aquíferos livres, principalmente nas áreas de Cerrado.

Essas alterações de natureza antrópica, implicam em impactos na biodiversidade, no clima, na disponibilidade hídrica (Nunes e Castro, 2021), bem como no balanço de energia vertical e horizontal, e sua interação com as superfícies num contexto de macroescala (Findell et al., 2017).

A crescente demanda pela água, sobretudo em bacias com presença de uma agricultura extensiva, trouxe um significativo aumento na disputa pelo uso desse recurso natural, gerando problemas relacionados à sua qualidade e disponibilidade, resultando numa necessidade de otimizar o seu uso através de uma gestão eficiente que compreenda a dinâmica hidrológica e as constantes mudanças do uso do solo.

Segundo Pereira et al. (2026), a região na qual o bioma Cerrado está inserido sofre cada vez mais pressões, principalmente devido à expansão urbana e agrícola e, de acordo com os autores, mais de 1.000.000 de km² de sua vegetação nativa foi substituída por outros usos, ou seja, aproximadamente de 55% de área original convertidos em cidades, pastagens e monoculturas como as de soja, algodão e milho (Machado et al., 2024).

Esse bioma é caracterizado por apresentar duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa, além de solos profundos e bem drenados, os quais contribuem para o armazenamento natural de água e, de acordo com Furlan et al. (2020), a dinâmica e o volume da água estão intimamente relacionados à sazonalidade das chuvas e à flutuação das águas subterrâneas rasas, compreendendo um sistema de água doce integrado aos rios nas bacias hidrográficas.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Uberlândia cresceu 18% entre os anos de 2010 e 2021 e, com isso, o sistema de abastecimento público encontra-se atualmente em situação preocupante referente à oferta hídrica disponível, uma vez que o município é abastecido pelo alto curso do Rio Uberabinha e pelo Ribeirão Bom Jardim, cujas vazões disponíveis aproximam-se ao limite em função do acentuado crescimento populacional (Salla et al., 2013).

Por outro lado, a elevada capacidade de armazenamento de água, em razão da grande espessura dos solos e das feições do relevo condicionam as características do escoamento de base que, por sua vez, determina a regularização do rio Uberabinha. As dinâmicas hídricas superficiais e subsuperficiais estão sendo modificadas pelo intenso uso e ocupação do solo no alto curso, o que pode trazer consequências negativas para a recarga da sua zona freática saturada.

A estimativa da recarga de água subterrânea é fundamental para que os gestores de recursos hídricos possam planejar os melhores usos dos recursos e evitar possíveis conflitos, sendo, para isso, importante entender e quantificar os possíveis impactos provenientes dos usos e ocupação da terra e das mudanças climáticas. Buscando conhecer a dinâmica dos fluxos de escoamento na bacia do rio Uberabinha, delimitada na cidade de Uberlândia, foi realizada a separação do hidrograma compreendido entre os anos de 2010 e 2023 pelo método de Barnes e pelo uso do filtro de Eckhardt, levando em consideração a importância de se tomar a bacia hidrográfica uma unidade de investigação, pelo seu caráter de sistema integrador dos diferentes elementos naturais, econômicos e sociais.

Material e Métodos

Área de estudo

A bacia do alto curso do Rio Uberabinha está localizada no Triângulo Mineiro, montante da cidade de Uberlândia. Essa bacia abrange os municípios de Uberaba, na sua porção Norte, e a porção Sudeste do município de Uberlândia, ocupando níveis altimétricos entre 858 m e 978 m (Figura 01).

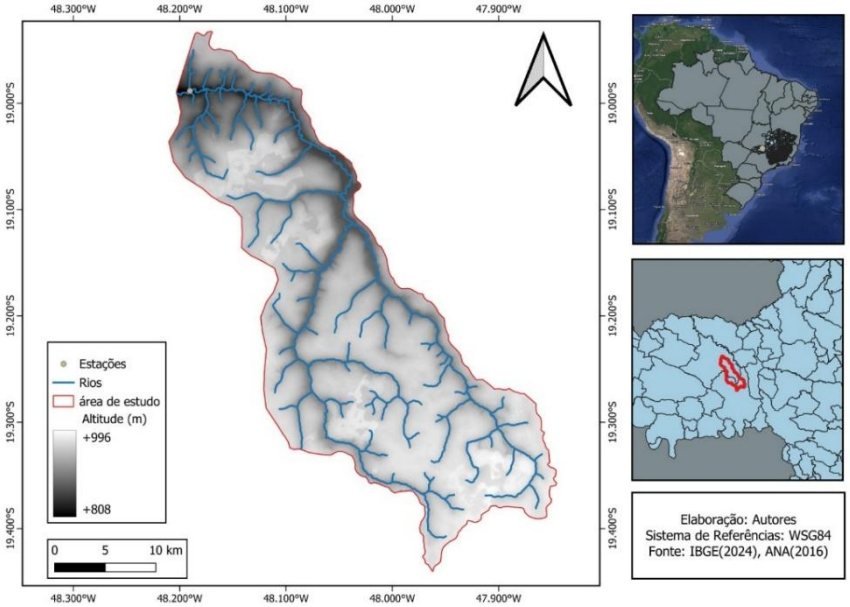


Figura 01: Mapa de localização da bacia do rio Uberabinha delimitada na estação fluviométrica Fazenda Letreiro.

A estruturação das paisagens na bacia do Alto Uberabinha é resultado de um longo processo evolutivo controlado pelos fatores abióticos, sendo que a geologia e as condições climáticas, controlam a evolução das formas, a pedogênese, a distribuição da rede de drenagem, os diferentes processos erosivos, a formação dos aquíferos subterrâneos, a distribuição da vegetação e outros elementos físicos que interferem na organização e ocupação das paisagens (Soares et al., 2011). A chapada Uberlândia/Uberaba, onde se encontra a Bacia do Alto Uberabinha, pode ser considerada uma área residual de um processo erosivo generalizado ocorrido no Terciário, denominado de superfície "Sul-Americana".

Em relação à distribuição das classes de solo, foi utilizado o mapeamento dos solos do estado de Minas Gerais, na escala 1:650.000 (UFV, 2010). Nesse estudo, a classe latossolo ocupa a maior porção de área, com 89,03%, originados das rochas sedimentares da Formação Marília. Ainda, são encontrados espessos pacotes de solos hidromórficos das classes gleissolo melânico distrófico e gleissolo húmico álico que margeiam os cursos d'água e ocorrem nos topos planos em lagoas e em campos de murunduns, totalizando 10,9% da área da bacia e, por último, a classe argissolo vermelho amarelo eutrófico com 0,07%. Na Figura 02, as classes de solos estão representadas conforme sua distribuição espacial.

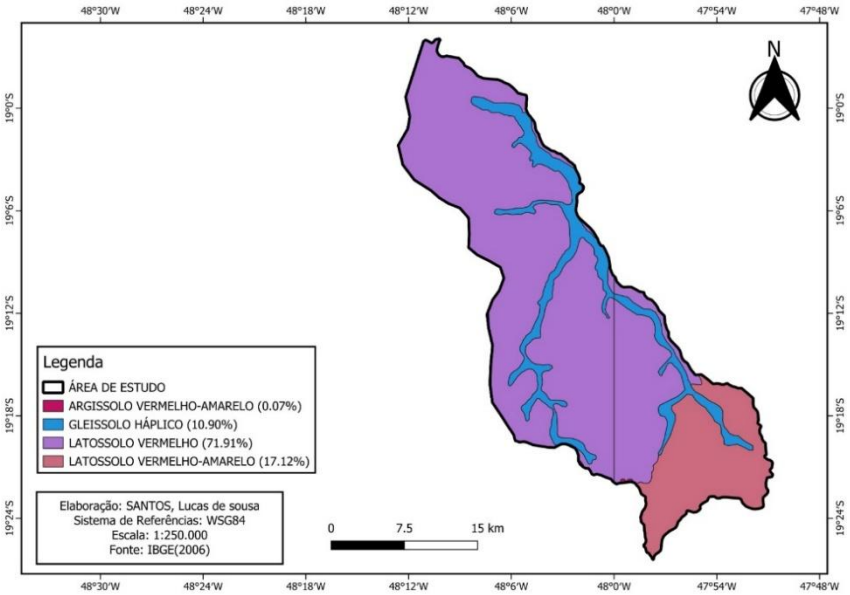


Figura 02: Mapa das classes de solo da bacia hidrográfica do rio Uberabinha.

Os usos dos solos encontrados na bacia foram agrupados em 6 classes: Cerrado, agricultura, silvicultura, pastagem, área urbanizada e água (rede de drenagem e áreas alagadas).

Em relação à fisionomia, são encontrados dois arranjos paisagísticos definidos com base na compartimentação topográfica, na composição e uso da estrutura superficial da paisagem e na sua dinâmica. São eles: áreas de topos planos e áreas onduladas com planícies aluvionares. As áreas de topos planos apresentam relevo tabular a suavemente ondulado, com interflúvios amplos os quais originam vertentes longas e suavemente convexizadas. Os vales são rasos e ocupados por extensos campos úmidos, onde ocorrem os solos hidromórficos e orgânicos. As chapadas, por serem muito planas, armazenam enorme quantidade de água pluvial, sendo fornecedoras hídricas dos córregos que nascem em suas bordas ou no contato do pacote de solo com a canga laterítica, que se formou, em tempos pretéritos, como consequência de oscilações do lençol freático causadas pela variação climática da Era Cenozóica. Estas superfícies elevadas e planas, "Superfície Sul-Americana de King", são áreas de recarga dos aquíferos locais e regionais (Soares et al., 2011).

As altitudes apresentam variação de 120 m, sendo que a maior parte da área se situa entre a cota 900 a 950 m. Nas altitudes menores que 900 m se encontram os vales fluviais circundados por extensas várzeas. Acima de 950 m de altitude, estão os sistemas úmidos de topo e a maioria das nascentes.

Metodologia de separação do escoamento

Para a determinação do escoamento de base, utilizou-se os dados fluviométricos da estação Fazenda Letreiro, no período de 2010-2023, além da estação pluviométrica de mesmo nome, conforme apresentado na Tabela 01.

Tabela 01. Informações das estações de monitoramento

Código	Tipo	Nome	Latitude	Longitude	Área (km²)	Série Histórica	Operadora
60381000	Fluviométrica	Faz. Letreiro	-18,9883	-48,1903	777	2010-2023	SGB-CPRM
1948006	Pluviométrica	Faz. Letreiro	-18,9883	-48,1903	-	2010-2023	SGB-CPRM

O método de Barnes consiste em um procedimento manual, usado quando se tem uma série extensa, sendo aplicado em séries representativas baseadas na vazão média e na linearidade da curva de recessão quando esta é analisada em escala logarítmica (Figura 03).

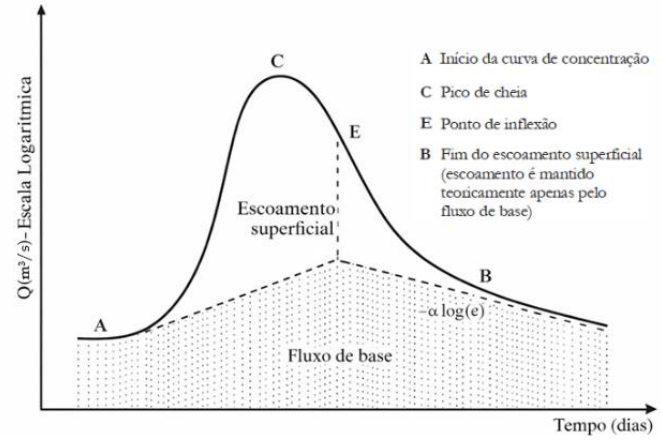


Figura 03: Método gráfico de Barnes

Sua curva de esgotamento é ajustada pela Equação 01, abaixo:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (01)$$

Onde: Q é o escoamento de base no tempo t, Q_0 é o escoamento de base inicial (no início do período de recessão), α é o coeficiente de recessão e t é o tempo.

A separação do escoamento por meio de filtros numéricos é empregada sobre a vazão total, resultante da soma algébrica dos escoamentos superficial e de base, conforme expresso na Equação 02.

$$y_i = f_i + b_i \quad (02)$$

Onde: yi é o escoamento total, fi é o escoamento superficial direto e bi é o escoamento subterrâneo ou de base e i é o instante de tempo.

A equação do escoamento de base pode ser determinada pela equação 03. Nessa equação, o escoamento subterrâneo em direção ao canal segue o princípio do reservatório linear, cuja função de esvaziamento é do tipo exponencial. Nesse caso, o reservatório subterrâneo sofrerá esvaziamento a medida que o fluxo de água segue na direção do canal e, em caso de chuva que

promova a recarga deste reservatório, haverá seu reabastecimento. No período de estiagem, seu esvaziamento é contínuo e, portanto, origina a curva de recessão.

$$b_{i+1} = b_i \cdot e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (03)$$

Onde: bi+1 é o escoamento de base no instante i+1, bi é o escoamento de base no instante i, Δt é o intervalo de tempo nos instantes i e i+1 e k pe a constante de recessão.
A constante de recessão pode ser calculada a partir de um rearranjo da Equação (03), apresentada na equação 04 e 05, chegando na equação 06.

$$b_{i+1} = b_i \cdot a \quad (04)$$

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (05)$$

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln \frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_{(t)}}} \quad (06)$$

Onde: Δt é o tempo de recessão, $Q_{(t+\Delta t)}$ é a última vazão da recessão e $Q_{(t)}$ é a primeira vazão da recessão.

A determinação da constante de recessão k deve ser feito para períodos longos de recessão de uma dada série histórica. A separação do escoamento de base proposto por Eckhardt (2004), tem como parâmetro o índice máximo de escoamento de base (BFI_{max}), o qual possui valores pré-definidos que seguem características geológicas e de drenagem da bacia, conforme salienta, (Collischonn e Fan, 2012). Segundo Eckhardt (2004), o filtro é um algoritmo utilizado para calcular o fluxo de base, fazendo a separação do escoamento em duas componentes: escoamento superficial e escoamento de base (indireto), conforme a equação 07.

$$b_i = \frac{(1 - BFI_{max}) \cdot a \cdot b_{i-1} + (1 - a) \cdot BFI_{max} \cdot y_i}{1 - a \cdot BFI_{max}} \quad (07)$$

Onde: bi é o escoamento subterrâneo no instante i, bi-1 é o escoamento de base no instante i-1, yi é o escoamento total no instante i, a está determinado pela equação 05 e BFI_{max} é o índice de fluxo de base máximo, conforme a Tabela 02.

Tabela 02. Valores sugeridos para BFI_{max} (Collischonn e Fan, 2012)

BFI_{max}	Características da bacia
0,80	Rios perenes e aquíferos porosos
0,50	Rios efêmeros ou intermitentes e aquíferos porosos
0,25	Rios perenes e aquíferos impermeáveis

Para avaliar a taxa de recarga do aquífero livre, utilizou-se a Equação (08) e, posteriormente, a sua porcentagem em relação à precipitação na bacia hidrográfica (Equação 10). A parcela referente à evapotranspiração foi estimada a partir de um balanço hídrico simplificado.

$$TR = \frac{b_{med}}{A} \quad (08)$$

$$Rec = \left(\frac{TR}{P}\right) \times 100 \quad (09)$$

Onde: TR é a taxa de recarga do aquífero livre, b_{med} é a vazão subterrânea média anual, A é a área da bacia hidrográfica, Rec é porcentagem de recarga e P é a precipitação.

Resultados e Discussão

A declividade na bacia do rio Uberabinha (Figura 1) mostra uma variação altimétrica de 188 m. Destacam-se as classes plana (0-3%) e suave ondulado (3,1-8%) como as classes predominantes de declividade na área de estudo. Para o manejo de bacia hidrográfica, a declividade é um fator de grande importância, uma vez que influencia diretamente o tempo de duração do escoamento superficial e o tempo de concentração da precipitação na rede de drenagem, favorecendo os processos de infiltração. A precipitação média anual para a bacia do rio Uberabinha, delimitada na seção de controle Fazenda Letreiro, foi de 1429 mm, com máximo de 1922 mm e mínimo de 1154 mm, no período analisado de 2010 a 2024.

Associado ao relevo plano, a partir do estudo de Rosa et al. (2019), foi possível observar o predomínio das formações geológicas do tipo Cobertura detrítico-laterítica e Formação Marília, constituídas por arenitos, que funcionam como importantes aquíferos, permitindo a infiltração de água da chuva e alimentando o lençol freático, especialmente nas áreas de recarga nas cabeceiras.

Caracterizando o uso do solo, este se mostra um fator importante que rege a dinâmica de recarga de água pela precipitação, na qual há um predomínio de classe agricultura, revelando o acentuado grau de degradação das áreas nativas do Cerrado. Nessas áreas antropizadas, ocorrem modificações na estrutura do solo, modificando a densidade, afetando a porosidade, o armazenamento e a disponibilidade de água, o que interfere na capacidade de infiltração e, consequentemente, nos processos de recarga, mesmo em áreas de relevo suave.

Nesse sentido, a redução na recarga de aquíferos tem como uma das consequências o rebaixamento do lençol freático (DIAS et al., 2018), comprometendo as vazões nos rios, que são fundamentais para a manutenção da atividade econômica na região durante o período de estiagem.

Na Tabela 03 apresenta-se os valores de recarga obtidos pelos dois métodos de separação do escoamento, nos períodos analisados, que abrangem períodos úmidos, secos e médios, conforme pode ser observado pela Figura 04.

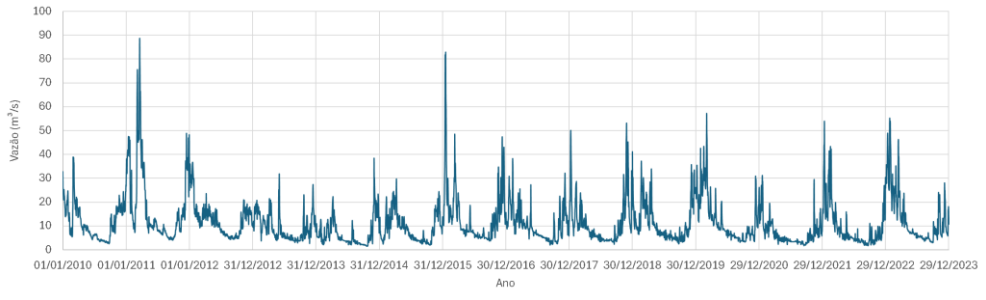


Figura 04. Vazões médias diárias de 2010-2023 na estação Fazenda Letreiro.

Tabela 03. Resultado da separação do escoamento.

Ano	Qs med (m³/s)	Qb $_{Barnes}$ (m³/s)	Qb $_{Eckhardt}$ (m³/s)	PCP (mm)	ET (mm)	TR_{Barnes}(mm)	$TR_{Eckhardt}$ (mm)	Rec_{Barnes}(%)	$Rec_{Eckhardt}$ (%)
2010/2011	18,08	9,60	12,21	1921,9	1188,1	389,52	495,42	20,27	25,78
2011/2012	14,07	10,22	10,32	1375,6	802,9	414,89	418,87	30,16	30,45
2014/2015	9,11	5,10	6,00	1154,5	785,6	207,03	243,68	17,93	21,11
2018/2019	12,57	7,15	8,29	1340,4	830,3	290,17	336,55	21,65	25,11
2022/2023	12,50	8,30	8,47	1355,6	848,4	336,91	343,69	24,85	25,35

A premissa desses métodos é que a recarga é o próprio escoamento de base, que neste caso foi igual a um valor médio de 327,7 mm e 367,6 mm, representando 22,9% e 25,6% da precipitação ocorrida na bacia, utilizando os métodos de Barnes e Eckhardt, respectivamente. Esses valores encontrados estão de acordo com os trabalhos de Oliveira et al. (2016), Cambraia Neto e Rodrigues (2020) e Santos et al. (2021). A predominância de Latossolos na bacia contribui para ocorrência de taxas de infiltração e de recarga elevadas, conforme também observado por Cambraia Neto e Rodrigues (2020) cujas as estimativas de recarga calculadas pelos métodos SepHidro e Balseq foram consistentes com as observadas em outras bacias hidrográficas agrícolas no Bioma Cerrado.

O ano hidrológico 2011/2012 apresentou os maiores valores de recarga em ambos os métodos e esse comportamento foi devido à distribuição da chuva ao longo do período, que foi mais uniforme e distribuída ao longo do tempo, favorecendo os processos de infiltração e percolação, bem como se deram no início da estação chuvosa, quando o solo está seco e com maior capacidade de armazenamento. Esse comportamento do padrão de distribuição das chuvas e maior taxa de recarga também foi observado no trabalho de Santos et al. (2021), ao analisarem o comportamento da recarga em uma bacia localizada no bioma Cerrado, com base no monitoramento dos anos 2008/2009.

Santos e Koide (2016) utilizaram modelos numéricos de fluxo em meio saturado na região de cerrado do Distrito Federal e identificaram que as maiores taxas de recarga ocorreram em áreas onde havia predominância de Latossolos. Esse mesmo comportamento foi observado em estudo realizado por Mattiuzi et al. (2015) que avaliaram a recarga pelo método da medição de escoamento de base em quinze bacias hidrográficas no estado do Rio Grande do Sul. Os maiores valores de recarga, variando de 33 a 47% da precipitação, foram observadas em bacias onde havia predominância de Latossoslos. Esses solos apresentam estágio avançado de intemperização, sendo solos muito evoluídos, variando de fortemente a bem drenados (Santos et al., 2016). Albuquerque e Chaves (2011) aplicando o método de separação de escoamento de base na região de cerrado do Aquífero Urucuia, estado da Bahia, obtiveram valores de recargas representando 20% e 17%, da precipitação, respectivamente. Estudos de recarga realizados em bacias com características semelhantes na África do Sul (Madlala et al., 2019) obtiveram valores de recarga representando de 23 a 24% da precipitação.

Ao analisar os dois métodos, observa-se que uma maior percentagem da precipitação foi convertida em recarga no método de Eckhardt. Isto pode ser explicado pelo fato desse método calcular a recarga potencial a partir das condições hidrogeológicas da bacia, considerando assim que a água que infiltra a uma profundidade maior que a da zona radicular pode ser

convertida em recarga, enquanto Barnes adota um valor médio da recessão para o período analisado, podendo variar conforme o comportamento do índice pluviométrico. Contudo, as divergências nas estimativas obtidas com diferentes filtros são comuns (Lacombe et al., 2017; Santos et al., 2021), além dos métodos de separação do escoamento de base por meio de filtros matemáticos tendem a superestimar os valores de recarga (Santos et al., 2021).

O uso predominantemente agrícola na bacia do rio Uberabinha, impacta diretamente na conversão da precipitação em recarga, por diminuir a infiltração e, favorecer os processos de evapotranspiração, principalmente no período de estiagem, com a diminuição da disponibilidade hídrica. Cambraia Neto e Rodrigues (2021) avaliaram o impacto das mudanças no uso e ocupação do solo sobre o potencial de recarga dos lençóis freáticos em uma bacia hidrográfica da localizado no cerrado e os resultados mostram que o potencial de recarga dos lençóis freáticos foi diretamente influenciado pelas mudanças nos cenários simulados e nesse sentido, os processos de ocupação e uso do solo devem ser compreendidos para minimizar as reduções no potencial de recarga do aquífero livre.

Conclusões

Os dois métodos de recarga de água subterrânea avaliados na bacia hidrográfica do rio Uberabinha apresentaram valores condizentes com os obtidos em outras regiões do Bioma Cerrado.

Os valores de recarga calculados pelos dois métodos foram semelhantes. O método de separação do escoamento utilizando os filtros de Eckhardt foi o que apresentou o maior valor de recarga e pelo método de Barnes o menor valor.

Aproximadamente 23% da precipitação anual que ocorreu na bacia foi convertida em recarga efetiva, sendo que esse valor tem um potencial de aumento caso sejam a dotadas medidas de recuperação da vegetação nativa.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos – LCRH/UFU da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio recebido para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, Ana Carolina Lucas dos Santos; CHAVES, Henrique Marinho Leite. Estimativa de recarga da Bacia do Rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 15, n. 11, p. 1123–1129, set. 2011.

CAMBRAIA NETO, Arnaldo José; RODRIGUES, Lineu Neiva. Impact of land use and occupation on potential groundwater recharge in a Brazilian savannah watershed. **Water International**, vol. 46, n. 3, p. 348–364, mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1898862

CAMBRAIA NETO, Arnaldo José; RODRIGUES, Lineu Neiva. Evaluation of groundwater recharge estimation methods in a watershed in the Brazilian Savannah. **Environmental Earth Sciences,** vol. 79, n. 140, mar. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-020-8884-x

COLLISCHONN, Walter; FAN, Fernando Mainardi. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 18, p. 2614-1622, abr. 2012. DOI: 10.1002/hyp.9391

DIAS, Ana Carla Holanda; SANTIAGO, Marilia Cavalcanti; VIEIRA, Bianca Alencar; NOGUEIRA, Lauro. Perfuração indiscriminada de poços em Iracema/CE: um estudo sobre o paradoxo da atual crise hídrica. **Águas Subterrâneas**, vol. 32, n. 3, p. 1-19, ago. 2018. DOI: https://doi.org/10.14295/ras.v32i3.29167

ECKHARDT, Klaus. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 2, p. 507–515, dez. 2004. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.5675

FINDELL, Kristen; BERG, Alexis; GENTINE, Pierre; KRASTING, John; LINTNER, Benjamin; MALYSHEV, Sergey; SANTANELLO JR., Joseph; SHEVLIAKOVA, Elena. The impact of anthropogenic land use and land cover change on regional climate extremes. **Nature Communications**, v. 8, p. 989, out. 2017. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-017-01038-w

FURLAN, Lucas Moreira.; ROSOLEN, Vania; SALLES, Jepherson; MOREIRA, César Augusto; FERREIRA, Manuel Eduardo; BUENO, Guilherme Taitson; COELHO, Carla Vanessa de Souza; MOUNIER, Stéphane. Natural superficial water storage and aquifer recharge assessment in Brazilian savanna wetland using unmanned aerial vehicle and geophysical survey. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v.8, n. 3, p. 224-244, mai. 2020. DOI: https://doi.org/10.1139/juvs-2020-0004

LACOMBE, Guillaume; DOUANGSAVANH, Somphasith; VONGPHACHANH, Sinxay; PAVELIC, Paul. Regional assessment of groundwater recharge in the lower Mekong River. **Hydrology**, vol. 4, n.4, 60, dez. 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/hydrology4040060

MACHADO, Ricardo Bomfim; AGUIAR, Ludmilla Moura de Souza; BUSTAMANTE, Mercedes. Why is it so easy to undergo devegetation in the Brazilian Cerrado? **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 22, n. 3, p. 209-212, jul/set. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2024.08.003

MADLALA, Tebogo; KANYERERE, Thokozani; OBERHOLSTER, Paul; XU, Yu. Application of multi - method approach to assess groundwater – surface water interactions, for catchment management**. International Journal of Environmental Science and Technology**, vol. 16, n. 5, p. 2215–2230, mai. 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-018-1819-3

MATTIUZI, Camila Dalla Porta; KIRCHHEIM, Roberto; COLLISCHONN, Walter; FAN, Fernando Mainardi. Estimativa de recarga subterrânea a partir da separação de escoamento de base na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (América do Sul). **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 285–300, fev. 2015. DOI: https://doi.org/10.14295/ras.v29i3.28487

NUNES, Elizon Dias; CASTRO, Selma Simões de. Degradação de fitofisionomias do Cerrado e impactos erosivos hídricos lineares no sudoeste de Goiás – Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 33, e.60606, ago. 2021. DOI: 10.14393/SN-v33-2021-60606

OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches; LEITE, Marcelo Boccia; MATTOS, Tiago; NEARING, Mark A.; SCOTT, Russel L.; XAVIER, Rafael de Oliveira; MATOS, Dalva Maria da Silva; WENDLAND, Edson. Grounwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian Cerrado. **Ecohydrology**, v. 10, n. 1, e1759, jan. 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/eco.1759

PEREIRA, Cássio Cardoso; KENEDY-SIQUEIRA, Walisson; MAIA, Lara Ribeiro; SPERANDEI, Vinícius da Fontoura; ARANTES-GARCIA, Lucas; FERNANDES, Stephannie; FERNANDES, Gabriela França Carneiro; CASTRO, Gislene Carvalho; RODRIGUES, Domingos de Jesus; SALM, Rodolfo; FEARNSIDE, Philip Martin. The Cerrado crisis review: highlighting threats and providing future pathways to save Brazil's biodiversity hotspot. **Nature Conservation**, v. 61, p. 29-70, mai. 2026. DOI: https://doi.org/10.3897/natureconservation.61.168273

ROSA, Rafael Mendes; FERREIRA, Vanderlei de Oliveira; BRITO, Jorge Luis Silva. Mapa de reconhecimento geológico da bacia do rio Uberabinha (MG): procedimento experimental utilizando coeficientes de concordância. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 70, p. 507-518, jun. 2019. DOI: https://doi.org/10.14393/RCG207042721

SALLA, Marcio Ricardo; ARQUIOLA, Javier Paredes; SOLERA, Abel; ÁLVAREZ, Joaquin Andreu; PEREIRA, Carlos Eugênio; FILHO, José Eduardo Alamy; OLIVEIRA, André Luiz. Sistema de suporte à decisão em recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Uberabinha, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 189-204, jan/mar. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p189-204

SANTOS, Ronaldo Medeiros dos; KOIDE, Sérgio. Avaliação da recarga de águas subterrâneas em ambiente de Cerrado com base em modelagem numérica do fluxo em meio poroso saturado. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 21, n. 2, p. 451–465, abr/jun. 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p451-465

SANTOS, Ronaldo Medeiros dos; KOIDE, Sérgio; TÁVORA, Bruno Esteves; ARAUJO, Daiana Lira de. Groundwater recharge in the Cerrado Biome, Brazil – A multi-method study at experimental watershed scale. **Water**, vol. 13, n. 1, 20p. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/w13010020

SOARES, Ângela Maria; SILVA, Rafael Tiago dos Santos; DANTAS, Rafael Almeida. A dinâmica hidrológica na bacia do alto curso do rio Uberabinha em Uberaba, Minas Gerais, Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, vol. 2, p. 1-17, jul/dez 2011.

Universidade Federal de Viçosa - UFV/ CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/ UFLA - Universidade Federal de Lavras / FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente (2010).

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA OBTIDA EM POÇOS TUBULARES LOCALIZADO NA ZONA RURAL DO MUNICÍPIO DE QUEIMADAS-PB

1 Edmilson Dantas da Silva Filho, 2 Cailane Barbosa Gomes Guerra, 3 Francisco de Assis da Silveira Gonzaga, 4 Aldeni Barbosa da Silva, 5 Pedro Lucas Nunes da Silveira, 6 Geraldo da Mota Dantas 7 Bruna Isabelly Gouveia Montenegro

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: edmilson.silva@ifpb.edu.br; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: cailane.guerra@gmail.com; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. e-mail: francisco.gonzaga@ifpb.edu.br 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,, e-mail: aldeni.silva@ifpb.edu.br 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: pedro.lucas@ifpb.edu.br 6 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: geraldo.dantas@ifpb.edu.br, 7 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail:bruna.isabelly@icloud.com

Palavras-chave: parâmetros; poços; potabilidade.

Resumo

A água é um recurso imprescindível para a manutenção da vida no planeta, quaisquer alterações nos seus parâmetros de qualidade e quantidade podem acarretar em sérias adversidades, tanto para o desenvolvimento socioeconômico quanto para a sanidade dos organismos que dela dependem (SANTOS, 2015) A monitorização da qualidade da água é crucial para garantir o fornecimento seguro à população, sendo importante analisar parâmetros como turbidez, pH e presença de coliformes fecais. Estudos realizados indicam a presença de nitritos em concentrações elevadas, sugerindo a necessidade urgente de ações para melhorar a qualidade da água e proteger a saúde pública. O presente trabalho teve como foco principal avaliar a potabilidade da água de poços tubulares localizado na zona rural do município de Queimadas-PB. O trabalho foi realizado na cidade de Queimadas que está localizada no Agreste Paraibano, sua população é de 25.428 habitante, possuindo área territorial estimada em 2.011,060 Km2 e densidade demográfica de aproximadamente de 12,13 habitantes por Km2 IBGE (2020). As análises foram realizadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB). As águas foram coletadas diretamente nos três poços tubulares em garrafa PET de dois litros e as análises foram realizadas no laboratório de Tratamento de água e efluentes do campus Campina Grande-PB. As análises físico-químicas foram realizadas seguindo o manual de análises físico-químicas indicado pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Concluiu-se que a água dos três poços tubulares localizados no município de Queimadas-PB não pode ser consumida pela população local sem que haja um tratamento prévio, tais como: dessalinização, troca iônica, osmose reversa, tendo em vista que nos parâmetros físico-químicos de condutividade elétrica (µS/cm), turbidez (NTU), cor (mg/L), dureza total (mg/L), cloreto (mg/L) e ferro (mg/L) encontrados foram superiores aos permitidos pela legislação Brasileira.

Introdução

A água é um recurso imprescindível para a manutenção da vida no planeta, quaisquer alterações nos seus parâmetros de qualidade e quantidade podem acarretar em sérias adversidades, tanto para o desenvolvimento socioeconômico quanto para a sanidade dos organismos que dela dependem (SANTOS, 2015).

Ela é um recurso natural essencial à sobrevivência dos seres vivos na terra. Isso é em razão de se constituir um componente bioquímico indispensável para a totalidade dos seres vivos, incluindo-se nessa percepção a raça humana. A água ocupa aproximadamente 75% da superfície da Terra, sendo o constituinte inorgânico mais abundante da matéria viva, integrando aproximadamente dois terços do corpo humano e atingindo até 98% para certos animais aquáticos, assim como, legumes, frutas e verduras. Constitui-se no solvente universal da maioria das substâncias, modificando-as e modificando-se em função destas (LIBÂNIO, 2010).

Entretanto, segundo Menezes e Fogaça (2017) mesmo sendo uma fonte abundante em nosso planeta, apenas uma pequena parcela é própria para consumo. A valorização das águas subterrâneas acontece a nível global, já que são fundamentais para a manutenção da vida na Terra.

As águas subterrâneas são reservas importantes por serem disponíveis a qualquer momento, além de oferecerem baixo custo de armazenamento, constituindo-se em alternativa às águas superficiais, sujeitas a alterações mais frequentes na sua qualidade natural. As águas subterrâneas também são fontes de abastecimento em tempos de estiagens para rios e outros mananciais superficiais como nascentes, lagos e banhados (LÖBLER e SILVA, 2015).

Nesse contexto, as águas subterrâneas têm sido tradicionalmente reconhecidas como uma das principais fontes de abastecimento devido às suas excelentes qualidades físicas e químicas, frequentemente adequadas ao consumo humano sem necessidade de tratamento prévio (BAIRD, 2011). Essa alternativa desempenha um papel crucial, sobretudo em áreas rurais e periféricas, onde a infraestrutura hídrica é limitada ou inexistente, garantindo o atendimento de necessidades básicas como consumo doméstico, preparo de alimentos e higiene.

As análises físico-químicas são fundamentais para caracterizar a qualidade da água, permitindo a identificação de suas propriedades e a avaliação de seu grau de pureza. Para ser considerada adequada ao consumo, a água de abastecimento deve ser

submetida a diversas análises, como a verificação da presença de microrganismos, substâncias tóxicas, cloretos, fluoretos, cor, turbidez, dureza e pH. Além disso, a água deve ser límpida, incolor, inodora, fresca e possuir sabor agradável (Richter; Netto, 2007; Libânio, 2010).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a qualidade da água dos poços tubulares localizados na zona rural do município de Queimadas-PB.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado na cidade de Queimadas que está localizada no Agreste Paraibano, sua população é de 25.428 habitante, possuindo área territorial estimada em 2.011,060 Km^2 e densidade demográfica de aproximadamente de 12,13 habitantes por Km^2 IBGE (2020). Froam realizados analises físico-químicas nas águas de três poços tubulares na zona rual do município de Queimadas-PB.

As análises foram realizadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB). As águas foram coletadas diretamente nos três poços tubulares em garrafa PET de dois litros e o estudo foi realizado no laboratório de tratamento de água e efluentes (TAER) do campus Campina Grande-PB. As análises físico-químicas foram realizadas seguindo o manual de análises físico-químicas indicado pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008).

Todas as análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram comparados com o que são preconizados pela portaria GM/MS de nº 888 de 04 de maio de 2021 do Ministério da Saúde e pela resolução de nº 396 de 3 de abril de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2008), bem como com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde para água destinada ao consumo humano.

Os parâmetros físico-químicos analisados foram: pH, condutividade elétrica (µS/cm), salinidade (mg/L), sólidos totais dissolvidos (ppm), alcalinidade (mg/L), dureza total (mg/L), dureza de cálcio (mg/L), dureza de magnésio (mg/L) e cloreto (mg/L). Todas as análises foram realizadas em triplicata, garantindo maior confiabilidade dos resultados.

A partir dessa análise, foi realizada uma avaliação dos potenciais riscos à saúde da população local, considerando especialmente a presença de contaminantes acima dos limites permitidos e seus possíveis efeitos tóxicos, como doenças neurológicas, cardíacas, câncer e problemas renais associados ao consumo de água contaminada.

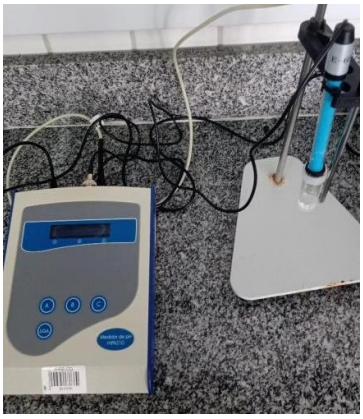


Figura 1: Medidor de pH, modelo mPA210, marca HANNA
Fonte: Dados da Pesquisa, 2025

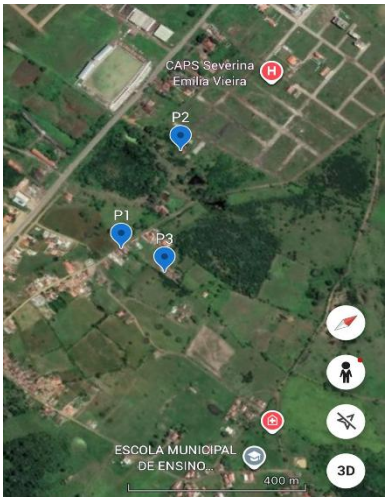


Figura 2: Mapa produzido no software Google Earth dos pontos de coletas das amostras
Fonte: Dados da Pesquisa, 2025

Resultados e Discussões

Tabela 1: Valores médios dos parâmetros físico-químicos das água dos três poços tubulares da zona rural do município de Queimadas PB.

Parâmetros	Poço 1	Poço 2	Poço 3	Unidades de Medida	VMP
Temperatura	24,5	25	25,5	°C	-
pH	7,20	7,15	7,20	-	6,0-9,5
Condutividade elétrica	2.125	2.100	2.124	µS/cm	1000
Turbidez	20	17,5	25	NTU	5
Cinzas	29,34	27,40	26,74	%	-
Sólidos Totais Dissolvidos	1.070	1.040	1.070	mg/L	1000
Salinidade	1.059,1	1.045,5	1.058,5	mg/L	-
Cor	135	175	150	uH	15
Dureza Total	870	810	845	mg/L	350
Dureza de Cálcio	330	280	245	mg/L	-
Dureza de Magnésio	540	530	600	mg/L	-
Cloreto	375	370	375	mg/L	250
Alcalinidade	90	85	93,5	mg/L	-
Ferro	79,9	90,1	89,0	mg/L	0,3
Níquel	2,0	1,0	1,0	mg/L	0,025
Fósforo	0,05	0,01	0,01	mg/L	0,05
Sulfato	15	10	10	mg/L	250

VMP: Valores Máximos Permitidos.
Fonte: Dados da Pesquisa, 2025

Os parâmetros físico-químicos analisados nas amostras de água dos poços tubulares (P_1, P_2 e P_3) foram comparados aos valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021) e pela resolução de nº 396 de 3 de abril de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2008). Os valores de pH apresentados na Tabela mantiveram-se dentro dos padres estabelecidos pela legislação Brasileira que varia de 6,0 a 9,5. Portanto em todos os pontos coletados, nos três poços tubulares, indicando conformidade deste parâmetro com os padrões de potabilidade e indicando águas de caráter ligeiramente básica.

A condutividade elétrica, para a qual não há valor máximo permitido definido, apresentou valores elevados nos três poços tubulares analisados. A turbidez apresentou valores superiores aos permitidos pela legislação brasileira, conforme observado na Tabela 1, refletindo maior presença de partículas em suspensão na água. A cor aparente apresentou valores elevados diferentes nos 3 poços tubulares analisados, com registros que ultrapassaram o valor máximo permitido em ambos os poços analisados, apontando comprometimento da qualidade estética da água nos três poços avaliados. Sua determinação permite obter uma estimativa rápida do conteúdo de sólidos de uma amostra. Em geral, níveis superiores a 100 µS/cm indicam ambientes impactados, pois à medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados, a condutividade aumenta (MORAIS, 2008).

A medida da dificuldade de um feixe de luz atravessar certa quantidade de água é chamada turbidez. Causada por matérias sólidas em suspensão (CORREIA, 2008). A turbidez apresentou média que variou de 17,5 a 25 NTU, não atendendo ao limite de 15 NTU da portaria GM/MS de nº 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), porém superando o valor mais restritivo de 5 NTU estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 de água para o consumo humano. Esse resultado indica a presença de partículas em suspensão que podem comprometer a desinfecção da água e afetar sua aceitação organoléptica.

A análise de cinzas apresentou valores médios que variaram de 26,76 a 29,34%, indicando a presença de sólidos minerais dissolvidos, o que pode estar relacionado ao elevado valor observado para a condutividade elétrica. Não há portaria ou resolução que estabeleça um limite máximo para o teor de cinzas na água potável, e a literatura científica ainda apresenta informações limitadas sobre esse parâmetro (BOLO et al., 2019). Os sólidos totais dissolvidos (SDT) apresentaram concentrações elevadas, com maiores valores para os poços (P_1 e P_1), conforme demonstrado na Tabela 1, atingindo ou ultrapassando o limite estabelecido pela legislação Brasileira em todas as amostras.

Em contrapartida, a salinidade é uma medida especial de STD baseada nas concentrações de sais oceânicos (FAY, [s.d]). A partir da salinidade que pode-se classificar as amostras de água, que devido os resultados obtidos, a água examinada tem classificação II, de acordo com a resolução de nº 357 de 17 de março de 2005 (CONAMA): "águas salobras: águas com salinidade igual ou inferior a 3%. Águas salobras da classe II podem ser destinadas à pesca amadora e à recreação de contato secundário, o que de fato ocorre no município de Soledade-PB.

A cor é um parâmetro de análise de água que está associada ao grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido a presença de STD. Embora a cor seja um aspecto estético da água, ela nem sempre estará relacionada a

problemas de contaminação. O parâmetro cor apresentou valores maiores do que o recomendado pela Portaria GM/MS n° 888/2021, que estabelece um valor de recomendação máxima de 15 uH. Isso indicam que os valores obtidos em laboratório (tabela 1) foram mais altos do que os recomendado pela legislação brasileira.

A dureza total também apresentou valores elevados em todos os três poços tubulares analisados, classificando a água como dura a muito dura, com registros próximos ou no limite máximo permitido, evidenciando elevada concentração de sais de cálcio e magnésio. Concernente à dureza da água, é a medida da capacidade da água de precipitar sabão, ou seja, nas águas que possuem sabões transformar-se em complexos insolúveis. Isso acontece devido, principalmente, pela presença de magnésio e cálcio. Surpreendentemente, a poluição de águas superficiais por atividades industriais são pouco significativas. As águas tratadas em estações convencionais apresentam dureza maior do que as águas brutas, devido ao uso de cal hidratada (CETESB, 2020). Os valores médios encontrados para o parâmetro dureza total está acima do permitidos pela legislação Brasileira que é de no máximo 350 mg/L (BRASIL, 2021).

O Cloro em sua forma de íon cloreto (Cl^-) é um dos principais ânions inorgânicos em águas naturais e residuárias (KAM, et al 2014). A partir do método Mohr é possível obter a determinação dos íons cloreto na água. Os teores de cloreto apresentaram valores elevados nos três poços analisados, conforme indicado na Tabela 1, com resultados muito acima dos valores máximo permitido pela portaria GM/MS de nº 888 de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021). De forma geral, os dados apresentados evidenciam pequenas variações entre os três poços analisados, com maior comprometimento da qualidade da água no poço (P_1), quando se observa maior concentração dos parâmetros físico-químicos analisados. Em valores baixos, o cloreto não representa risco à saúde, mas pode imprimir gosto salgado à água, provocando recusa ou repulsa ao consumo, também pode acelerar o processo de corrosão em tubulações de aço ou alumínio (QUEIROZ e OLIVEIRA, 2018).

A alcalinidade, que representa a capacidade da água de neutralizar ácidos (capacidade tamponante), não possui um valor máximo permitido (VMP) definido nas legislações de referência, mas é vital para a estabilidade do pH. Os valores apresentaram grande variação: 85 mg/L poço (P_2) a 93,5 mg/L Poço (P_3). O pico de alcalinidade coincide com o pH mais próximo da neutralidade (7,15), indicando um forte poder tamponante naquele momento, possivelmente devido à maior concentração de bicarbonatos e carbonatos.

O íon ferro, apresentou concentração crítica de 90,1 mg/L no poço tubular (P_2) e também apresentou valor médio nas três águas dos poços tubulares de 86,33 mg/L. Esses valores estão muito acima do valor permitido pela portaria GM/MS de nº 888 de de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde que é de 0,3 mg/L, porém estando dentro dos limites da resolução de nº 396 de 3 de abril de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente que é de 300 mg/L, conforme o Anexo 1 com maior probabilidade de ocorrências em águas subterrâneas. Embora não seja altamente tóxico em níveis moderados, o excesso de ferro pode causar problemas estéticos, cardíacos, pedras nos rins, entupimento de tubulações, manchas em roupas e favorecer a presença de microrganismos indesejáveis no sistema de abastecimento. O metal pesado níquel obtiveram valores dentro dos limites estabelecidos pela resolução de nº 396 de 3 de abril de 2005, que é de 20 mg/L em águas subterrâneas. O sulfato obteve valores médios dentro dos padrões exigidos pela portaria GM/MS de nº 888 de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021) e pela resolução de nº 396 de 3 de abril de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, que é de 250 mg/L.

Considerações Finais

Concluiu-se que as águas dos três poços tubulares localizado no município de Queimadas-PB não podem serem consumidas pela população local sem que haja um tratamento prévio, tais como: dessalinização, troca iônica, osmose reversa, tendo em vista que nos parâmetros físico-químicos condutividade elétrica (µS/cm), turbidez (NTU), cor (uH), dureza total (mg/L) e cloreto (mg/L) encontrados foram superiores aos permitidos pela legislação Brasileira. Esses achados reforçam a importância do monitoramento contínuo e da adoção de estratégias de gestão hídrica que considerem essas variações, de modo a assegurar o uso adequado e sustentável desses poços tubulares.

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB) pelo apoio institucional e pela disponibilidade de infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

BAIRD C; CANN, M. Química Ambiental. Em: Química Ambiental. 844p. 4ª Edição. 2011.

BRASIL. Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008. Brasília: **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, 2008.

BRASIL. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021.** Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BOLO, C. R. G. et al. **Análise físico-química da água utilizada para consumo humano em uma escola pública estadual do município de Campina Grande**. Campina Grande, 2019.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento Ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Orgs). Erosão e conservação dos solos: **conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

CARVALHO, A; DE P. ESTUDO DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NA BACIA DO AÇUDE SOLEDADE-PB. **Campina Grande,** 2010.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Água. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo.** 2006. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/Agua/relatorios/rios/rel_aguas_int_. CLEICK, P. H. Safeguarding our water: making every drop count. **Scientific American, New York,** v. 284, n. 2, p. 28-33, 2001.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas superficiais. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, Seção 1, págs. 58-63.

GENTRY-SHIELDS, J.; BARTRAM, J. Human health and the water environment: Using the DPSEEA framework to identify the SILVA, A.R. da & FONSECA, A.L.D'O. Eutrofização dos recursos hídricos driving forces of disease. **Science of the Total Environment**, v.468–469, p. 306–314, 2014.

FERREIRA, R; S; . Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte. **Dissertação de Mestrado.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

IBGE. **Características Gerais da População**. Resultados da Amostra. IBGE, 2020. Disponível em:https://cidades.ibge.gov.br.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos químicos e físicos para análises de alimentos.** 4ª ed. São Paulo: Versão eletrônica, 2008, 1020 p.

K. A. M.; et al. "Determinação de cloreto em água mineral comercializada na região de Teresina-PI". In: 54° CBQ (2014). ISBN 978-85-85905-10-1. Disponível em: https://www.abq.org.br/cbq/2014/trabalhos/4/4883-16591.html. Acesso em: 18/09/25.

LABARRÈRE, C. R.; MENEZES, B. D.; MELO, M. M. Avaliação dos teores de zinco em brânquias, carcaça, fígado e musculatura de diferentes espécies de peixes capturados no Rio São Francisco (MG, Brasil). **Revista Geonomos,** v. 20, n. 1, 2012.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Nova Palma, Rio Grande do Sul, Brasil. **Rev. Ambient. Água**, v. 10 n. 1. Taubaté, 2015.

MAGALHÃES JUNIOR, A. P. A. Situação do monitoramento das águas no Brasil: instituições e iniciativas. Porto Alegre/RS: ABRH **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol.5, nº3, jul/set. 2000, p.113-115. 2000.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portarias normativas que tratam de potabilidade de água para consumo humano**. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html.

MENEZES, P. O.; FOGAÇA, L. C. S. Qualidade da Água Consumida em Escolas Estaduais do Município de Vitória da Conquista – BA. **Id on Line Revista Multidisciplinar e de Psicologia**, 2017, vol.11, n.38, p.612-622. ISSN: 1981-1179.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. In: GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. da S.; MEDEIROS, S. de S.; GALVÃO, C. de O. (Editores). **Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas: Estudos e Aplicações.** Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas - BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. p. 02-27.

MORAIS, P. B. **Tratamento físico químico de efluentes líquidos.** Universidade de Campinas, 14p, 2008.

OMS - **ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE**. Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, 2017. Disponível em: https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/gdwq4/en/.

PARAÍBA - Governo do Estado da Paraíba; Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, **SECTMA;** Agenda Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA PERH-PB. **Plano estadual de recursos hídricos**: resumo executivo & atlas. Brasília. Consórcio TC/BR Concremat, 2006.

QUEIROZ, T. M.; OLIVEIRA, L. C. P. **Qualidade da água em comunidades quilombolas do Vão Grande, município de Barra do Bugres (MT)**. Engenharia Ambiental e Sanitária, v.23, n. 1, p. 173- 180, 2018.

RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. Situação da seca observada nas regiões Norte e Nordeste do Brasil em 2016. Brasília: **Inmet**, 2016. 8 f.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A. **Tratamento de água:** Tecnologia atualizada. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

RODRIGUES, M. C. A; A Problemática Hídrica em Área de Risco à Seca: o caso do município de Soledade-PB. 1998. **(Relatório de pesquisa).**

SANTOS, C. M. Uso de cascas de laranja como adsorvente de contaminantes no tratamento de água. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Sorocaba. Dissertação de Mestrado. 126f., 2015.

SILVA, M. B. R.; AZEVEDO, P. V.; ALVES, T. L. B. Análise da degradação ambiental no alto curso da bacia hidrográfica do rio Paraíba. **Bol. Goia. Geogr. (Online),** v. 34, n. 1, p. 35- 53. Goiânia, 2014.

TRATA BRASIL. Análise dos impactos na saúde e no sistema único de saúde decorrentes de agravos relacionados a um esgotamento sanitário inadequado dos 100 maiores municípios brasileiros no período 2008-2011. **Relatório Final**, 2015.

TUNDISI, J. G. Água no século XXI: enfrentando a escassez. São Carlos, **Editora Rima**, 2003.

WMO - WORLD **METEOROLOGICAL ORGANIZATION**. Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Genebra, 1997.

ESTUDO DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA CIDADE DE LAGOA SECA-PB: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E SEUS IMPACTOS NA SAÚDE PÚBLICA

1 Anny Gabrielly Rodrigues Silva 2 Edmilson Dantas da Silva Filho, 3 Cailane Barbosa Gomes Guerra, 4 Francisco de Assis da Silveira Gonzaga, 5 Aldeni Barbosa da Silva, 6 Geraldo da Mota Dantas

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail:annygabrielly7678@gmail.com; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: edmilson.silva@ifpb.edu.br; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. e-mail: cailane.guerra@gmail.com ; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,, e-mail: francisco.gonzaga@ifpb.edu.br 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: aldeni.silva@ifpb.edu.br pedro.lucas@ifpb.edu.br 6 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: geraldo.dantas@ifpb.edu.br,

Palavras-chave: parâmetros; poços; qualidade.

Resumo

As águas subterrâneas são reservas importantes por serem disponíveis a qualquer momento, além de oferecerem baixo custo de armazenamento, constituindo-se em alternativa às águas superficiais, sujeitas a alterações mais frequentes na sua qualidade natural. As águas subterrâneas também são fontes de abastecimento em tempos de estiagens para rios e outros mananciais superficiais como nascentes, lagos e banhados. O presente trabalho teve como foco principal avaliar a qualidade das águas de poços tubulares na cidade de Lagoa Seca-PB. O trabalho foi realizado na cidade de Lagoa Seca, que está localizada no Agreste Paraibano, com população é de 27.739 habitante, possuindo área territorial estimada em 109 Km^2 e densidade demográfica de aproximadamente de 255,6 habitantes por Km^2 IBGE (2022). As análises foram realizadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) campus Campina Grande-PB. As águas foram coletadas diretamente nos três poços tubulares em garrafa PET de dois litros e as análises foram realizadas no laboratório de tratamento de água e efluentes (LTAE) do campus Campina Grande-PB. As análises físico-químicas foram realizadas seguindo o manual de análises físico-químicas indicado pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Conclui-se que os resultados detectados com as análises físico-químicas das águas dos poços tubulares estão fora dos padrões permitido pela legislação Brasileira, portanto as águas analisadas não poderão serem utilizadas para o consumo humano, a não ser que seja realizado um tratamento através de métodos eficazes, como: dessalinização, filtração ou desmineralização, troca-iônica.

Introdução

No mundo, três milhões e meio de pessoas morrem por ano em consequência de problemas relacionados ao fornecimento inadequado de água, e somente a diarreia, doença relacionada à contaminação da água, provoca 2.195 óbitos de crianças diariamente (TRATA BRASIL, 2015). Esse quadro poderia ser evitado com a melhoria da gestão dos recursos hídricos, abastecimento de água potável, saneamento ambiental e medidas de higiene doméstica (GENTRY-SHIELDS; BARTRAM 2014).

A água é um recurso imprescindível para a manutenção da vida no planeta, quaisquer alterações nos seus parâmetros de qualidade e quantidade podem acarretar em sérias adversidades, tanto para o desenvolvimento socioeconômico quanto para a sanidade dos organismos que dela dependem (SANTOS, 2015). De acordo com SANDER *et al.* (2019) a relação das águas com as cidades é um fator primordial para o surgimento e desenvolvimento das mesmas, evidenciado pelas grandes civilizações da Idade Antiga estabelecidas às margens de grandes rios como é o caso dos rios Tigre e Eufrates na Mesopotâmia, e do Rio Nilo, no Egito. Contudo, a partir do século XIX, com o desenvolvimento industrial e o crescimento urbano, ocorreram mudanças significativas no que diz respeito a questões sociais, culturais e econômicas, propiciando a desvalorização e degradação dos corpos d'água urbanos, tornando o que outrora era fonte de abastecimento em locais decadentes e repositórios de dejetos industriais e domésticos.

No contexto do Semiárido Brasileiro (SAB), essa limitação é intensificada pelas condições climáticas adversas, caracterizadas por chuvas irregulares, altas taxas de evaporação e longos períodos de estiagem. Diante desse cenário, as águas subterrâneas destacam-se como alternativa estratégica para o abastecimento humano, sendo os poços tubulares amplamente utilizados por comunidades urbanas e rurais como fonte principal de água para consumo doméstico. Essa estratégia está alinhada às ações de convivência com o semiárido, que buscam soluções adaptadas às especificidades climáticas da região, em contraste com modelos tradicionais adotados em áreas mais úmidas (MACHADO, 2017).

Ela é um recurso natural essencial à sobrevivência dos seres vivos na terra. Isso é em razão de se constituir um componente bioquímico indispensável para a totalidade dos seres vivos, incluindo-se nessa percepção a raça humana. A água ocupa aproximadamente 75% da superfície da Terra, sendo o constituinte inorgânico mais abundante da matéria viva, integrando aproximadamente dois terços do corpo humano e atingindo até 98% para certos animais aquáticos, assim como, legumes, frutas e verduras. Constitui-se no solvente universal da maioria das substâncias, modificando-as e modificando-se em função destas (LIBÂNIO, 2010).

Adicionalmente, os reservatórios superficiais da região Nordeste têm apresentado níveis volumétricos críticos, em grande parte devido às elevadas temperaturas, que intensificam a evaporação da água em lagos e açudes. Esse cenário é agravado pelos baixos índices de precipitação registrados nos últimos anos e pela insuficiência de ações governamentais eficazes, configurando uma situação recorrente de vulnerabilidade hídrica na região (RAMOS e REBELLO, 2016).

As águas subterrâneas são reservas importantes por serem disponíveis a qualquer momento, além de oferecerem baixo custo de armazenamento, constituindo-se em alternativa às águas superficiais, sujeitas a alterações mais frequentes na sua qualidade natural. As águas subterrâneas também são fontes de abastecimento em tempos de estiagens para rios e outros mananciais superficiais como nascentes, lagos e banhados (LÖBLER e SILVA, 2015).

Nesse contexto, as águas subterrâneas têm sido tradicionalmente reconhecidas como uma das principais fontes de abastecimento devido às suas excelentes qualidades físicas e químicas, frequentemente adequadas ao consumo humano sem necessidade de tratamento prévio (BAIRD, 2011). Essa alternativa desempenha um papel crucial, sobretudo em áreas rurais e periféricas, onde a infraestrutura hídrica é limitada ou inexistente, garantindo o atendimento de necessidades básicas como consumo doméstico, preparo de alimentos e higiene.

As análises físico-químicas são fundamentais para caracterizar a qualidade da água, permitindo a identificação de suas propriedades e a avaliação de seu grau de pureza. Para ser considerada adequada ao consumo, a água de abastecimento deve ser submetida a diversas análises, como a verificação da presença de microrganismos, substâncias tóxicas, cloretos, fluoretos, cor, turbidez, dureza e pH. Além disso, a água deve ser límpida, incolor, inodora, fresca e possuir sabor agradável (LIBÂNIO, 2010).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo estudar a qualidade de água subterrâneas localizados na cidade de Lagoa Seca-PB.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado na cidade de Lagoa Seca-PB que está localizada no Agreste Paraibano, sua população é de 27.739 habitante, possuindo área territorial estimada em 109 Km^2 e densidade demográfica de aproximadamente de 255,6 habitantes por Km^2 IBGE (2022). Froam realizados analises físico-químicas nas águas de três poços tubulares (P_1, P_2 e P_3) estão localizados no sitio Guabiraba na zona rural do município de Lagoa Seca-PB.

As análises foram realizadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB). As águas foram coletadas diretamente nos três poços tubulares em garrafa PET de dois litros e o estudo foi realizado no laboratório de tratamento de água e efluentes (TAER) do campus Campina Grande-PB. As análises físico-químicas foram realizadas seguindo o manual de análises físico-químicas indicado pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008).

Todas as análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram comparados com o que são preconizados pela portaria GM/MS de nº 888 de 04 de maio de 2021 do Ministério da Saúde e pela resolução de nº 396 de 3 de abril de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2008), bem como com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde para água destinada ao consumo humano.

Os parâmetros físico-químicos analisados foram: pH, condutividade elétrica (µS/cm), turbidez (NTU), salinidade (mg/L), sólidos totais dissolvidos (ppm), alcalinidade (mg/L), dureza total (mg/L), dureza de cálcio (mg/L), dureza de magnésio (mg/L) e cloreto (mg/L). Todas as análises foram realizadas em triplicata, garantindo maior confiabilidade dos resultados.

A partir dessa análise, foi realizada uma avaliação dos potenciais riscos à saúde da população local, considerando especialmente a presença de contaminantes acima dos limites permitidos, como doenças cardíacas, câncer e problemas renais associados ao consumo de água contaminada. Os parâmetros foram analisados conforme mostra na Tabela 1 a seguir, com a explicitação dos protocolos de medição utilizados.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos analisados no estudo dos parâmetros físico-químicos.

Parâmetros	Técnicas	Referência
pH	Imersão direta	IAL (2008)
Temperatura (°C)	Imersão direta	IAL (2008)
Condutividade elétrica (µS/cm)	Imersão direta	IAL (2008)
Turbidez	Imersão direta	IAL (2008)
Percentual de cinzas (%Cz)	Imersão direta	IAL (2008)
Sólidos Totais Dissolvidos	Imersão direta	IAL (2008)
Cor aparente (uH)	Imersão direta	IAL (2008)
Dureza total (mg/L $CaCO_3$)	Titolumetria	IAL (2008)
Dureza de cálcio (mg/L)	Titolumetria	IAL (2008)
Dureza de magnésio (mg/L)	Titolumetria	IAL (2008)
Cloreto (mg/L)	Titolumetria	IAL (2008)
Alcalinidade (mg/L)	Titolumetria	IAL (2008)

Alguns parâmetros necessitam de análise imediata em campo, no local da coleta da amostra, tais como: pH e temperatura (°C), outros podem ser realizados posteriormente. A Tabela 2 a seguir, mostram os tempos máximos permitidos para cada análise, com o objetivo de se obter um resultado seguro e confiável.

Tabela 2. Coleta e preservação de amostras para análises físico-químicas.

Parâmetros	Recipientes	Volume mínimo (mL)	Preservação	Tempo máximo
pH	Vidro ou Polietileno	200	Análise imediata	24h
Temperatura (°C)	Vidro ou Polietileno	200	Análise imediata	24h
Alcalinidade (mg/L)	Vidro ou Polietileno	200	Refrigerar	24h/14d
Dureza total (mg/L $CaCO_3$)	Vidro ou Polietileno	100	HNO_3 pH < 2	6 meses
Dureza de cálcio (mg/L)	Vidro ou Polietileno	100	HNO_3 pH < 2	6 meses
Dureza de magnésio (mg/L)	Vidro ou Polietileno	100	HNO_3 pH < 2	6 meses
Cloreto (mg/L)	Vidro ou Polietileno	100	Não requer	7 dias
Cor aparente (uH)	Vidro ou Polietileno	500	Refrigerar	24h
Condutividade elétrica (µS/cm)	Vidro ou Polietileno	200	Refrigerar	24h/7d
Percentual de cinzas (%Cz)	Vidro ou Polietileno	200	Refrigerar	24h/7d
Sólidos Totais Dissolvidos (ppm)	Vidro ou Polietileno	200	Refrigerar	24h/7d

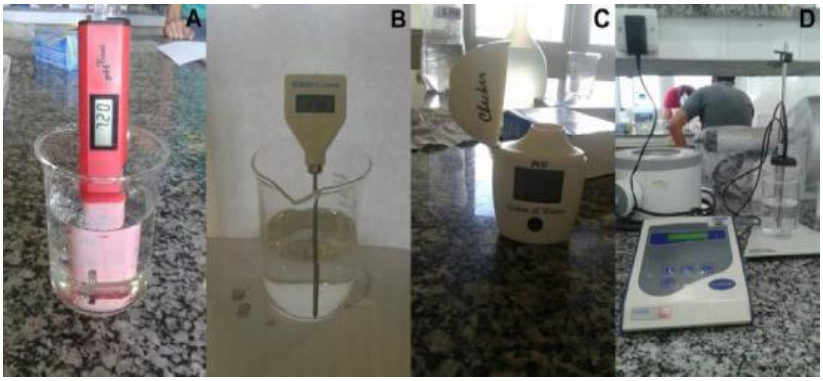


Figura 1: A. pHmetro digital portátil; B. Termômetro digital (modelo Hl 98501-1); C. Calorímetro digital (modelo HI 727); D. Condutivímetro portátil (Lutron, modelo CD–4303) todos da marca HANNA
Fonte: Dados da Pesquisa, 2025

Resultados e Discussões

Tabela 3: Valores médios dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas da cidade de Lagoa Seca: PB.

Parâmetros	Poço 1	Poço 2	Poço 3	Unidades de Medida	VMP
pH	8,20	8,05	8,20	-	6,0-9,5
Condutividade elétrica	2.750	2.160	2.625	µS/cm	1000
Turbidez	10	17,5	15	NTU	5
Cinzas	5,334	6,401	6,224	%	-
Sólidos Totais Dissolvidos	1.370	1.510	1.570	mg/L	1000
Salinidade	1.402,03	1.078	1.332,8	mg/L	-
Cor	85	89	85	uH	15
Dureza Total	470	515	465	mg/L	350
Dureza de Cálcio	180	150	165	mg/L	-
Dureza de Magnésio	290	365	300	mg/L	-
Cloreto	1.075	990	1.050	mg/L	250
Alcalinidade	190	175	188	mg/L	-
Temperatura	25	25	25	ºC	-

VMP: Valores Máximos Permitidos.
Fonte: Dados da Pesquisa, 2025

Os parâmetros físico-químicos analisados nas amostras de água dos poços tubulares (P_1, P_2 e P_3) foram comparados aos valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021) e pela resolução de nº 396 de 3 de abril de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2008). Os valores de pH apresentados na Tabela mantiveram-se dentro dos padres estabelecidos pela legislação Brasileira que varia de 6,0 a 9,5. Portanto em todos os pontos coletados, nos três poços tubulares, indicando conformidade deste parâmetro com os padrões de potabilidade e indicando águas de caráter ligeiramente básica. Os resultados médios obtidos das análises, qualificaram o potencial hidrogeniônico (pH) da água como básico (8,15) devido à apresentação de um valor > 7. Esse parâmetro indica se uma

determinada solução aquosa exibe um caráter ácido (< 7), alcalino (> 7) ou neutro (= 7). Águas com valores de pH ácido tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais e paredes de concreto, acarretando sobre essas os chamados salitre e em pH alcalino tende a formar incrustações (FUNASA, 2009).

A condutividade elétrica, para a qual não há valor máximo permitido definido, apresentou valores elevados nos três poços tubulares analisados. A turbidez apresentou valores superiores aos permitidos pela legislação brasileira, conforme observado na Tabela 3, refletindo maior presença de partículas em suspensão na água. A cor aparente apresentou valores elevados diferentes nos 3 poços tubulares analisados, com registros que ultrapassaram o valor máximo permitido em ambos os poços analisados, apontando comprometimento da qualidade estética da água nos três poços avaliados. Sua determinação permite obter uma estimativa rápida do conteúdo de sólidos de uma amostra. Em geral, níveis superiores a 100 µS/cm indicam ambientes impactados, pois à medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados, a condutividade aumenta (MORAIS, 2008).

A medida da dificuldade de um feixe de luz atravessar certa quantidade de água é chamada turbidez. Causada por matérias sólidas em suspensão (CORREIA, 2008). A turbidez apresentou maior valor no poço (P_2) de 17,5 a 25 NTU, não atendendo ao limite de 15 NTU da resolução nº 396 de 3 de abril de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2008), porém superando o valor mais restritivo de 5 NTU estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 de água para o consumo humano. Esse resultado indica a presença de partículas em suspensão que podem comprometer a desinfecção da água e afetar sua aceitação organoléptica.

A análise de cinzas apresentou valores médios que variaram de 5,33 a 6,40%, indicando a presença de sólidos minerais dissolvidos, o que pode estar relacionado ao elevado valor observado para a condutividade elétrica. Não há portaria ou resolução que estabeleça um limite máximo para o teor de cinzas na água potável, e a literatura científica ainda apresenta informações limitadas sobre esse parâmetro (BOLO et al., 2019). Os sólidos totais dissolvidos (SDT) apresentaram concentrações elevadas, com maiores valores para os poços (P_2 e P_3), conforme demonstrado na Tabela 1, atingindo ou ultrapassando o limite estabelecido pela legislação Brasileira em todas as amostras.

Em contrapartida, a salinidade é uma medida especial de STD baseada nas concentrações de sais oceânicos (FAY, [s.d]). A partir da salinidade que pode-se classificar as amostras de água, que devido os resultados obtidos, a água examinada tem classificação II, de acordo com a resolução de nº 396 de 3 de abril de 2008 (CONAMA): "águas salobras: águas com salinidade igual ou inferior a 3%. Águas salobras da classe II podem ser destinadas à pesca amadora e à recreação de contato secundário, o que de fato ocorre no município de Soledade-PB.

A cor é um parâmetro de análise de água que está associada ao grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido a presença de STD. Embora a cor seja um aspecto estético da água, ela nem sempre estará relacionada a problemas de contaminação. O parâmetro cor apresentou valores maiores do que o recomendado pela Portaria GM/MS n° 888/2021, que estabelece um valor de recomendação máxima de 15 uH. Isso indicam que os valores obtidos em laboratório (tabela 1) foram mais altos do que os recomendado pela legislação brasileira.

A dureza total também apresentou valores elevados em todos os três poços tubulares analisados, classificando a água como dura a muito dura, com registros próximos ou no limite máximo permitido, evidenciando elevada concentração de sais de cálcio e magnésio. Concernente à dureza da água, é a medida da capacidade da água de precipitar sabão, ou seja, nas águas que possuem sabões transformar-se em complexos insolúveis. Isso acontece devido, principalmente, pela presença de magnésio e cálcio. Surpreendentemente, a poluição de águas superficiais por atividades industriais são pouco significativas. As águas tratadas em estações convencionais apresentam dureza maior do que as águas brutas, devido ao uso de cal hidratada (CETESB, 2020). Os valores médios encontrados para o parâmetro dureza total está acima do permitidos pela legislação Brasileira que é de no máximo 350 mg/L (BRASIL, 2021).

Em relação à dureza de cálcio e magnésio as amostras contém elevado teor desses sais. Embora pareçam contraditórios, estudos apontam um possível efeito protetor da dureza do Cálcio e Magnésio, frente a patologias como câncer e doenças cardiovasculares (JORDAL *et al.*, 2003). Ademais, há indícios que o consumo de água com altos níveis de Cálcio, pode reduzir o risco de desenvolvimento e surgimento de pedras na urina produzida por Oxalato de Cálcio (SIENER *et al.,* 2004).

O Cloro em sua forma de íon cloreto (Cl^-) é um dos principais ânions inorgânicos em águas naturais e residuárias (KAM, et al 2014). A partir do método Mohr é possível obter a determinação dos íons cloreto na água. Os teores de cloreto apresentaram valores elevados nos três poços analisados, conforme indicado na Tabela 1, com resultados muito acima dos valores máximo permitido pela portaria GM/MS de nº 888 de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021). De forma geral, os dados apresentados evidenciam pequenas variações entre os três poços analisados, com maior comprometimento da qualidade da água no poço (P_1), quando se observa maior concentração dos parâmetros físico-químicos analisados. Em valores baixos, o cloreto não representa risco à saúde, mas pode imprimir gosto salgado à água, provocando recusa ou repulsa ao consumo, também pode acelerar o processo de corrosão em tubulações de aço ou alumínio (QUEIROZ e OLIVEIRA, 2018).

A alcalinidade, que representa a capacidade da água de neutralizar ácidos (capacidade tamponante), não possui um valor máximo permitido (VMP) definido nas legislações de referência, mas é vital para a estabilidade do pH. Os valores apresentaram grande variação: 175 mg/L poço (P_2) a 190 mg/L Poço (P_1). O pico de alcalinidade coincide com o pH mais próximo da neutralidade (7,15), indicando um forte poder tamponante naquele momento, possivelmente devido à maior concentração de bicarbonatos e carbonatos. Segundo (MORAIS, 2008), esse parâmetro está intimamente associado ao pH e indica que tais amostras apresentam a alcalinidade de bicarbonatos (pH entre 4,5 e 8,2). (GIAMPÁ & GONÇALES, 2006) estabelecem como valor máximo para alcalinidade de bicarbonatos 250 mg/L, sendo assim essa água poderá ser utilizada sem problemas para a saúde, quanto a esse parâmetro

Considerações Finais

Conclui-se que os resultados detectados com as análises físico-químicas das águas dos poços tubulares estão fora dos padrões permitido pela legislação Brasileira, portanto as águas analisadas não poderão serem utilizadas para o consumo humano, a não ser que seja realizado um tratamento através de métodos eficazes, como: dessalinização, filtração ou desmineralização, troca-iônica.

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB) pelo apoio institucional e pela disponibilidade de infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

BAIRD C; CANN, M. Química Ambiental. Em: Química Ambiental. 844p. 4ª Edição. 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente.** Resolução Conama nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 7 de abril de 2008.

BRASIL. Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008. Brasília: **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, 2008.
BRASIL. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021.** Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BOLO, C. R. G. et al. **Análise físico-química da água utilizada para consumo humano em uma escola pública estadual do município de Campina Grande**. Campina Grande, 2019.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento Ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Orgs). Erosão e conservação dos solos: **conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

CARVALHO, A; DE P. ESTUDO DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NA BACIA DO AÇUDE SOLEDADE-PB. **Campina Grande,** 2010.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Água. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo.** 2006. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/Agua/relatorios/rios/rel_aguas_int_.
CLEICK, P. H. Safeguarding our water: making every drop count. **Scientific American, New York,** v. 284, n. 2, p. 28-33, 2001.

GENTRY-SHIELDS, J.; BARTRAM, J. Human health and the water environment: Using the DPSEEA framework to identify the SILVA, A.R. da & FONSECA, A.L.D'O. Eutrofização dos recursos hídricos driving forces of disease. **Science of the Total Environment**, v.468–469, p. 306–314, 2014.

GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALVES, V. G. Orientações para utilização de águas subterrâneas no estado de São Paulo. Associação brasileira de águas subterrâneas. 40p, 2006.

EJODRAL-SEGADO, A. et al. Magnesium and calcium contents in foods from se Spain: influencing factors and estimation of daily dietary intakes. **Sci Total Environ,** 312:47-58 2003.

FUNASA. Ministério da Saúde. **Manual prático de análise de água.** 3ed. 144p. Brasília, 2009.

FERREIRA, R; S; . Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte. **Dissertação de Mestrado.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

IBGE. **Características Gerais da População**. Resultados da Amostra. IBGE, 2022. Disponível em:https://cidades.ibge.gov.br.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos químicos e físicos para análises de alimentos.** 4ª ed. São Paulo: Versão eletrônica, 2008, 1020 p.

K. A. M.; et al. "Determinação de cloreto em água mineral comercializada na região de Teresina-PI". In: 54° CBQ (2014). ISBN 978-85-85905-10-1. Disponível em: https://www.abq.org.br/cbq/2014/trabalhos/4/4883-16591.html. Acesso em: 18/09/25.

LABARRÈRE, C. R.; MENEZES, B. D.; MELO, M. M. Avaliação dos teores de zinco em brânquias, carcaça, fígado e musculatura de diferentes espécies de peixes capturados no Rio São Francisco (MG, Brasil). **Revista Geonomos,** v. 20, n. 1, 2012.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Nova Palma, Rio Grande do Sul, Brasil. **Rev. Ambient. Água**, v. 10 n. 1. Taubaté, 2015.

MACHADO, T. T. V. Qualidade da água de chuva armazenada em cisternas de placas e de polietileno no semiárido do estado da Paraíba. 283f. **Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) –** Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

MAGALHÃES JUNIOR, A. P. A. Situação do monitoramento das águas no Brasil: instituições e iniciativas. Porto Alegre/RS: ABRH **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol.5, nº3, jul/set. 2000, p.113-115. 2000.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portarias normativas que tratam de potabilidade de água para consumo humano**. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. In: GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. da S.; MEDEIROS, S. de S.; GALVÃO, C. de O. (Editores). **Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas: Estudos e Aplicações.** Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas - BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. p. 02-27.

MORAIS, P. B. **Tratamento físico químico de efluentes líquidos.** Universidade de Campinas, 14p, 2008.

OMS - **ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE**. Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, 2017. Disponível em: https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/gdwq4/en/.

PARAÍBA - Governo do Estado da Paraíba; Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, **SECTMA;** Agenda Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA PERH-PB. **Plano estadual de recursos hídricos**: resumo executivo & atlas. Brasília. Consórcio TC/BR Concremat, 2006.

QUEIROZ, T. M.; OLIVEIRA, L. C. P. **Qualidade da água em comunidades quilombolas do Vão Grande, município de Barra do Bugres (MT)**. Engenharia Ambiental e Sanitária, v.23, n. 1, p. 173- 180, 2018.

RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. Situação da seca observada nas regiões Norte e Nordeste do Brasil em 2016. Brasília: **Inmet**, 2016. 8 f.

RODRIGUES, M. C. A; A Problemática Hídrica em Área de Risco à Seca: o caso do município de Soledade-PB. 1998. **(Relatório de pesquisa).**

SANDER, R. FERREIRA, Y. C., MAURO, S. (2019). Áreas urbanas em beira d`água: análise da integração dos Açudes Velho e de Bodocongó com a Cidade de Campina Grande, PB.

SANTOS, C. M. Uso de cascas de laranja como adsorvente de contaminantes no tratamento de água. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Sorocaba. **Dissertação de Mestrado**. 126f., 2015.

SIENER, R.; JAHNEN, A.; HESSE, A. Influence of a mineral water rich in calcium, magnesium and bicarbonate on urine composition and the risk of calcium oxalate crystallization. **Eur J Clin Nutr**, nº 58, p.270-276, 2004.

SILVA, M. B. R.; AZEVEDO, P. V.; ALVES, T. L. B. Análise da degradação ambiental no alto curso da bacia hidrográfica do rio Paraíba. **Bol. Goia. Geogr. (Online),** v. 34, n. 1, p. 35- 53. Goiânia, 2014.

TRATA BRASIL. Análise dos impactos na saúde e no sistema único de saúde decorrentes de agravos relacionados a um esgotamento sanitário inadequado dos 100 maiores municípios brasileiros no período 2008-2011. **Relatório Final**, 2015.

TUNDISI, J. G. Água no século XXI: enfrentando a escassez. São Carlos, **Editora Rima**, 2003.

WMO - WORLD **METEOROLOGICAL ORGANIZATION**. Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Genebra, 1997.

PROPOSED ALTERNATIVE METHOD FOR REMOVING IRON FROM GROUNDWATER

1 Daniela da Cruz Fidalgo, 2 Hellyne Santos da Silva, 3 Ivan Lendel Azevedo de Castro, 4 Eliane Castro Coutinho, 5 Helio Raymundo Ferreira Filho, 6 Daniel Nascimento e Silva, 7 José Ciro Jardim de Figueiredo, 8 Lucy Anne Cardoso Lobão Gutierrez

1 Universidade do Estado do Pará, e-mail:dfidalgo46@gmail.com; 2 Universidade Federal do Pará, e-mail: engenheirahellynesantos@gmail.com; 3 Universidade do Estado do Pará, e-mail: ivan.lendelazevedo@gmail.com; 4 Universidade do Estado do Pará, e-mail: elianecoutinho@uepa.br; 5 Universidade do Estado do Pará, e-mail: helio.ferreira@uepa.br; 6 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, e-mail: danielnss@gmail.com; 7 Universidade Federal do Semi-Árido, e-mail: ciro.figueiredo@ufersa.edu.br; 8 Universidade do Estado do Pará, e-mail: lucyannegutierrez@uepa.br

Keywords: Filtration system; Groundwater treatment; Iron removal.

Abstract

This study evaluated iron removal from groundwater using a low-cost filtration system in the Metropolitan Region of Belém, Brazil. Groundwater in the area presents elevated iron concentrations due to geological and hydrogeochemical conditions, often exceeding drinking water standards. A pilot system composed of a PVC filter with sand and gravel as filter media was installed and operated under controlled conditions. Raw water with an average iron concentration of 1.21 mg/L was subjected to filtration, and samples were analyzed before and after treatment. Results showed that the filtration system was generally ineffective, as most samples did not meet the maximum permissible value of 0.3 mg/L established by Brazilian legislation. Only one sample reached acceptable levels under specific operating conditions. The findings indicate that simple filtration alone is insufficient for consistent iron removal, highlighting the influence of operational parameters such as water depth and filtration efficiency. The study suggests the need for improved treatment approaches, including oxidation processes and optimized filtration systems, to ensure compliance with drinking water standards. These results contribute to the understanding of iron removal in groundwater treatment and support the development of more effective and accessible technologies.

Introduction

Among the eight most abundant chemical elements in the Earth's crust, iron ranks fourth, accounting for about 5% by mass. The other elements are oxygen (46.6%), silicon (26.72%), aluminum (8.13%), calcium (3.63%), sodium (2.83%), potassium (2.59%), and magnesium (2.09%) (Duarte, 2019). These elements account for approximately 97.59% of the Earth's crust by mass. It can therefore be inferred that the Earth's crust is composed primarily of oxygen compounds in the form of oxides, hydroxides, and aluminosilicates (Moruzzi and Reali, 2012). According to the WHO (1996), iron and manganese concentrations in surface and groundwater sources can reach values of up to 50 mg/L and 1.3 mg/L, respectively, in the form of ions or complexed with Dissolved Organic Matter (DOM).

Iron and manganese ions, commonly found in groundwater, originate from the most abundant materials in the Earth's crust. Iron present in water can be in the +2 or +3 oxidation state, with the ferrous ion (Fe+2) being more soluble than the ferric ion (Fe+3). Thus, the problems that iron causes in water should be attributed primarily to the ferrous ion (Madeira, 2023). Excessive concentrations of iron can produce harmful effects such as imparting taste and odor to the water, causing stains on clothing and sanitary fixtures, deposits in pipes (which can cause blockages and reduced flow), and scale buildup in boilers and cooling systems (Lima, 2006).

The treatment of water containing iron involves two main interdependent steps: oxidation and subsequent filtration. Oxidation can be achieved through aeration or chlorination; filtration can be carried out using a sand and/or carbon filter (Madeira, 2003; Marcelino *et al.,* 2017).

Thus, since a significant portion of the population relies on private wells for self-supply, and the water collected from these wells generally contains iron levels higher than those established in Ordinance GM888/2021, it is of fundamental importance to conduct research aimed at defining operational parameters for water treatment systems designed to remove iron, taking into account the characteristics of regional water sources. In the Metropolitan Region of Belém (PA), groundwater often presents high iron concentrations exceeding drinking water standards, compromising its use for human consumption and other purposes. This phenomenon is mainly associated with the geological characteristics and hydrogeochemical conditions of Amazonian aquifers, which favor iron dissolution, as well as anthropogenic influences related to land use and occupation (Vieira *et al*., 2020; Silva, 2023).

This study aims to evaluate the removal of iron through a filtration system, analyzing its efficiency under defined operational conditions. The research seeks to assess the system's performance by considering parameters that influence the filtration process, contributing to the understanding and optimization of iron removal in water treatment.

Materials and Methods

The study was conducted at the underground well of the Verdejante Unit of the Pará Sanitation Company (COSANPA), in the Águas Lindas neighborhood of the Belém Metropolitan Area. The water from the well belonging to the Unit was used in this study because it has a high iron concentration (1,2 mg/l). The filtration system was installed on the Unit's premises.

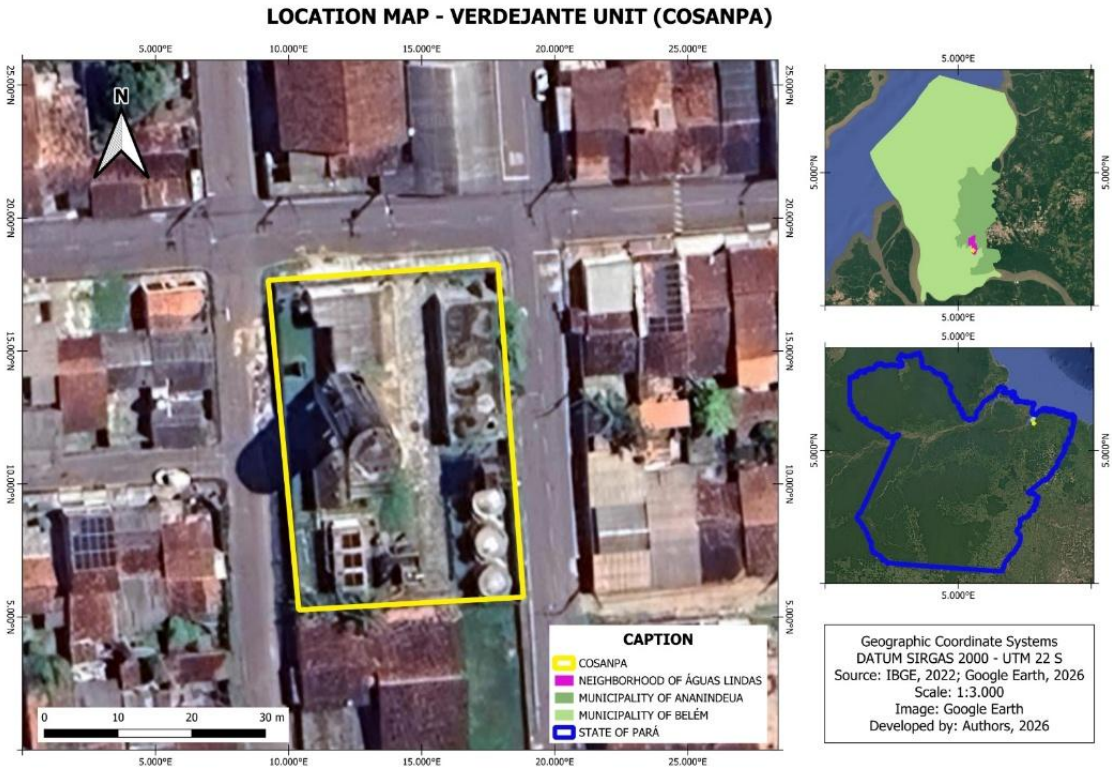


Figure 1: Map showing the location of the study area.
Source: Authors (2026)

This study was descriptive-exploratory in nature. According to Gil (2010), exploratory research aims to provide a better understanding of the problem to clarify it or to formulate hypotheses; descriptive research, on the other hand, seeks to describe the characteristics of a given population or phenomenon, or to establish relationships between variables.

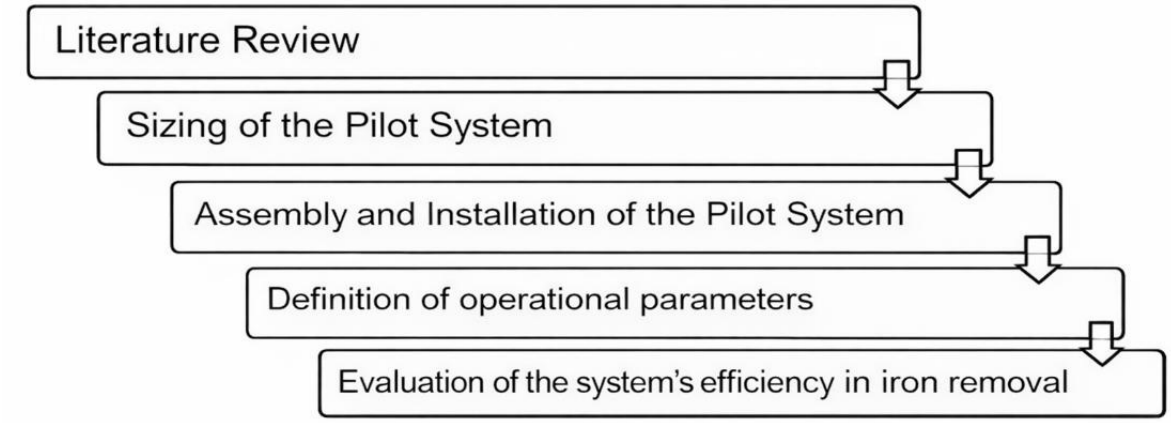


Figure 2: presents the stages of the research.
Source: Authors (2026)

Description of the Water Treatment System (WTS)

The pilot system used in the study consists of a filter made of PVC, containing a filter medium formed by layers of sand and gravel, and monitoring equipment. The water used in the tests comes from the well belonging to the concessionaire that supplies the Unit (Figure 3).



Figure 3: Water Treatment System (WTS).
Source: Authors (2026)

Sizing and Operation of the WTS

The calculations and parameters used to size the WTS units, as well as the system's operating mode, were categorized into: treatment flow rate, piping, and filtration.

- **Treatment flow rate**
  Two initial parameters were considered for the sizing of the STA: filter diameter and filtration rate. The filtration rate was 180 l/day, as established in NBR 12216/92 for single-layer filters. Using a filter diameter of 200 mm, the resulting nominal flow rate was 0.065 l/s; the following equation was used for this calculation (Richter and Azevedo Neto, 2007).

  $$q = \frac{Q}{A} \qquad (01)$$

  Where:
  q – Filtration rate ($m^3.m^2$/dia)
  Q – Nominal flow rate (m^3/s)
  A – Filter area (m^2)

- **The piping system**
  The piping system was constructed using 50-mm-diameter weldable PVC, as shown in Figure 3 above. The purpose of this piping was to convey the treated water through the filter.

- **Filter**
  The filter was constructed of PVC with a diameter of 200 mm and designed to operate at a filtration rate of 180 liters per day. As filter media, 10 cm of fine sand and 10 cm of gravel were used, and their efficiency was analyzed. This left 80 cm of free space at the top. The filter was operated at a constant flow rate/filtration rate using a downward flow driven by gravity, in which the filtered water drained from the smaller particles to the larger ones in the filter bed.

Collection and Analysis of Samples

The Hi702 Copper High Iron Checker Test, shown in Figure 4, was used to collect and analyze the samples, with results obtained in just a few minutes. The samples were analyzed both before and after undergoing the filtration process in order to observe any differences in the results.

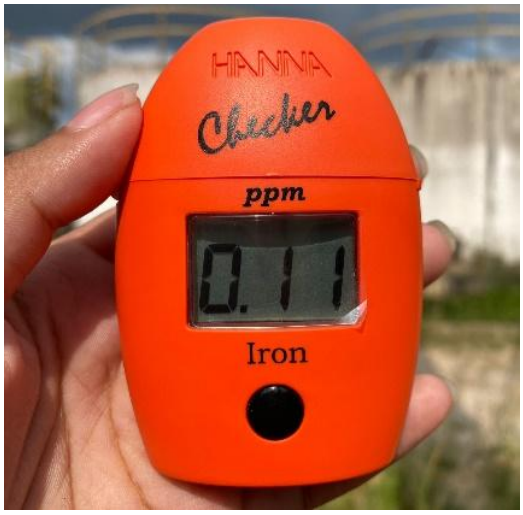


Figure 4: Hi702 Copper High Iron Tester.
Source: Authors (2026)

Results and Discussion

First, a pre-operation of the system was conducted to define the operating parameters. Once the filtration runs were defined, the number of samples to be analyzed was established, considering collections at one-hour intervals. Next, raw water samples were collected for iron analysis. Subsequently, the system was operated, samples were collected and analyzed, and the efficiency of the proposed treatment was determined. In total, there were five samples: one of raw water and the rest already filtered by the system.

Filtration runs were performed to commission the system. The filter was operated at an inflow rate of 3.9 L/min, in accordance with the design specifications and equivalent to the rate established by NBR 12216/92, at a rate of 180 ($m^3.m^2$/day).

The tap was opened to allow water to flow through the filter in a downward direction, passing through the filter bed and exiting filtered through a lower opening. Initially, it was determined that the water level should reach a maximum head loss of 0.8 m. However, the maximum head loss reached in one of the tests was 0.74 m over a period of 7 hours and 22 minutes. Thus, the filter's operating time was monitored and the water level measured every hour until the water reached the maximum pressure drop of 0.74 m, as shown in Figure 5.



Figure 5: Filter with a full filtration path.
Source: Authors (2026)

Pressure drop was monitored every hour of operation, resulting in an average duration of 7 hours and 21 minutes for the two filtration runs. Figure 6 shows a graph of the performance of filtration runs 1 and 2, along with the corresponding progression of the pressure drop over time.

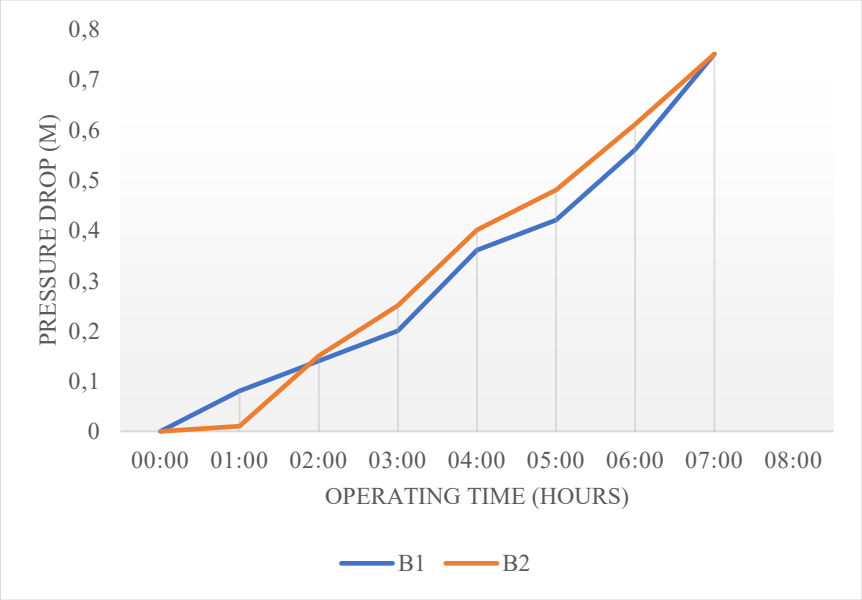


Figure 6: Head loss in filtration runs.
Source: Authors (2026)

Initially, it was planned that the filtration run would reach a water depth of 0.8 m. Based on a review of the literature and on the research by Silva (2023), it was determined that the runs could last a maximum of 4 to 5 hours. However, the runs exceeded 7 hours, which complicated the initial planning, since spending more time at the COSANPA facility was not feasible. Therefore, an average of 7 hours and 21 minutes was chosen for the filtration runs.

When a certain water level was reached, the filter underwent backwashing, that is, the filter bed was cleaned. Bed 1 (B1) reached a water level of 0.7 m, at which point the filter was backwashed. The same occurred for Bed 2 (B2) when it reached a water level of 0.74 m. For backwashing, a 50 mm pipe connected to the well's pumping system was used to clean the filter at a flow rate of 0.75 L/s for 7 minutes, in an upward direction, opposite to the filtration process.

To determine the iron content in the raw well water at the COSANPA facility, two water samples were collected at the outlet on two separate days (September 28th and 30th, 2024). The analyses were performed on the days the samples were collected using the Hi702 Copper High Iron Checker Test. Subsequently, iron levels of approximately 1.21 mg/L were detected, as shown in Table 1.

Parameter	Sample 1	Sample 2	MAP*
Ferro (mg/L)	1,21	1,21	0,3

*Maximum amount permitted by Administrative Order No. 888/2021
Table 1: Iron levels in raw water samples from the well.
Source: Authors (2026)

The results obtained for the iron parameter exceed the maximum limit of 0.3 mg/L permitted by current legislation for human consumption, indicating at that time that water treatment was necessary for the well at COSANPA's "Verdejante" facility. According to Cali and Costa (2020), it is still not evident to most people that water is a finite resource and that it depends on actions not only from the perspective of its rational use but also its preservation; above all, it also depends on policies to implement the right to basic sanitation.

When iron is present as bicarbonates or sulfates, it dissociates and releases ferrous ions. In the form of hydroxide, however, iron remains in colloidal suspension. In groundwater with low pH, high carbon dioxide concentrations, and an absence of dissolved oxygen, the primary form of iron found is dissolved ferrous bicarbonate (Cardoso, 2019; Melo; Costa; Aquino, 2008).

After analyzing the samples, it was found that simple filtration was ineffective for the iron parameter, as shown in Figure 7.

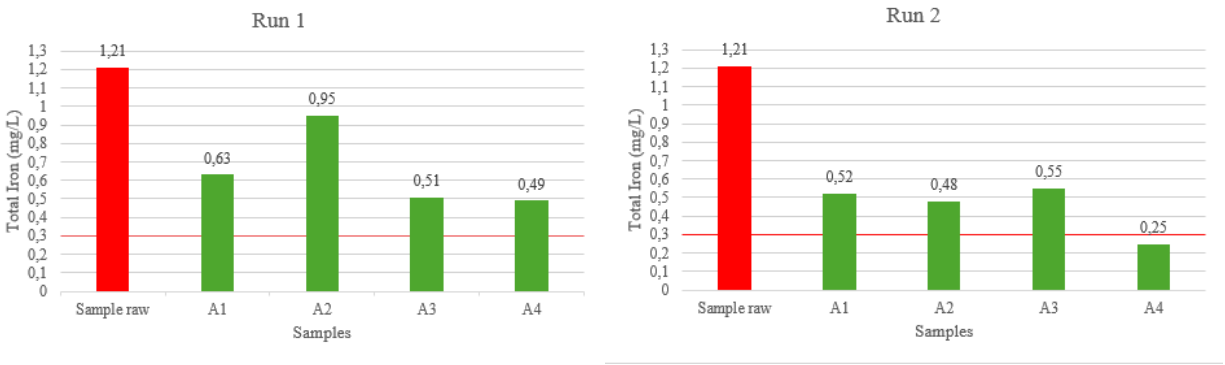


Figure 7: Results of the samples for the iron parameter.
Source: Authors (2026)

As shown in Figure 7, only sample A4 from Run 2—which was collected when the system's operating water depth was already 0.73 m—had a concentration of 0.25 mg/l^{-1}.; all other samples did not reach the 0.3 mg/l iron level after the filtration process. According to current legislation (Brazil, 2021), the maximum permissible value (MPV) for iron in the water supply network is 0.3 mg. l^{-1}.

Thus, sample A4 from Line 2 yielded results within the limits established by law, while the other samples indicate the need for adjustments to the filtration process to ensure compliance with required drinking water standards. This suggests that variables such as water depth, the efficiency of the filtration system, or the material used in the filter bed can influence the effective removal of iron, making it important to conduct monitoring and operational adjustments to meet the required parameters.

Seeking to improve iron removal efficiency using a simplified water treatment system, Silva (2023) reported satisfactory results for the system used in his study, achieving an iron removal efficiency of 86%, with post-treatment concentrations of 0.1 mg/L. Furthermore, Lima and Girard (2012) achieved a maximum iron removal efficiency of 93% in a system using aeration followed by filtration, where the concentration of raw water was 2 mg/L of iron, decreasing to 0.15 mg/L after using the treatment system.

Although the system has proven ineffective at removing iron, alternatives such as this one are important for developing effective solutions for groundwater treatment. Technologies such as filtration using specialized media, such as resins and sand filters, and advanced oxidation processes, such as the application of chlorine or the use of catalysts, have shown promise in improving the efficiency of iron removal from groundwater. Silva (2023) states that these technologies are easy to operate and are not patented, facilitating access to them.

The design, operational, and efficiency parameters of the technologies studied in this research are shown in Table 2.

Parameter	
Feed flow rate	0,065l/s
Contact pipe	7 m
Filter height	2 m
Effective filter height	1,8 m
Filter diameter	200mm
Filter bed	sand and pebbles
Filter bed height	0,45 m
Filtration rate	180 m3/m2.dia
Filtration path	7 h 21 min
Backwash	
Direction	Ascendant
Flow	0,75L/s
Time	7 min
Volume	225 l
Simple Filtration	
Iron removal (max)	54,55%
Iron removal (min)	

Table 2: System Design, Operational, and Efficiency Parameters.
Source: Authors (2026)

Tests conducted using advanced filtration technology for iron removal yielded inconsistent results, with varying efficiency across samples. In some samples, the iron concentration remained above the legal limit, indicating that the technology was not sufficiently effective at removing iron consistently. Richeski and Moraes (2022) state that it is often necessary for the experimental conditions to be very well established so that Fe levels in treated water can comply with current Brazilian legislation and safe water limits.

Conclusion

This study used a simple filtration method to remove iron from raw water in the Amazon region, employing a water treatment system made of low-cost materials (PVC) with sand and gravel as filter bed media.

Based on the results, it can be concluded that the water treatment system proved to be inefficient, as the treated water samples did not fall below the limits permitted by drinking water regulations.

During the development of the research, several operational difficulties were encountered that impacted the execution of the experiments. Although it was established that the water level should reach a maximum head loss of 0.8 m, the experiments achieved only 0.74 m over a period of 7 hours and 22 minutes. The limited time available at the COSANPA facility, due to the distance between the researchers' residences and the study site, also restricted the duration of the experiments and may have influenced the obtained results.

Future research should investigate the integration of pre-oxidation processes to enhance iron removal efficiency, as well as explore the use of alternative filter media under different operational conditions. Furthermore, long-term studies and system optimization are recommended to ensure consistent performance and compliance with drinking water standards in groundwater treatment.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), the Universidade do Estado do Pará, and the COSANPA for the support received.

Bibliographic References

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2021. Disponível em: https://bvs.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 12 abr. 2025.

CARDOSO, J. M. **Avaliação da qualidade da água subterrânea de poços tubulares outorgados no município de Campo Grande – MS**. 2019. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2019.

CARLI, A.A & Costa, L.A. (2020). Água potável e saneamento básico: o encontro necessário de dois direitos fundamentais à saúde da vida em geral. **Revista de Direito e Sustentabilidade 6(2).** https://indexlaw.org/index.php/revistards/article/view/6353.

DUARTE, H.A. Ferro – Um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1146-1153, 2019.

GIL, A.C. (2010). **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas.

LIMA, R. F. **Influência do leito de contato na eficiência de remoção de ferro de águas subterrâneas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2006.

MARCELINO, Kelly Mendes et al. Remoção de ferro em águas subterrâneas de poços tubulares em uma indústria de beneficiamento de arroz. **Revista Vincci-Periódico Científico do UniSATC**, v. 2, n. 1, p. 161-182, 2017.

MADEIRA, V. S. **Desenvolvimento de um carvão adsorvente para remoção de íons ferro em águas naturais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação e Engenharia química, 2003.

MELO, M.; COSTA, B.; AQUINO, O. de. REMOÇÃO DE FERRO E SÍLICA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA VISANDO GERAÇÃO DE VAPOR: ESTUDO DE CASO. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], 2008. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23826. Acesso em: 09 nov. 2024.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial – uma abordagem geral. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 4, n. 1, p. 29-43, 2012.

RICHESKI, Sucris Beatriz; DE MORAES, Sandra Regina. METODOLOGIAS QUE UTILIZAM AGENTES COMPLEXANTES PARA A REMOÇÃO DE ÍONS FERRO EM MATRIZ AQUOSA: UMA REVISÃO. **Cippus**, v. 10, n. 1, 2022.

SILVA, F. C.; MORAES, V. M. C.; COUTINHO, E. C.; RIBEIRO, H. M. C.; CHAVES, A. F. F.; BARBOSA, A. J. S. S.; GUTIERREZ, L. A. C. L. Tecnologias de remoção de ferro em águas subterrâneas: uma revisão sistemática. **Peer Review**, v. 5, n. 26, p. 104–118, 2023.

SILVA, F. C. **Tecnologias de tratamento de água: soluções para remoção de ferro em águas subterrâneas.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia. Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, 2023.

VIEIRA, I. F. B.; ROLIM NETO, F. C.; CARVALHO, M. N.; CALDAS, A. M.; COSTA, R. C. A.; SILVA, K. S.; PARAHYBA, R. S. B. V.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. C. Water security assessment of groundwater quality in an anthropized rural area from the Atlantic Forest Biome in Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 623, 2020.

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL DOS AQUÍFEROS EM MARABÁ (PA) UTILIZANDO O MÉTODO GOD

1 Tacila Marinho Rodrigues, 2 Iohrana Ferreira Lopes, 3 Viviane da Silva Matos, 4 Jamilly Samira dos Santos Vaz, 5 Maria da Conceição Rabelo Gomes.

1 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail: tacilamarinho9@gmail.com ; 2 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail: iohrannalopes@gmail.com; 3 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail: matosviviane797@gmail.com, 4 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail: Jamillyvaz017@gmail.com; 5 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail: maria.dcr.gomes@uepa.br.

Palavras-chave: Água subterrânea; Contaminação; Geoprocessamento.

Resumo

Diante da crescente demanda por recursos hídricos subterrâneos, a ocupação desordenada do solo e o descumprimento da legislação colocam em risco a qualidade natural das águas subterrâneas. Deste modo, este estudo objetiva analisar a vulnerabilidade natural dos aquíferos do município de Marabá, no sudeste paraense, utilizando a metodologia GOD (*Groundwater Occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater table*). Essa abordagem considera três fatores na análise da vulnerabilidade, permitindo uma avaliação abrangente e prática, uma vez que os dados necessários são geralmente obtidos durante o cadastramento de poços em campo (dados primários) e dados oriundos de órgãos públicos (dados secundários). Nessa perspectiva, a utilização de dados secundários disponibilizados no Sistema de Informações de Águas Subterrânea (SIAGAS), processados no Sistema de Informação Geográfica (SIG) por meio do software livre QGIS 3.40 Bratislava, foram essenciais para uma visualização espacial dos dados dos poços. Inicialmente, foram analisados 636 pontos de captação de água subterrânea, dos quais 250 poços, por apresentarem informações completas, foram selecionados para a aplicação da metodologia GOD. Os resultados indicaram a predominância de alta vulnerabilidade (55,6%), seguida de média (34%), baixa (10%) e extrema (0,4%), evidenciando um cenário preocupante quanto à suscetibilidade dos aquíferos à contaminação no município. Observou-se que grande parte da área apresenta condições favoráveis à infiltração de poluentes, especialmente em regiões com aquíferos livres e níveis d'água rasos. Diante desse cenário, destaca-se a necessidade de adoção de medidas de gestão e monitoramento ambiental, como o controle do uso e ocupação do solo e a melhoria das condições de saneamento, visando à proteção dos recursos hídricos subterrâneos e à garantia da segurança hídrica no município.

Introdução

A água subterrânea desempenha um papel importante no abastecimento público e privado em diferentes estados brasileiros, representam uma parcela significativa da água doce disponível, sendo essenciais para o abastecimento humano (ANA, 2023). Destinada a diferentes finalidades como abastecimento industrial, residencial, irrigação, criação de gados, entre outros fins de usos, contudo ainda não é dada a atenção necessária para sua devida proteção (Camponogara *et al*., 2005).

A falta de estratégia de gestão dos recursos hídricos em uma região geralmente traz impactos negativos, como a diminuição dos aquíferos, queda dos níveis de água, poluição da água e outros problemas sociais, econômicos e ambientais correlacionados (Brown *et al*., 1999). A vulnerabilidade de um aquífero se refere a um grau de proteção natural contra potenciais contaminantes, influenciado pelas suas características litológicas e hidrogeológicas, dos estratos que o separam da fonte de contaminação (Tedesco, *et al., 2021*). Ou seja, à contaminação do aquífero, é caracterizada por um conjunto de atributos próprios que determinam a sua probabilidade de ser afetado por um eventual contaminante (Foster *et al.*, 2006).

Nesse cenário, o sensoriamento remoto e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) têm ocupado um espaço estratégico no desenvolvimento e gestão dos recursos hídricos (Kumar, *et al*., 2014). Essas ferramentas vêm sendo cada vez mais empregadas em pesquisas acadêmicas (Costa *et al.*, 2022, Jesus *et al.*, 2023, Aladeboyeje *et al.*, 2024), possibilitando a compilação, análise e representação das características do meio hidrogeológico. Considerando que a análise de vulnerabilidade de uma área resulta da combinação de múltiplos fatores, onde a utilização de um único mapa não é suficiente para representar adequadamente essa complexidade. Nesse contexto, o uso de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilita a integração de diferentes conjuntos de dados e a elaboração de mapas que evidenciam as características mais relevantes de cada região.

Um dos principais desafios consiste em conciliar a complexidade das interações entre os poluentes e o meio hidrogeológico com as simplificações necessárias para tornar o método aplicável, facilmente reprodutível e tecnicamente confiável. Além disso, esse tipo de avaliação é classificado como qualitativo ou semi quantitativo e apresenta incertezas acumuladas decorrentes da integração de diferentes mapas paramétricos do meio físico, provenientes de modelagens geoespaciais (De Vargas *et al.*, 2022).

Entre os diversos métodos desenvolvidos para quantificar essa sensibilidade, o método GOD, proposto originalmente por Foster e Hirata (1993), destaca-se pela sua praticidade e eficiência em áreas com dados hidrogeológicos limitados. O método GOD refere-se aos três parâmetros fundamentais: Groundwater hydraulic confinement (G), Overall lithology of aquifer (O) e Depth to groundwater table (D). Este método permite uma classificação rápida e espacializada da vulnerabilidade natural dos aquíferos na área, sendo amplamente utilizado em estudos de gestão de recursos hídricos em todo o mundo.

Tendo como base essa metodologia, o presente estudo tem como objetivo mapear a vulnerabilidade natural dos aquíferos de Marabá, integrando dados atualizados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e ferramentas de geoprocessamento. A relevância deste estudo reside na necessidade de fornecer subsídios técnicos para a gestão de recursos hídricos local, visando a preservação da qualidade da água para as gerações futuras.

Materiais e Método

Área de estudo

O município de Marabá está localizado no sudeste paraense, na Amazônia Oriental, situado em uma área estratégica, na confluência dos rios Rio Tocantins e Rio Itacaiúnas, o que favorece sua ocupação e impulsiona seu desenvolvimento econômico (Figura 1).

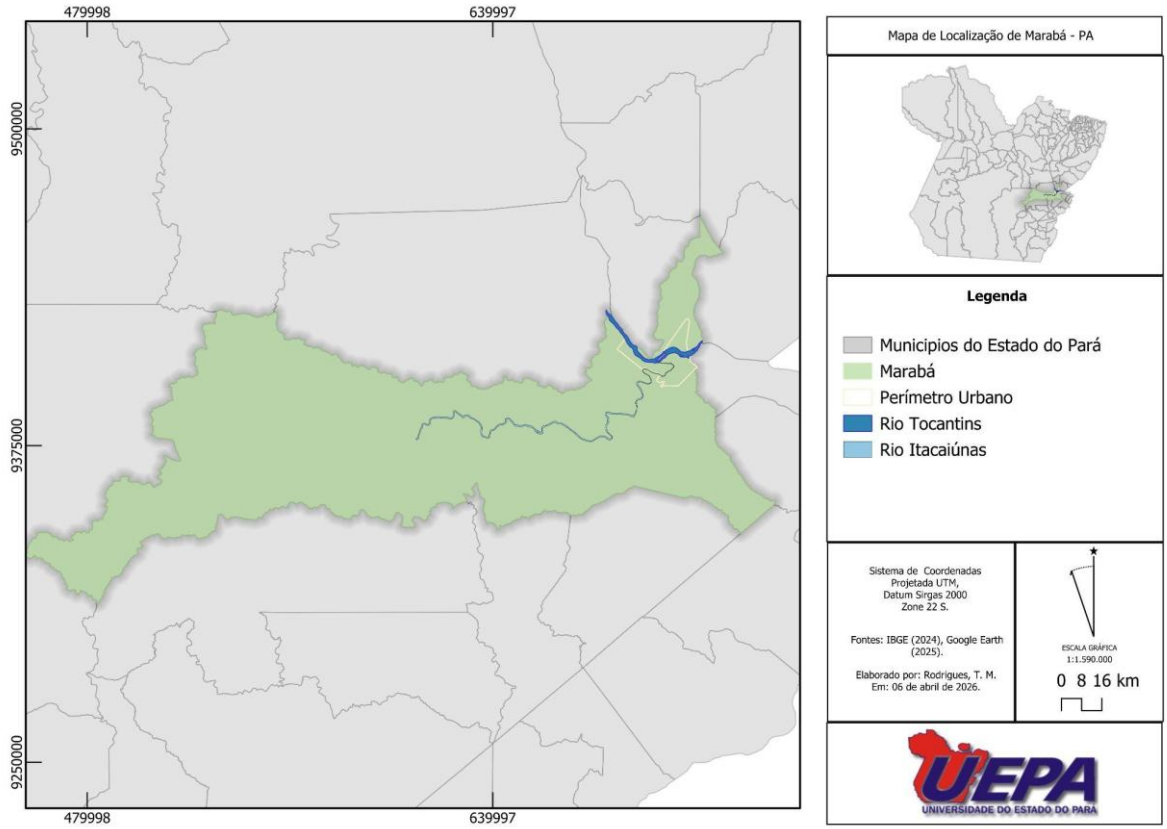


Figura 1 - Mapa de Localização de Marabá - PA
Fonte: Autoras (2026).

Ao considerar uma situação recorrente de desastres naturais (inundações) na cidade de Marabá, sua maioria estão associadas a atividades antrópicas que ocorrem pelo processo de urbanização em áreas inadequadas. De acordo com Costa (2012), o fator que agrava a ocorrência de desastres naturais seria essa ocupação em áreas vulneráveis, destacando que esse processo se torna um dos maiores problemas, devido à falta de planejamento urbano durante a ocupação dos espaços. Ao considerar essa situação o planejamento ambiental urbano seria mais que essencial para garantir condições adequadas de vida para a população.

Método GOD

O método GOD utiliza três parâmetros principais: Groundwater Occurrence (G), que indica o grau de confinamento do aquífero; Overall Aquifer Class (O), responsável por avaliar a litologia da zona não saturada; e Depth to Groundwater Table (D), que corresponde à profundidade do nível d'água subterrânea.

Após a identificação dos parâmetros necessários, são atribuídos valores com base nas características hidrogeológicas da área de estudo. O parâmetro G varia de 0 a 1, conforme o grau de confinamento do aquífero, indo de condições inexistentes até aquíferos não confinados. O parâmetro O considera a litologia da zona não saturada, com valores que variam entre 0,4 e 1. Já o parâmetro D está relacionado ao nível estático da água subterrânea, variando de 0 a 1.

Com os valores definidos, realiza-se a multiplicação dos três parâmetros (G × O × D), cujo resultado permite classificar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, variando de insignificante a extrema. A Figura 2 apresenta um esquema representativo da metodologia GOD.

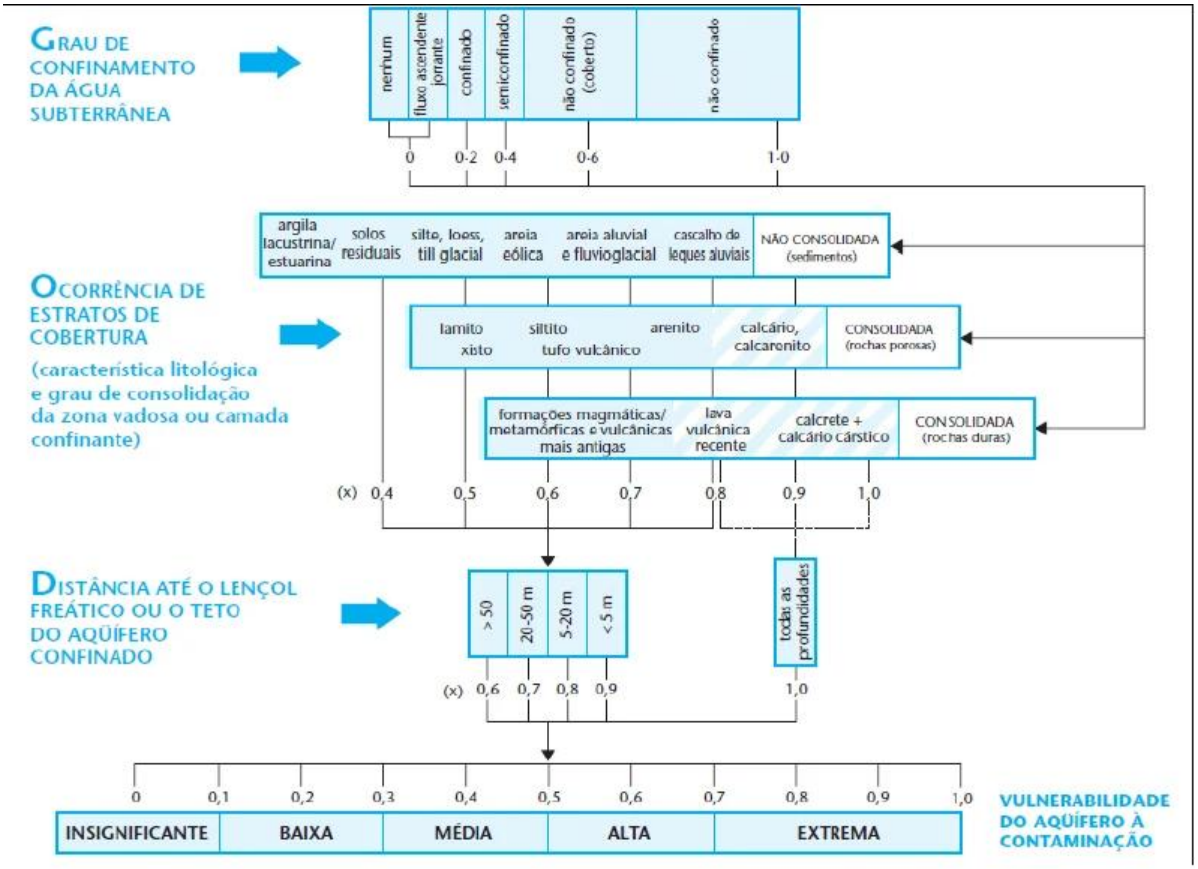


Figura 2 - Diagrama explicativo da metodologia GOD
Fonte: Foster, *et al.* (2006)

Essa metodologia apresenta a vantagem de poder ser aplicada em áreas com carência de dados espaciais em escala de detalhe que permitam uma caracterização minuciosa da região (Cardoso *et al*., 2018). Outro aspecto positivo refere-se à simplicidade na determinação de seus parâmetros e à boa espacialização dos dados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) (Batista *et al*., 2017). Associada ao uso de SIG, a metodologia GOD torna-se uma ferramenta eficiente para auxiliar gestores e demais partes interessadas no processo de tomada de decisão.

Obtenção de dados e Geoprocessamento

Para aferição do cálculo de vulnerabilidade natural a partir da metodologia GOD, fez-se necessária a utilização do banco de dados do Sistema Informação de Águas Subterrânea (SIAGAS), onde são disponibilizados dados gerais, construtivos, geológico, hidrogeológico, teste de bombeamento e análise químicas da água e informações de instalação de poços. Esses dados permitem que seja feita a análise técnica para caracterizar os aquíferos da região.

Dessa forma, foram utilizados os dados dos poços cadastrados no município de Marabá, onde indicaram 636 poços, dados que foram computadorizados em uma tabela de excel. Vale salientar que uma grande parte das informações não se adequaram ou estavam indisponíveis, assim sendo desclassificados restando apenas 250 poços para apreciação da avaliação da vulnerabilidade pelo método GOD.

Após o cálculo do índice GOD (Figura 2), iniciou-se a espacialização e classificação dos resultados no Sistema de Informação Geográfica, utilizando o software livre QGIS 3.40 Bratislava. O método de interpolação espacial adotado foi o IDW (Inverse Distance Weighting), que é comumente utilizado em pesquisas científicas (Cardoso *et al*., 2018, Costa *et al.*, 2022, Jesus *et al.*, 2023) para gerar uma superfície contínua representando a distribuição da vulnerabilidade natural do aquífero na área de estudo.

Resultados e Discussão

Por meio do processo de seleção, foram classificados 250 poços que atendem plenamente aos parâmetros que compõem o método GOD. A partir das análises realizadas, obtiveram-se os seguintes resultados:

No parâmetro G, foi verificado uma predominância de aquíferos livres (84,80%), seguidos dos confinados (10%) e semi confinados (5,2%) (Figura 3), sendo atribuídos valores dos índices entre 0,6 e 1,0, refletindo os tipos de sistemas aquíferos locais, especialmente a Formação Itapecuru, Couto Magalhães e os Depósitos aluvionares.

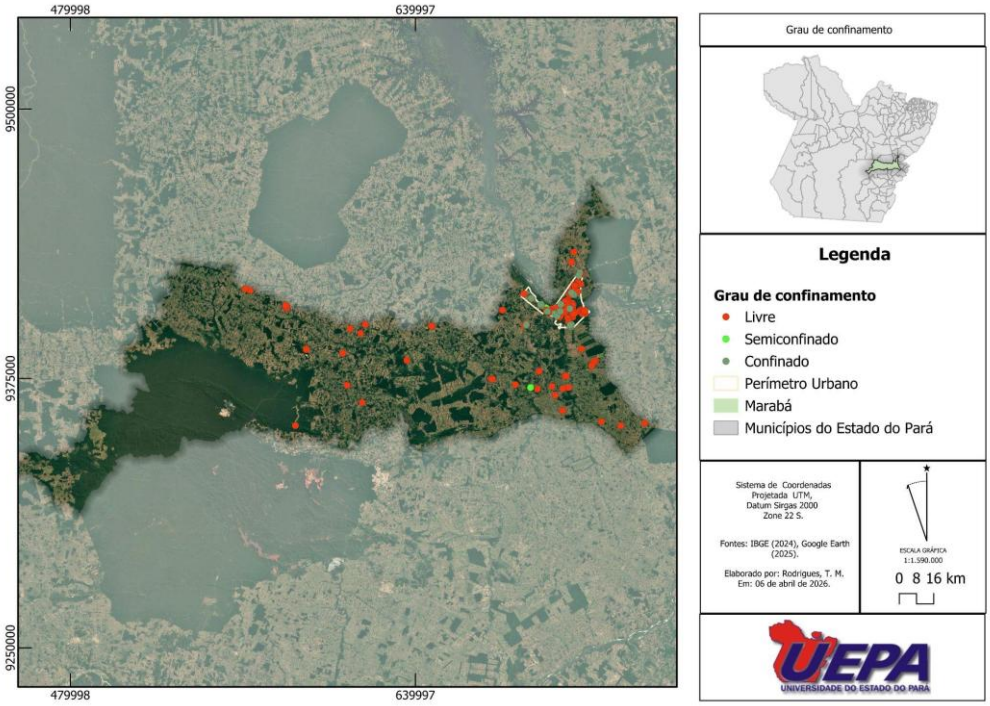


Figura 3- Mapa do grau de confinamento do aquífero (G)
Fonte: Autoras (2026).

O parâmetro O, avalia o grau de consolidação da zona não saturada, que atua com uma barreira natural à contaminação. Essa valoração se torna proporcional à capacidade de atenuação dos materiais que compõem a litologia de cada poço. Dessa forma, sedimentos arenosos possuem uma vulnerabilidade maior se comparado aos materiais argilosos. Assim foram classificados considerando as características litológicas e o grau de fratura das formações dispostas (Figura 4).

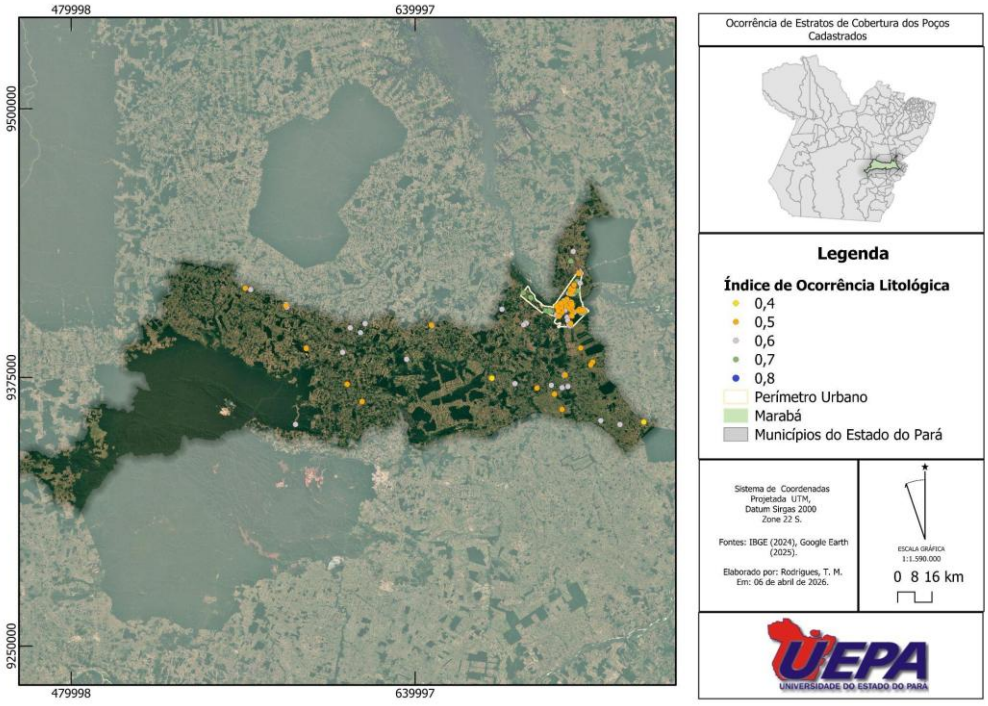


Figura 4 - Mapa de ocorrência litologia do aquífero (O)
Fonte: Autoras (2026).

O parâmetro D, que relaciona o nível estático dos poços analisados, demonstrou um valor médio de aproximadamente 10 metros, variando entre níveis mais rasos <2 m em áreas de várzeas até níveis mais profundos em áreas planas. Nesse panorama, os níveis rasos tornam os resultados drasticamente mais vulneráveis (Figura 5).

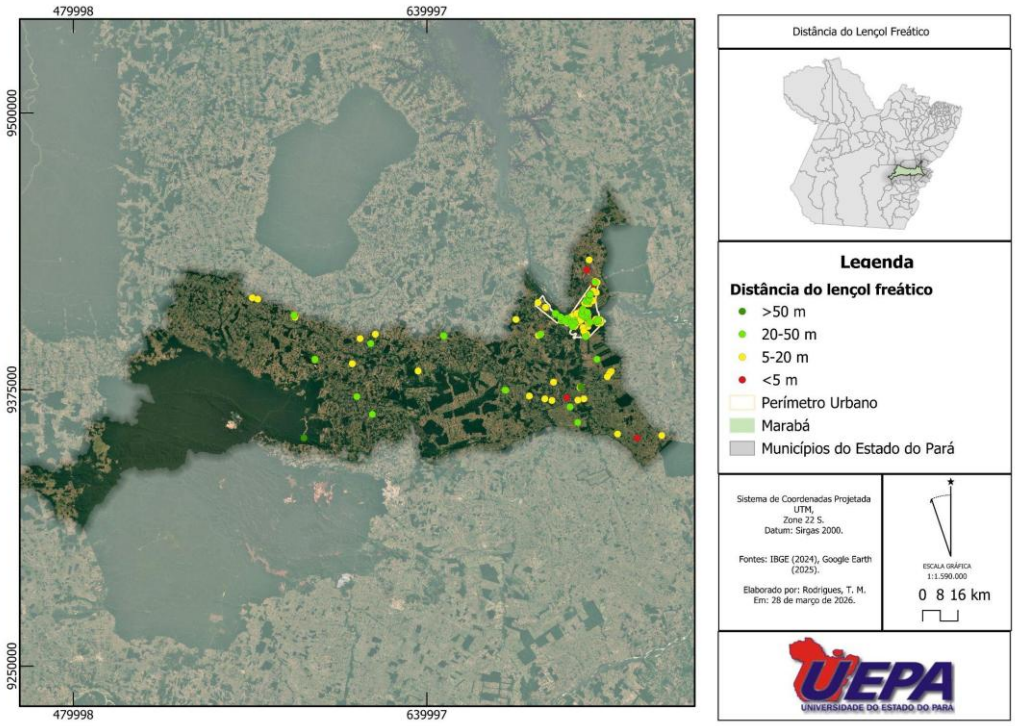


Figura 5 - Mapa de profundidade do nível d'água dos poços (D)
Fonte: Autoras (2026).

Os resultados de vulnerabilidade dos dados foram obtidos através da multiplicação de três (3) variáveis que compõem o método GOD. Os valores obtidos indicam uma distribuição preocupante da vulnerabilidade no município analisado, conforme demonstrado na Figura 6, foram classificadas várias áreas de alta vulnerabilidade, estando a maior parte do município nas classes de média ou alta vulnerabilidade. Sendo, Baixa: 10,0 %, Média: 34,0% e Alta: 55,6 % e Extrema 0,4%, não havendo nenhum Insignificante (Figura 6).

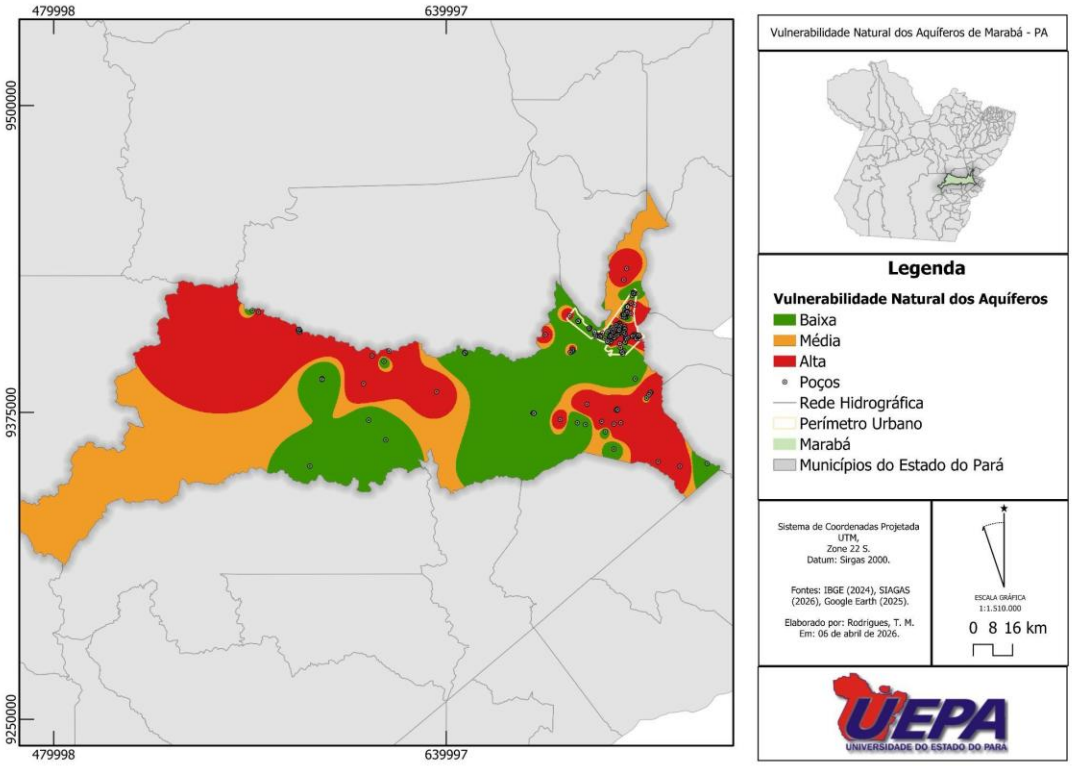


Figura 6 - Vulnerabilidade natural dos aquíferos segundo método GOD
Fonte: Autoras (2026).

A elevada vulnerabilidade natural dos aquíferos na área apresenta implicações diretas para a saúde pública e para as questões ambientais do município. Em áreas densamente povoadas, é comum a proximidade entre fossas sépticas e poços rasos ou mesmo poços tubulares sem vedação sanitária (selo sanitário), o que representa risco iminente de contaminação por nitratos e coliformes termotolerantes.

Pesquisa realizada por Ferreira (2016) mostra que a Formação Itapecuru ocupa uma faixa subaflorante no perímetro urbano do Núcleo Cidade Nova e é a principal unidade portadora de água subterrânea, aflorante tanto ao norte do Rio Tocantins como a oeste do Rio Itacaiúnas. Logo, a ocorrência da Formação Itapecuru no município, aliada às suas características hidrogeológicas (elevada porosidade e condição de aquífero livre), contribui para a classificação predominante de vulnerabilidade média a alta na área, reforçando a necessidade de planejamento do uso e ocupação do solo e medidas de proteção sanitária, a fim de minimizar os riscos de contaminação das águas subterrâneas.

No plano Estadual de Recursos Hídricos do Pará (2021), foi realizada uma pesquisa em escala estadual com base na metodologia GOD, a qual reafirma que o município de Marabá apresenta uma alta vulnerabilidade natural à contaminação. Diante desses resultados, torna-se necessário adotar medidas que visem garantir a segurança hídrica do município.

Considerações Finais

A partir das informações coletadas pelo SIAGAS, foi possível elaborar um mapa de vulnerabilidade natural do aquífero utilizando o método GOD para o município de Marabá, o qual indicou a predominância de média a alta vulnerabilidade à contaminação. Para essas áreas, o cuidado e atenção devem ser redobrados, sendo necessária a restrição ou o controle rigoroso de atividades com potencial poluidor. Assim torna-se indispensável uma gestão ambiental eficaz, como o controle de uso, adequação do sistema saneamento e o monitoramento contínuo da qualidade da água subterrânea. Tais ações são essenciais para mitigar os riscos potenciais e assegurar a disponibilidade hídrica no município.

Essas análises oferecem subsídios técnicos para orientar políticas públicas e ações para gestão e manutenção dos aquíferos de Marabá. Ademais, esse estudo encontrou algumas limitações para sua execução, pois alguns poços cadastrados no SIAGAS não apresentavam o parâmetro O, assim sendo desclassificados. Perante esse cenário, faz-se necessárias pesquisas adicionais, adotando outras metodologias para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas do município, a fim se verificar similaridade ou divergência na metodologia aplicada.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023:** informe anual. Brasília: ANA, 2023.

ALADEBOYEJE, A. I.; ADENOYE, T. T.; AGBASI, O. E. Assessment of groundwater vulnerability using GOD index and Dar Zarrouk parameters: A case study of OAUSTECH main campus, Okitipupa, Ondo Stat**e. Results in Earth Sciences (Elsevier),** v. 2, artigo 100036, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rines.2024.100036. Acesso em: 07 abr. 2026.

BATISTA, Carla; GESUALDO, Gabriela; LEITE, Pamela Cristine; LASTORIA, Giancarlo; GARCIA GABAS, Sandra; CAVAZZANA, Guilherme Henrique; DE MENDONÇA CASADEI, Juliana; DE SOUZA AZOIA, Tamiris. Aplicação do Método God Para Avaliação de Vulnerabilidade de Aquífero Livre em Bacia Hidrográfica. **Associação Brasileira Águas Subterrâneas - ABAS,** 2017. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28686. Acesso em: 06 abr. 2026.

BROWN, L.J., DRAVID, P.N., HUDSON NA, TAYLOR, C.B. (1999) Recursos sustentáveis de água subterrânea, planícies de Heretaunga, Hawke Bay, Nova Zelândia. **Hydrogeology Journal**. J 7:440–453.

CAMPONOGARA, I., MAZIERO, L., FRANTZ, L. C., SILVA, J.L.S. Exemplo de utilização do aplicativo surfer 8.0 na análise de parâmetros hidrodinâmicos tendo como área de estudo Quaraí-BR e Artigas-UY. In: 1o SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL - RS-SC-PR, Santa Maria, 2005.

CARDOSO, R. N. C., GONÇALVES, E. D., DEUS, J. C. S. DE, & TEIXEIRA, L. C. G. M. (2018). Análise da vulnerabilidade e do risco de contaminação de aquíferos semiconfinados na Ilha de Cotijuba/PA. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, 2018.

COSTA, J. A. **Desenvolvimento de um sistema de alerta de enchente aplicado aos planos de defesa civil em áreas de risco no estado do Pará utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG), caso**: cidade de Marabá. 2012. 196 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

COSTA, M. S.; GOMES, M. C. R; NASCIMENTO, S. A. M. Vulnerabilidade de aquíferos à poluição: uma revisão metodológica. **Revista de Geociências do Nordeste (REGNE**), v. 8, n. 1, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n1ID26339. Acesso em: 07 abr. 2026.

DE VARGAS, T.; BELLADONA, R. ; SGORLA, V.; SBABO, L.C. Vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea como alicerce na gestão do uso do solo em bacias de captação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, p. 710-720, 2022.

FERREIRA, D. V. **Vulnerabilidade e cartografia do aquífero Itapecuru, no núcleo Cidade Nova, de Marabá/Pará com o uso de geotecnologias**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Marabá- PA, 2016.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinação de Riscos de Contaminação das Águas Subterrâneas: um método baseado em dados existentes.** Boletim nº 10. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. p. 87.

FOSTER, S; HIRATA, R; GOMES, D; D'ELIA, M; PARIS, M. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo, Servemar. 2006.

JESUS, T. S. VEDANA, L. A.; GONÇALVES, R. D.; GUERRA, F. C. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas em aquífero fraturado, Itabaiana (SE) – aplicação do método GOD. **Geociências (UNESP)**, v. 42, n. 4, p. 537-550, 2023.

KUMAR, T.; GAUTAM, A.K.; KUMAR, T. Appraising the accuracy of GIS-based Multi-criteria decision making technique for delineation of Groundwater potential zones. **Water Resources Management**, v. 28, n. 13, p. 4449-4466, 2014.

PARÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Pará**. Belém: SEMAS, 2021.

TEDESCO, A. M.; OLIVEIRA, G. A.; TROJAN, F.. Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 401–407, 2021.

PANORAMA DA CONTAMINAÇÃO POR NITRATO EM AQUÍFEROS NO BRASIL: EVIDÊNCIAS DE UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

1 Yuri Ogera Cazari, 2 Marcela Fernandes Silva, 3 Juliana Azoia Lukiantchuki, 4 Cláudia Telles Benatti
1 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: pg406349@uem.br; 2 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: mfsilva2@uem.br; 3 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: jalukiantchuki@uem.br; 4 Universidade estadual de Maringá, e-mail: ctbenatti@uem.br

Palavras-chave: Nitrato; Águas subterrâneas; Contaminação hídrica.

Resumo

Esta revisão sistemática analisou o panorama da contaminação por nitrato em águas subterrâneas no Brasil, seguindo as diretrizes do método PRISMA. A busca realizada na plataforma Café CAPES resultou em 138 publicações avaliadas, das quais 55 compuseram o portfólio final. Os resultados evidenciam que a contaminação não se distribui de forma aleatória: ela acompanha, de maneira consistente as falhas históricas no provimento de saneamento básico e no controle do uso do solo. Nos centros urbanos, fossas rudimentares e vazamentos crônicos figuram como as principais fontes pontuais de contaminação, com registros que chegaram a 92 mg L^{-1} em Feira de Santana (BA) e a 160,71 mg L^{-1} na Terra Indígena Maxakali (MG), valor dezesseis vezes superior ao limite de 10 mg L^{-1} estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Nas áreas rurais, o uso intensivo de fertilizantes nitrogenados e o manejo inadequado de efluentes agropecuários atuam como fontes difusas de alto impacto. A exposição crônica a essas concentrações está associada a riscos toxicológicos relevantes, como metahemoglobinemia infantil e câncer gástrico. A remediação de aquíferos contaminados é frequentemente limitada por barreiras técnicas e financeiras em muitos municípios brasileiros, reforçando a prevenção como a abordagem mais sustentável a longo prazo. A revisão também identificou assimetria geográfica na produção científica, concentrada nas regiões Sudeste e Nordeste, e ausência de estudos epidemiológicos que conectem a qualidade da água aos desfechos locais de saúde, lacunas que representam o principal desafio para o avanço das políticas de segurança hídrica no país.

Introdução

As águas subterrâneas desempenham papel estratégico no abastecimento humano, na irrigação e em atividades produtivas, especialmente em regiões com limitação quantitativa ou qualitativa de águas superficiais. Nesse contexto, o nitrato destaca-se como um dos contaminantes mais recorrentes, em função de sua elevada mobilidade no solo, alta solubilidade e persistência no ambiente subterrâneo (Abascal et al., 2022; Richa; Touil; Fizir, 2022).

A contaminação por nitrato é um problema ambiental e sanitário de escala global, associada principalmente à lixiviação de fertilizantes nitrogenados, infiltração de efluentes domésticos, uso de fossas sépticas, vazamentos em sistemas de esgotamento sanitário e disposição inadequada de resíduos (Abascal et al., 2022; Al-Zreiqat et al., 2018). Em áreas com uso intensivo do solo e baixa cobertura de saneamento, essas fontes atuam de forma cumulativa, promovendo o aumento progressivo das concentrações nos aquíferos e comprometendo a qualidade da água destinada ao consumo humano (Aghabalaei et al., 2024; Borah; Borah; Malakar, 2025).

Do ponto de vista da saúde pública, a ingestão de água contaminada por nitrato está associada a diversos efeitos adversos, especialmente em grupos vulneráveis. Destacam-se a metemoglobinemia infantil, alterações na função tireoidiana e possíveis associações com doenças crônicas, incluindo alguns tipos de câncer (Ahada; Suthar, 2018; Ceballos et al., 2021; Richards et al., 2022). Em função desses riscos, organismos reguladores estabelecem limites de potabilidade. No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021 fixa o valor máximo de 10 mg L^{-1} de nitrato (como N), enquanto valores a partir de 5 mg L^{-1} já podem indicar influência antrópica e demandar ações preventivas (Brasil. Ministério da Saúde, 2021; Silva et al., 2023).

Estudos internacionais demonstram que a ocorrência de nitrato em águas subterrâneas é generalizada, com maior incidência em áreas agrícolas, regiões urbanizadas e locais com saneamento inadequado, onde fontes difusas e pontuais contribuem para o acúmulo do contaminante (Abascal et al., 2022; Richa; Touil; Fizir, 2022). A avaliação desse processo tem incorporado abordagens integradas, como estatística multivariada, modelagem hidrogeoquímica e técnicas de identificação de fontes, além de estudos voltados à remoção por tecnologias como troca iônica, membranas e adsorção. Contudo, a prevenção da contaminação permanece a estratégia mais eficaz sob os pontos de vista técnico e ambiental (Abayie; Leiviskä, 2022; Aghabalaei et al., 2024; Ahmed; Hameed; Khan, 2023).

No Brasil, embora haja volume significativo de estudos sobre nitrato em águas subterrâneas, a produção científica encontra-se dispersa, dificultando uma visão integrada em escala nacional. Pesquisas conduzidas em diferentes regiões evidenciam concentrações acima dos padrões de potabilidade, associadas tanto a áreas urbanas densamente ocupadas quanto a zonas agrícolas e regiões com infraestrutura sanitária insuficiente (Rezende et al., 2019; Silva; Santos; Ferreira, 2019). Esse cenário reforça a necessidade de sistematização crítica dos dados disponíveis, de modo a identificar padrões espaciais, fontes de contaminação e lacunas de conhecimento (Rezende et al., 2019b; Richa; Touil; Fizir, 2022).

Diante disso, a realização de uma revisão sistemática sobre a contaminação por nitrato em águas subterrâneas no Brasil é fundamental para organizar e interpretar a produção científica existente, permitindo a identificação de tendências, contextos de

ocorrência e abordagens metodológicas. Tal síntese contribui para o aprimoramento de políticas públicas, programas de monitoramento e estratégias de proteção dos aquíferos, com vistas à redução dos riscos à saúde humana (Abascal et al., 2022; Borah; Borah; Malakar, 2025).

Material e Métodos

Este estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura, conduzida com base nas diretrizes do método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), visando garantir transparência e reprodutibilidade no processo de seleção dos estudos.

A busca bibliográfica foi realizada na plataforma Cafe CAPES, utilizando três estratégias de busca: “nitrate, water, groundwater, Brazil” (resultando 94 publicações), “nitrato, água, poço, Brasil” (38 publicações) e “nitrato, água subterrânea, Brasil” (24 publicações). Não foi estabelecido recorte temporal, com o objetivo de avaliar a evolução histórica da temática.

Foram incluídos estudos que apresentassem dados sobre contaminação por nitrato em águas subterrâneas ou poços no Brasil, abrangendo artigos científicos e trabalhos de congressos publicados em português, inglês ou espanhol. Após a remoção de duplicatas, foram consideradas 138 publicações.

A seleção seguiu as etapas de identificação, triagem e elegibilidade, com base na análise de títulos, resumos e textos completos. Para organização e síntese das informações, utilizou-se como ferramenta de apoio a inteligência artificial NotebookLM, permitindo a identificação de padrões, distribuição espacial dos estudos, fontes de contaminação e abordagens metodológicas. Para a seleção final e inclusão na etapa de discussão, estabeleceu-se que os artigos deveriam preencher obrigatoriamente os seguintes critérios: (i) apresentar dados quantitativos de concentração de nitrato; (ii) indicar a fonte ou hipótese de contaminação; e (iii) relatar o período de análise.

Resultados e discussão

A partir da aplicação das etapas de identificação, triagem e elegibilidade, e após a remoção das duplicatas, 138 publicações foram avaliadas preliminarmente. Destas, 55 artigos atenderam a todos os critérios estabelecidos e compuseram o portfólio final, conforme ilustra o fluxograma PRISMA (Figura 01).

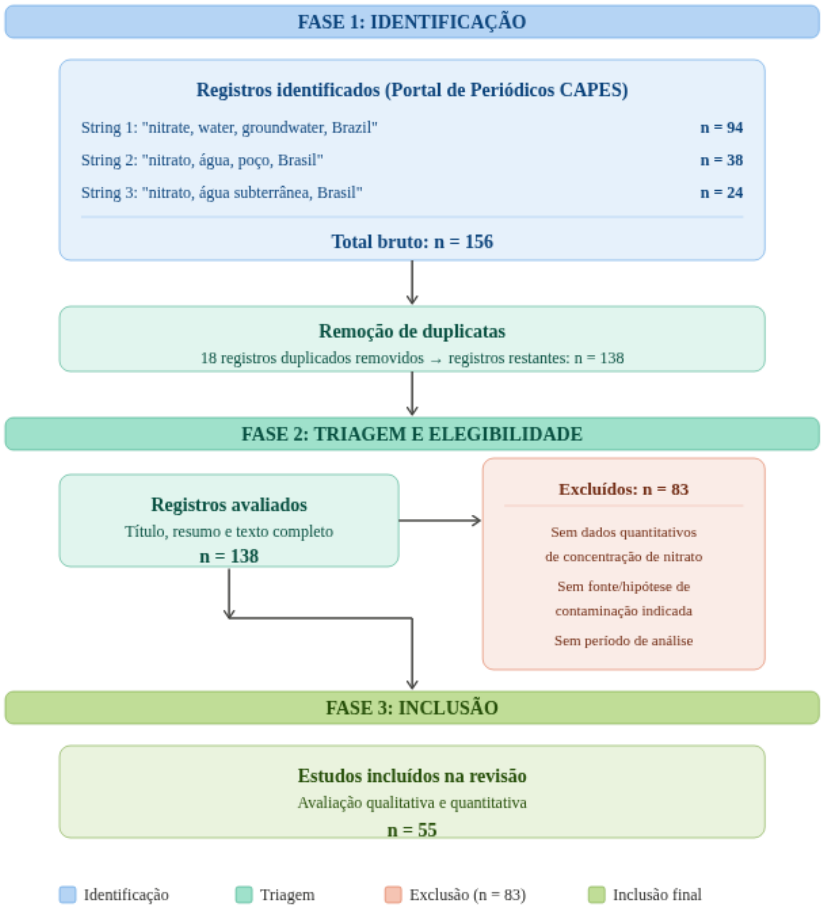


Figura 01: Fluxograma do processo de seleção e triagem dos estudos (Método PRISMA) sobre contaminação por nitrato em águas subterrâneas no Brasil
Fonte: Elaborado pelos autores

Esta pesquisa na base de dados permitiu compreender o interesse científico pela contaminação por nitrato das águas subterrâneas no Brasil. Na Figura 02, o período de publicação abrange mais de 40 anos, começando em 1981 e continuando até os dias atuais.

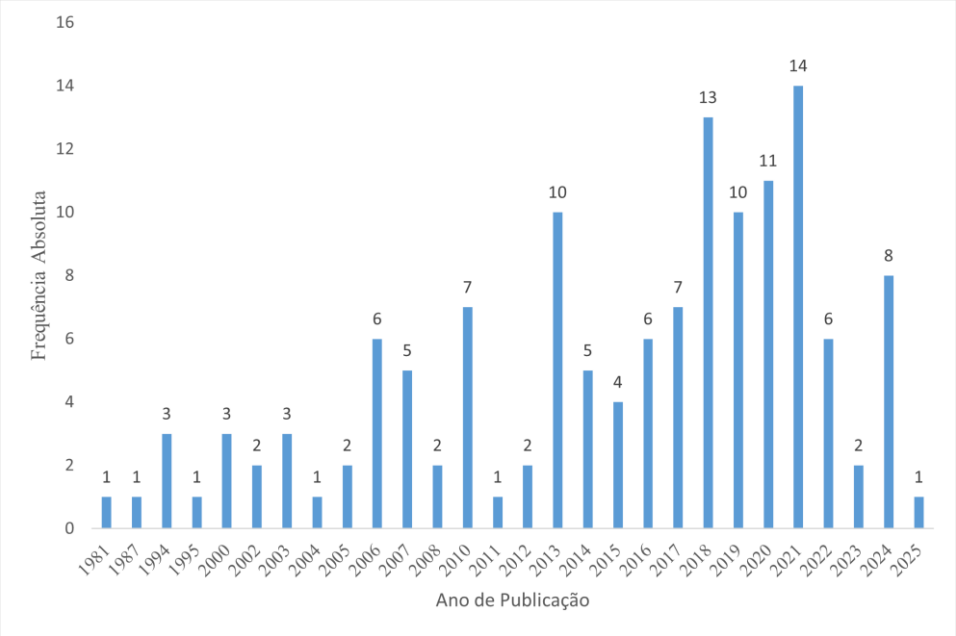


Figura 02: Evolução histórica do número de publicações científicas identificadas na revisão sistemática por ano.
Fonte: Elaborado pelos autores

O gráfico evidencia que, mesmo que o assunto tenha começado a ser estudado desde a década de 1980, a partir de 2013 houve um aumento constante nas publicações. Também é possível notar que grande parte desses trabalhos se concentra a partir de 2018, período que representa quase 35% de toda a amostra analisada (com destaque para as 14 publicações somente em 2021). Este aumento na produção científica pode ser associado a uma maior pressão ambiental e de saúde em termos de segurança da água, juntamente com a busca pelo cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela ONU, que têm exigido cada vez mais investigações relacionadas à segurança hídrica e à universalização do saneamento. Para aprofundar a compreensão dos temas centrais presentes nos 55 artigos selecionados, elaborou-se uma nuvem de palavras a partir dos termos mais frequentes identificados nos estudos (Figura 03). Visando a uniformidade gráfica e a melhor compreensão da síntese bibliográfica, os termos de ocorrência em língua inglesa foram previamente traduzidos para o português antes da geração do gráfico. Isso permitiu centralizar e evidenciar adequadamente os conceitos-chave do estudo, como 'Nitrato', 'Água Subterrânea', 'Contaminação' e 'Aquífero', que ganharam maior destaque visual.

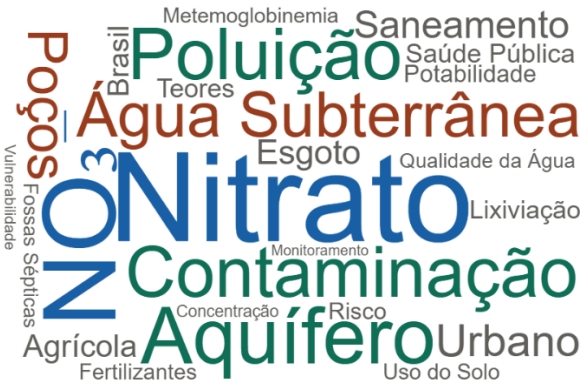


Figura 03: Nuvem de palavras dos termos mais frequentes nos estudos incluídos na revisão sistemática
Fonte: Elaborado pelos autores

A alta frequência desses termos demonstra que o foco das pesquisas brasileiras se concentra na identificação das fontes poluidoras e nos riscos associados. Para otimizar a análise do extenso volume de dados recuperados e identificar os padrões espaciais e temporais da ocorrência do contaminante, os 55 artigos incluídos na revisão foram avaliados quanto à localização geográfica, período de análise, hipóteses geradoras e panorama das concentrações reportadas. Com o objetivo de destacar os cenários de maior relevância sanitária e adequar a síntese ao escopo desta revisão, adotou-se como critério de criticidade a

ocorrência de picos superiores a 20 mg L^{-1} de $N\text{-}NO_3^-$ e/ou percentual expressivo de amostras acima do Valor Máximo Permitido (VMP = 10 mg L^{-1}), conforme Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021). A partir desse critério, o Quadro 01 reúne os 20 estudos que apresentaram as concentrações mais críticas de nitrato e os cenários de maior vulnerabilidade hidrogeológica, distribuídos em diferentes regiões do Brasil.

Quadro 01: Síntese dos 20 estudos com as concentrações mais críticas de nitrato no Brasil

Referência	Local do Estudo	Período	Fonte/Hipótese da Contaminação	Principais Resultados ($N\text{-}NO_3^-$)
Assis et al., (2020)	T.I. Maxakali (MG)	2015	Ausência de saneamento	Pico alarmante de 160,71 mg L^{-1}.
Bertrand et al., (2016)	R.M. Recife (PE)	2012-2013	Fertilizantes e deficiência de esgoto	Concentrações atingiram pico de 23,82 mg L^{-1}.
Bezerra et al., (2018)	R.M. Fortaleza (CE)	2014-2017	Fossas, resíduos e agricultura	40% das amostras > VMP; pico de 53,4 mg L^{-1}.
Braga et al., (2018)	46 municípios (CE)	2016	Fossas, efluentes e fertilizantes	Região do Sertão atingiu 65,1 mg L^{-1}.
Cabral; Lima, (2006)	Belém (PA)	2000-2002	Fossas rudimentares e vazamentos	Média de 29,7 mg L^{-1}; máximo de 55.40 mg L^{-1}.
Campos; Filho; Oliveira, (2004)	Porto Velho (RO)	2003	Saneamento in situ (fossas)	23% > VMP; pico de 26,43 mg L^{-1}.
Santos et al., (2024)	Tupã (SP)	2018	Histórico de fossas e vazamentos	32% > VMP; pico de 23,2 mg L^{-1}.
(Fineza *et al.*, 2014)	Tabuleiro (MG)	2007-2008	Necrochorume e fossas vizinhas	Média de 4,43 mg L^{-1}; pico de 32,8 mg L^{-1}.
Franca et al., (2018)	Juazeiro do Norte (CE)	2002-2003	Esgoto doméstico sem tratamento	4 poços > VMP; pico de 24,8 mg L^{-1}.
Lee; Bonotto, (2021)	São José dos Campos (SP)	2019-2020	Efluentes e esgoto sanitário	Uma amostra excedeu o limite (25,8 mg L^{-1}).
Lobo et al., (2023)	Sistema Aquífero Bauru (SP)	2016-2018	Fertilizantes e fontes urbanas	Excedeu limite com pico de 23,16 mg L^{-1}.
Luna et al., (2013)	Distrito de irrigação Baixo Acaraú (CE)	2010-2011	Irrigação, fertilizantes e estercos	Áreas não cultivadas atingiram 29,0 mg L^{-1}.
Neves et al., (2021)	Bacia R. Itapemirim (ES)	2014-2016	Agrícola e efluentes domésticos	Pico crítico de 63,66 mg L^{-1}.
Oliveira et al., (2019)	Raposa (MA)	2017-2018	Fossas rudimentares e lixões	Maioria > VMP; pico de 22,87 mg L^{-1}.
Silva; Araújo, (2003)	Feira de Santana (BA)	2000	Fossas e vazamentos de rede	88,2% > VMP; pico de 92 mg L^{-1}.
Silva et al., (2002)	Itaguaí (RJ)	2001	Esgoto e derramamento químico	40% das amostras > VMP; pico de 53,30 mg L^{-1}.
Silva et al. (2021)	R.M. Recife (PE)	2014-2016	Esgoto doméstico e fossas	Aquífero livre atingiu pico de 46,86 mg L^{-1}.
Silva et al., (2021)	Recife (Boa Viagem, PE)	2015	Efluentes urbanos	21% > VMP; ultrapassou 50 mg L^{-1} (padrão OMS).
Teixeira et al., (2024)	Portão (RS)	2018	Lixiviado de resíduos e curtumes	Pico de 25,1 mg L^{-1} no período chuvoso.
Teramoto; Stradioto; Chang, (2020)	Paulínia (SP)	2011	Fossas rudimentares	Pico de 48,3 mg L^{-1} em área rural.

Nota: T.I = Tribo indígena, R.M = Região metropolitana

Fonte: Elaborado pelos autores

A interpretação dos 20 estudos mais críticos destaca que a contaminação por nitrato no Brasil apresenta duas dinâmicas distintas, impulsionadas pelo uso da terra. Por um lado, nos grandes centros urbanos e regiões metropolitanas, a degradação da qualidade da água subterrânea está ligada ao processo de urbanização e à precariedade do esgotamento sanitário. Por outro lado, nas áreas rurais e de expansão agrícola, o principal vetor de contaminação é o uso intensivo de fertilizantes e corretivos no solo. Estudos conduzidos em capitais como Belém (PA) e Recife (PE) ressaltam que a adoção de fossas rudimentares e sépticas, somada a vazamentos crônicos nas redes públicas, atua como uma fonte pontual contínua de contaminação. Cabral; Lima, (2006) apresentaram concentrações máximas de 55,40 mg L^{-1} em Belém, enquanto em Boa Viagem (Recife), Silva et al., (2021)

registraram amostras que ultrapassaram a marca de 50 mg L^{-1}, extrapolando até mesmo os limites mais tolerantes da Organização Mundial da Saúde.

Em contrapartida, nas regiões interioranas e bacias hidrográficas, observa-se o predomínio de contaminação por fontes múltiplas e difusas. Nas áreas de transição urbano-rural, o uso intensivo de fertilizantes nitrogenados na agricultura, quando associado à disposição inadequada de efluentes domésticos e estercos, agrava a qualidade da água dos aquíferos. Esse panorama é corroborado pelas publicações de Braga et al., (2018), que identificaram picos de 65,1 mg L^{-1} na região do Sertão cearense, e por Neves et al., (2021), que reportaram níveis críticos de até 63,66 mg L^{-1} na Bacia do Rio Itapemirim, no Espírito Santo.

Para além da dicotomia urbano-rural, a distribuição espacial dos picos de nitrato escancara uma grave questão de vulnerabilidade socioambiental em territórios desassistidos por políticas públicas. A situação mais crítica identificada nesta revisão ocorreu na Terra Indígena Maxakali, em Minas Gerais, onde a ausência de saneamento básico resultou em um pico extremo de 160,71 mg L^{-1} (Assis et al., 2020). Trata-se de um valor dezesseis vezes superior ao Valor Máximo Permitido (VMP) estabelecido pelo Ministério da Saúde. Este dado demonstra de forma contundente que populações isoladas ou em áreas periféricas, que dependem, em sua maioria, de águas subterrâneas não tratadas, são as que enfrentam a exposição mais perigosa aos efeitos toxicológicos e adversos do contaminante.

Dentre os efeitos adversos à saúde humana associados a essa exposição crônica, a literatura destaca a indução à metahemoglobinemia, popularmente conhecida como “síndrome do bebê azul” (Costa; Saldanha; Monte, 2020; Rosa et al., 2018). Esta anomalia afeta especialmente lactentes menores de seis meses, uma vez que a redução do nitrato a nitrito no trato gastrointestinal inibe a capacidade da hemoglobina de transportar oxigênio, podendo levar à asfixia, paralisia cerebral e ao óbito (Fernícola; Azevedo, 1981). Adicionalmente, aponta-se o risco de desenvolvimento de câncer gástrico (Nogueira; Crespim; Carneiro, 2021), decorrente da formação endógena de nitrosaminas e nitrosamidas carcinogênicas, geradas a partir da reação do nitrito com aminas secundárias no estômago (Santana et al., 2020). Ressalta-se que o uso contínuo de água contaminada pode trazer danos devido ao efeito cumulativo no organismo humano (Costa; Kempka; Skoronski, 2016).

A gravidade desse cenário nacional é amplificada pela dificuldade técnica e financeira de reverter a poluição em águas subterrâneas. Devido à elevada solubilidade e persistência do nitrato em sua forma iônica, os processos convencionais de tratamento de água são ineficientes para a sua remoção (Peixoto, 2020; Rezende et al., 2016). As tecnologias avançadas capazes de realizar essa descontaminação, como a osmose reversa, a troca iônica e a eletrodiálise são métodos altamente onerosos, o que inviabiliza a sua aplicação em larga escala, especialmente nas comunidades rurais e em municípios de menor porte (Palmeira et al., 2019; Rezende et al., 2016; Santos et al., 2024). Na prática, as medidas mitigatórias adotadas pelos sistemas de abastecimento público no Brasil têm se limitado à diluição, mesclando águas de aquíferos contaminados com águas de outras fontes para rebaixar os teores de nitrato aos padrões aceitáveis, ou, em casos extremos, à interdição e abandono definitivo dos poços (Campos; Lucena; Alves, 2024). No entanto, essa mistura de diferentes fontes de água é vedada para soluções alternativas coletivas, como poços de condomínios e empresas, obrigando-se a instalação de alguma forma de tratamento para redução da concentração de nitrato (Brasil, 2021).

Por conseguinte, a síntese das publicações aponta que a remediação de aquíferos é frequentemente limitada por barreiras técnicas e financeiras em muitos territórios, reforçando a prevenção como a abordagem mais eficaz sob os pontos de vista técnico e ambiental (Dovidauskas et al., 2022; Hirata; Suhogusoff, 2019). Isso reforça a necessidade de políticas públicas focadas na universalização do saneamento, no manejo adequado de fertilizantes e na forte integração entre a gestão de recursos hídricos e a Vigilância Sanitária, impedindo que a degradação silenciosa das águas subterrâneas se consolide como uma crise generalizada de saúde pública (Dovidauskas et al., 2014; Mattos et al., 2017)

Lacunas Científicas e Necessidades Tecnológicas

Apesar do volume crescente de publicações científicas sobre a contaminação de águas subterrâneas, a análise do portfólio revela lacunas significativas na distribuição espacial e temática das pesquisas no país. A literatura nacional ainda se apresenta dispersa e de caráter predominantemente localizado, o que dificulta a construção de um panorama integrado em larga escala (Hirata; Suhogusoff, 2019).

A partir do levantamento bibliográfico realizado nesta revisão, observa-se uma forte assimetria na produção de dados, com a maioria dos estudos concentrando-se nas regiões Sudeste e Nordeste. Essa disparidade reflete as urgências locais: no Sudeste, a pesquisa é impulsionada pela intensa pressão antrópica e urbano-industrial sobre os aquíferos (Lobo et al., 2023). No Nordeste, a motivação está atrelada à escassez hídrica histórica, que frequentemente torna a água subterrânea a principal alternativa de abastecimento (Bezerra et al., 2018). Em contrapartida, evidencia-se uma carência de investigações amplas e contínuas em outras áreas estratégicas do território nacional. A região Sul do Brasil, por exemplo, assim como as regiões Norte e Centro-Oeste, apresenta um volume consideravelmente menor de publicações sistemáticas de monitoramento, com pesquisas restritas a bacias específicas ou a focos de contaminação já consolidados (Facco et al., 2020; Santos et al., 2021).

A espacialização dos 55 artigos selecionados nesta revisão por meio de um mapa de calor (Figura 04) ilustra de forma clara essa desigualdade territorial. O mapeamento visual evidencia os "pontos quentes" no Nordeste e no Sudeste, enquanto as outras regiões do país figuram como "zonas frias", refletindo um preocupante vazio de dados sobre a qualidade e a vulnerabilidade de suas reservas subterrâneas.



Figura 04: Distribuição espacial dos estudos sobre contaminação por nitrato em águas subterrâneas nas macrorregiões do Brasil
Fonte: Elaborado pelos autores

Para além da lacuna geográfica, a análise do portfólio evidencia uma deficiência crítica na literatura nacional quanto ao cruzamento de dados hidrogeoquímicos com a saúde coletiva. Nota-se que as pesquisas brasileiras que associam qualidade da água e saúde tendem a focar em agravos agudos e infecciosos (Assis et al., 2020). Consequentemente, embora os riscos da exposição crônica ao nitrato, como a metahemoglobinemia e o câncer gástrico, sejam bem estabelecidos (Santana et al., 2020), constatou-se nesta revisão uma ausência de estudos epidemiológicos robustos no Brasil sobre o tema. O preenchimento dessas lacunas espaciais e epidemiológicas torna-se, portanto, o próximo desafio essencial para o aprimoramento das políticas de segurança hídrica e de vigilância sanitária no país (Dovidauskas et al., 2022).

Considerações Finais

Os achados desta revisão indicam que a contaminação por nitrato nos aquíferos brasileiros reflete, em grande medida, lacunas estruturais em saneamento e no ordenamento do uso da terra. O caso da Terra Indígena Maxakali, por exemplo, que registrou um pico de 160,71 mg L^{-1} (dezesseis vezes o limite da Portaria GM/MS nº 888/2021), ilustra uma dinâmica recorrente no país: as águas subterrâneas acabam recebendo a carga de efluentes em locais desprovidos de infraestrutura adequada.

A dicotomia urbano-rural identificada na literatura demonstra diferentes facetas desse problema. Nas áreas periféricas, o uso de fossas rudimentares muitas vezes supre a falta de redes de esgoto; já no campo, a aplicação de fertilizantes nem sempre conta com assistência técnica adequada. Mais preocupante do que a magnitude das concentrações, no entanto, é a escassez de dados epidemiológicos associados a elas. Sem estudos que correlacionem o consumo dessa água com indicadores locais de saúde, o impacto real dessa exposição crônica tende a ficar subdimensionado, dificultando a formulação de políticas públicas baseadas em evidências. O Brasil já possui um diagnóstico técnico consolidado sobre a ocorrência do nitrato em seus mananciais subterrâneos. O próximo passo é conectar esse diagnóstico aos seus desdobramentos na saúde da população, subsidiando decisões de planejamento e de proteção dos aquíferos. Para isso, a integração entre o monitoramento hidrogeológico e as ações de Vigilância Sanitária, somada ao incentivo a pesquisas epidemiológicas em comunidades dependentes de poços, surge como uma estratégia essencial e prioritária.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

ABASCAL, E. *et al.* Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. **Science of The Total Environment**, v. 810, p. 152233, 1 mar. 2022.

ABAYIE, S. Okyere; LEIVISKÄ, T. Removal of nitrate from underground mine waters using selective ion exchange resins. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 108642, 1 dez. 2022.

AGHABALAEI, Vahid *et al.* A systematic review of strategies to overcome barrier for nitrate separation systems from drinking water: Focusing on waste streams treatment processes. **Chemosphere**, v. 349, p. 140757, 1 fev. 2024.

AHADA, Chetan P. S.; SUTHAR, Surindra. Groundwater nitrate contamination and associated human health risk assessment in southern districts of Punjab, India. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 25, 2018.

AHMED, M. J.; HAMEED, B. H.; KHAN, M. A. Recent advances on activated carbon-based materials for nitrate adsorption: A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 169, p. 105856, 1 jan. 2023.

AL-ZREIQAT, Iyad *et al.* Influence of septic tank attached growth media on total nitrogen removal in a recirculating vertical flow constructed wetland for treatment of domestic wastewater. **Ecological Engineering**, v. 118, p. 171–178, 1 ago. 2018.

ASSIS, E. M. de; SANTOS, E. M.; FARIA, M. C. da S.; RODRIGUES, J. L.; GARCEZ, A.; BOMFETI, C. A.; BARCELLOS, N. T. A vulnerabilidade de populações indígenas: qualidade da água consumida pela comunidade Maxakali, Minas Gerais, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 279–290, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.14393/sn-v32-2020-43436.

BERTRAND, G. *et al.* Groundwater contamination in coastal urban areas: Anthropogenic pressure and natural attenuation processes. Example of Recife (PE State, NE Brazil). **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 192, p. 165–180, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.07.008.

BEZERRA, A. D. A.; DA ROCHA, J. C.; NOGUEIRA, E. R.; DE SOUSA, D. M. L.; ARAÚJO, F. G. D. M.; BRANDÃO, M. G. A.; PANTOJA, L. D. M. ANÁLISE SITUACIONAL DA QUALIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA ORIUNDA DE POÇOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL. **Acta Biomédica Brasiliensia**, v. 9, n. 1, p. 94, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.18571/acbm.158.

BORAH, Preetismita; BORAH, Gongutri; MALAKAR, Arindam. Mitigating nitrate contamination in groundwater: A comprehensive review of in-situ approaches. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 28, p. 101406, 1 fev. 2025.

BRAGA, E. S.; FREITAS, C. B.; MENDES, L. S. A. dos S.; AQUINO, M. D. de. Avaliação da qualidade de águas subterrâneas localizadas no litoral, serra e sertão do Estado do Ceará destinadas ao consumo humano. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 17–24, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28929.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potab**., 2021.

CABRAL, N. M. T.; LIMA, L. M. Comportamento hidrogeoquímico das águas do aqüífero Barreiras nos bairros centrais de Belém, Pará. v. 1, p. 149–166, 2006.

CAMPOS, B. C. de S.; LUCENA, L. R. F. de; ALVES, R. da S. A ocorrência de nitrato e sua perspectiva de depuração no cenário de um aquífero não confinado urbano com recarga variável, nordeste do Brasil. **Revista de Geociencias do Nordeste**, v. 10, n. 2, p. 316–331, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID36699

CAMPOS, J. C. V. C.; FILHO, E. P. da S.; OLIVEIRA, I. R. Contaminação do Aquífero Jaciparaná na Cidade de Porto Velho (RO). **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2004.

CEBALLOS, Elina *et al.* Assessment of Human Health Risk of Chromium and Nitrate Pollution in Groundwater and Soil of the Matanza-Riachuelo River Basin, Argentina. **Exposure and Health**, v. 13, n. 3, 2021.

COSTA, D. D.; KEMPKA, A. P.; SKORONSKI, E. A contaminação de mananciais de abastecimento pelo nitrato: o panorama do problema no Brasil, suas consequências e as soluções potenciais. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 10, n. 02, p. 49–61, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.22411/rede2016.1002.04

COSTA, I.; SALDANHA, E. C.; MONTE, C. do N. A sazonalidade de contaminantes em águas subterrâneas e superficiais entorno de um aterro sanitário na região Amazônica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 6, p. 371–382, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2020.006.0030.

DOVIDAUSKAS, S.; OKADA, I. A.; DOS SANTOS, F. R.; OKADA, M. M.; BRIGANTI, R. de C.; SOUTO, M. A. M. Analysis of Factors Involving Drinking Water Contamination by Glyphosate and/or Nitrate in Urban Areas. **Orbital**, v. 14, n. 3, p. 139–152, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.17807/orbital.v14i3.17386

DOVIDAUSKAS, S.; OKADA, I. A.; SOUZA, J. A. de; NOVAS, M. A. de J. H.; ROSSATO, R. A. A interação entre Vigilância Sanitária e Laboratório de Saúde Pública na detecção da contaminação por nitrato em água subterrânea. **Vigilância Sanitária em Debate**, v. 3, n. 1, p. 97–104, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.3395/2317-269x.00259

FACCO, J.; CARASEK, F. L.; JUNIOR, S. F. de O.; PASSOS, M. G. dos. Groundwater quality of the Guarani (GAIS) and Serra Geral (SGAIS) aquifer integrated system in western Santa Catarina, Brazil. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 77, p. 59–70, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.14393/rcg217751568

FERNÍCOLA, N. G. G.; AZEVEDO, F. A. Metemoglobinemia e nitrato nas águas. **Revista de Saúde Pública**, v. 15, 1981. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0034-89101981000200009.

FINEZA, A. G.; MARQUES, E. A. G.; BASTOS, R. K. X.; BETIM, L. S. Impacts on the Groundwater Quality Within a Cemetery Area in Southeast Brazil. **Soils and Rocks**, v. 37, n. 2, p. 161–169, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.28927/SR.372161.

FRANCA, R. M. da; GOMES, M. da C. R.; SILVA, F. J. A. da; LIMA, M. G. D. S.; FRISCHKORN, H. Análise multivariada dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas em Juazeiro do Norte – CE (Brasil). **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 106–113, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28890.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V. How much do we know about the groundwater quality and its impact on Brazilian society today? **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 31, n. e109, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s2179-975x4419

LEE, I. G.; BONOTTO, D. M. Contaminants Inputs at Alambari river, São José dos Campos city, São Paulo State, Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 232, n. 12, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11270-021-05437-0.

LOBO, I. V.; TERCINI, O. T.; DI LOLLO, J. A.; LIMA, C. G. da R. Spatial and Temporal Variability of Groundwater Quality Parameters in the Bauru Aquifer System (São Paulo State, Brazil). **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 46, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_53748.

LUNA, N. R. de S.; ANDRADE, E. M. de; CRISÓSTOMO, L. A.; MEIRELES, A. C. M.; AQUINO, D. D. N. Dinâmica do nitrato e cloreto no solo e a qualidade das águas subterrâneas do distrito de irrigação Baixo Acaraú, CE. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v. 7, n. 1, p. 53–62, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i1.1042

MATTOS, J. B.; SILVA, K. B.; LIMA, J. M.; OLIVEIRA, L. A. Zoning of the use and quality of groundwater as a subsidy for the management of water resources: The case of the urban area of the municipality of Lençóis, Bahia, Northeastern Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 1, p. 40–49, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.29150/jhrs.v7.1.p40-49.

NEVES, M. A.; OLIVEIRA, M. S. M. de; CALEGARI, S. S.; BERTOLO, R. A.; HIRATA, R. C. A.; CAXITO, F. de A. Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Cristalino no sul do estado do Espírito Santo – Brasil. **Geologia USP - Serie Cientifica**, v. 21, n. 4, p. 31–47, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-168752.

NOGUEIRA, M. H. P.; CRESPIM, R. da C. e S.; CARNEIRO, B. S. Análise e Diagnóstico da Qualidade da Água de um Residencial Localizado em Belém do Pará. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 7, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.18227/rct.v7i0.6810.

OLIVEIRA, T. W. dos S. de; SILVA, S. H. P.; DA SILVA, D. F.; VIANA, J. F. C.; FIRMO, W. da C. A.; SILVA, M. R. C. Aspecto da sazonalidade nos parâmetros físico – químicos da água dos poços, Raposa - Maranhão, Brasil. **Águas Subterraneas**, v. 33, n. 2, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29517.

PALMEIRA, Á. R. de O. A.; SILVA, V. A. T. H. da; JÚNIOR, F. L. D.; STANCARI, R. C. A.; NASCENTES, G. A. N.; ANVERSA, L. Physicochemical and microbiological quality of the public water supply in 38 cities from the midwest region of the State of São Paulo, Brazil. **Water Environment Research**, v. 91, n. 8, p. 805–812, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1002/wer.1124.

PEIXOTO, F. da S. Groundwater contamination risk in urban watershed. **Mercator**, v. 19, n. 6, p. 1–17, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.4215/rm2020.e19013.

REZENDE, D.; NISHI, L.; COLDEBELLA, P. F.; SILVA, M. F.; VIEIRA, M. F.; VIEIRA, A. M. S.; BERGAMASCO, R.; FAGUNDES-KLEN, M. R. Groundwater nitrate contamination: Assessment and treatment using Moringa oleifera Lam. seed

extract and activated carbon filtration. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 94, n. 4, p. 725–732, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1002/cjce.22442.

REZENDE, Driano *et al.* Evaluation of the groundwater quality and hydrogeochemistry characterization using multivariate statistics methods: case study of a hydrographic basin in Brazil. **Desalination and water treatment**, v. 161, p. 203–215, 2019.

RICHA, Amina; TOUIL, Sami; FIZIR, Meriem. Recent advances in the source identification and remediation techniques of nitrate contaminated groundwater: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 316, p. 115265, 15 ago. 2022.

RICHARDS, Jayne *et al.* Nitrate contamination in drinking water and colorectal cancer: Exposure assessment and estimated health burden in New Zealand. **Environmental research**, v. 204, n. Pt C, p. 112322, mar. 2022.

ROSA, G. M. da; GABRIEL, M.; SILVA, J. C. da; MENDONÇA, A. M.; JUNIOR, J. A. C.; WASTOWSKI, A. D. Leaching of the different forms of nitrogen by the application of poultry litter, swine waste, and mineral nitrogen on corn cultures (Zea mays L.). **Environmental Quality Management**, v. 28, n. 1, p. 131–138, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1002/tqem.21586

SANTANA, A. G. N.; SUDA, C. N. K.; NASCIMENTO, J. R. S.; VANI, G. S. Physical-chemical and microbiological analysis of water from shallow wells in Imperatriz (MA), Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 7, p. 445–458, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.4136/1980-993X.

SANTOS, L. M. S. S.; MONTEIRO, N. N. de C.; MORAES, G. F. de; REIS, W. D. dos; SANTOS, A. de A. Qualidade da água na área de entorno do antigo lixão de Tangará da Serra (MT). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, p. 323–332, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2021.003.0027.

SANTOS, R. C.; SILVA, R. A. da; SANTOS, M. M. dos; BOVO, A. B.; SILVA, A. F. da. Assessing nitrate contamination in groundwater for public supply: A study in a small Brazilian town. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 25, n. 101084, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101084.

SILVA, Marcela Fernandes *et al.* Avaliação da concentração de nitrato do manancial subterrâneo do município de Maringá-PR no período de 2008 a 2021. **Anais do 32º Congresso da ABES**, 2023.

SILVA, R. de C. A. da; ARAÚJO, T. M. de. Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA). **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 8, n. 4, p. 1019–1028, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1413-81232003000400023.

SILVA, R. L. B.; BARRA, C. M.; MONTEIRO, T. C. do N.; BRILHANTE, O. M. Estudo da contaminação de poços rasos por combustíveis orgânicos e possíveis conseqüências para a saúde pública no Município de Itaguaí, Rio de Janeiro, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 18, n. 6, p. 1599–1607, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-311X2002000600014.

SILVA, Rosângela Aguilar da; SANTOS, Roberto Costa; FERREIRA, Luci Ochi. Avaliação da concentração de nitrato em águas subterrâneas de poços das regiões de Assis e Marília, São Paulo. **Vigil Sanit Debate, Rio de Janeiro**, v. 7, n. 2, p. 102–106, 31 maio 2019.

SILVA, T. R.; LIMA, M. M. C. de; LEITÃO, T. E.; MARTINS, T. N.; ALBUQUERQUE, M. S. C. de. Water quality assessment and geochemical processes in the unconfined coastal Boa Viagem Aquifer, Recife, NE Brazil. **Geochimica Brasiliensis**, p. 56–77, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.21715/gb2358-2812.2021351056.

TEIXEIRA, D. R.; BORGES, M. S.; VARGAS, L. K.; SILVA, F. R.; BENEDUZI, A. Water Quality Assessment in an Area Degraded by Urban Solid Waste in Southern Brazil. **Environmental Quality Management**, v. 34, n. 1, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1002/tqem.22277.

TERAMOTO, E. H.; STRADIOTO, M. R.; CHANG, H. K. Avaliação geoquímica da influência de fossas rudimentares na água subterrânea da região rural de Paulínia/SP. **Geochimica Brasiliensis**, v. 34, n. 2, p. 203–219, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2020342203.

ANÁLISE DAS ESTRUTURAS QUE CONDICIONAM A INTERFERÊNCIA ENTRE POÇOS DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG).

1 Pedro Antonio Roehe Reginato, 2 Aline Saupe Abreu, 3 Taison Anderson Bortolin, 4 Paulo Salvadoretti, 5 Tiago de Vargas, 6 Franciele Schwanck Carlos, 7 Douglas Marcel Quatiabara Sander Libardi, 8 Andrey Martins de Lima

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, e-mail: pedro.reginato@ufrgs.br; 2 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas e-mail: alsaupe@gmail.com; 3 Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), e-mail: taison-bortolin@fepam.rs.gov.br; 4 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro, Departamento de Engenharia de Minas, email: paulo.salvadoretti@ufrgs.br; 5 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, e-mail: tiago.devargas@ufrgs.br; 6 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, e-mail: schwanck.carlos@ufrgs.br; 7 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro, Departamento de Engenharia de Minas, quatiabara@gmail.com; 8 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, e-mail: andrey.mlima93@gmail.com

Palavras-chave: entradas de água; cone de rebaixamento; interferência entre poços.

Resumo

O bombeamento de poços pode provocar o rebaixamento do nível de água em outros poços circundantes, em função da geração do cone de rebaixamento, podendo ocorrer também em aquíferos fraturados desde que os poços estejam associados às mesmas estruturas. Desta forma, o presente estudo envolveu a avaliação da interferência entre poços que captam água do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) que é caracterizado pela ocorrência de aquíferos fraturados, localizados nas estruturas presentes nas rochas vulcânicas. Para o desenvolvimento desse estudo foram analisados dados de variações de nível de água de um poço de monitoramento (PM), dados geológicos e hidrogeológicos de dois poços, imagens obtidas com a perfilagem ótica realizada no poço PM, dados de lineamentos e de perfis hidrogeológicos. Os resultados demonstram a ocorrência de interferências diárias, provocadas por um poço de bombeamento (PP) localizado a 312 m, que gerou variações de nível com amplitudes entre 2,823 e 5,013 m. Nos poços PM e PP foram identificadas fraturas sub-horizontais localizadas no contato entre camadas de rochas vulcânicas (vesiculares a amigdalóides, brechas vulcânicas e rochas alteradas). Na região os poços estão associados a um lineamento de orientação N18W que possui um comprimento de 679 m. As estruturas responsáveis pela conexão e interferência entre os poços estão associadas ao lineamento e às fraturas sub-horizontais presentes nos contatos observados nas entradas de água (E.A). A interferência entre poços é um ponto importante que deve ser avaliado quando da concessão de outorgas para poços que captam água de aquíferos fraturados, como os associados ao SASG.

Introdução

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é um sistema que possui grande importância em diferentes estados do Brasil, principalmente no Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR). Segundo Viero *et al*. (2021) o SASG no RS e SC é amplamente explotado em função da boa qualidade da água, das boas vazões (médias de 14 m³/h) e dos custos relativamente baixos para a perfuração e instalação. Já no PR, Athayde *et al*. (2014) consideram que o SASG tem grande importância em função da ocorrência de poços com vazões e capacidades específicas elevadas, bem como por apresentar águas de excelente qualidade.

Em função da demanda crescente por recursos hídricos nesses estados, novos poços são perfurados a cada ano, sendo que com a instalação desses poços há possibilidade de ocorrência do fenômeno de interferência. A interferência entre poços é gerada em função da formação do cone de rebaixamento do poço que está sendo bombeado, podendo se propagar a diferentes distâncias, dependendo do tipo de aquífero, das condições de bombeamento, entre outros fatores (Feitosa e Demétrio, 2008; Heath, 1983). Esse fenômeno é comum em aquíferos granulares associados a sedimentos e rochas sedimentares, mas pode ocorrer também em aquíferos fraturados.

Para Motta e Costa *et al*. (2009) a análise da interferência entre poços possui grande importância para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, sendo que o resultado dessa análise poderia ser utilizado como critério para a outorga de captação de água subterrânea.

O SASG é caracterizado pela ocorrência de aquíferos fraturados que estão associados às estruturas presentes nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. O fluxo e a circulação da água subterrânea nesses aquíferos são condicionados pelas estruturas tectônicas (fraturas, zonas de fraturas e falhas), de resfriamento (juntas horizontais e verticais, zonas vesiculares a amigdaloides), bem como pelo contato entre derrames vulcânicos (Reginato, 2003; Viero *et al*. 2021, Sanferari *et al*., 2022, Abreu *et al*. 2025). Para Fernandes *et al*. (2023), o fluxo da água subterrânea em rochas vulcânicas pode ocorrer no contato entre as camadas de rochas vesiculares e basálticas, bem como em zonas de fraturas subverticais e sub-horizontais.

Em estudos voltados para avaliação de ensaios de bombeamento em poços que captam água de aquíferos fraturados, foi observado que muitos desses aquíferos apresentam comportamento de dupla-porosidade, caracterizado por fluxo associado às

estruturas, mas também à matriz da rocha. Isso foi observado por Severgnini *et al*. (2021) que realizou estudo com os aquíferos fraturados do SASG, bem como por Cruz *et al*. (2019) que avaliou aquíferos fraturados associados a outras litologias.

A avaliação de interferência entre poços que captam água de aquíferos fraturados foi estudada por diferentes autores. Lima *et al*. (2008), em estudo realizado em aquíferos fraturados localizados nas fraturas presentes em granitos, identificaram a ocorrência de interferência entre poços associados às mesmas estruturas. Já Vilela e Abreu (2018) demonstraram que a interferência entre poços não tem relação direta com a proximidade dos poços, mas sim com a conexão ao mesmo conjunto de estruturas, por isso a distância de interferência pode vir a atingir dezenas a centenas de metros. No trabalho desenvolvido por Vassolo *et al*. (2022) foi identificada que a interferência ocorre quando os poços estão captando água dos mesmos sistemas de fraturas, independente da distância entre os poços. Assim os autores reforçam a importância da realização de monitoramentos para evitar impactos negativos, como aumento do rebaixamento e queima de bombas. Já no estudo realizado por Reginato *et al*. (2023), que avaliou o raio de influência em poços tubulares que captavam água do SASG, foi possível identificar a ocorrência de interferências em poços localizados a 40, 43, 147 e 509 m de distância.

Em suma, o presente estudo visou analisar a interferência entre poços perfurados no SASG, com o objetivo de identificar as estruturas responsáveis pelo fluxo da água subterrânea nos aquíferos fraturados, bem como pela interferência entre os poços.

Material e Métodos

Para o desenvolvimento desse estudo foram consideradas as seguintes etapas: identificação da ocorrência de interferências, obtenção de dados dos poços tubulares, levantamento de estruturas associadas às entradas de água (E.A.), avaliação das estruturas condicionadoras do fluxo e interferência entre os poços de monitoramento (PM) e de bombeamento (PP).

A identificação da interferência entre poços foi realizada com base na análise de dados da rede de monitoramento de variações naturais de nível de água, desenvolvida e mantida pelo grupo de pesquisas “Águas Subterrâneas” do IPH-UFRGS e financiada pela FAPERGS. Com base na análise dos dados de monitoramento foi selecionado o poço tubular (PM) que apresentou evidências de interferência de outro poço (PP) que estava sendo bombeado na região. Deve-se salientar que a rede de monitoramento foi instalada em poços que não estão sendo bombeados, visto que o objetivo da rede é monitorar as variações naturais dos níveis de água do SASG.

Após a identificação da ocorrência de interferência foi realizada busca no SIAGAS (Sistema de Informação de Água Subterrânea do Serviço Geológico do Brasil - SGB) e SIOUT (Sistema de Outorga de Água do Rio Grande do Sul), visando com isso identificar poços de bombeamento que estavam localizados próximos ao poço que estava sendo monitorado. Com base nesses critérios foi identificado um poço tubular em operação de bombeamento outorgado no SIOUT, sendo que os dados geológicos e hidrogeológicos de descrição desse poço, foram obtidos com o DRHS (Departamento de Gestão de Recursos Hídricos e Saneamento do Estado do Rio Grande do Sul). Já os dados geológicos e hidrogeológicos do poço de monitoramento foram obtidos através do banco de dados de poços, elaborado pelo grupo de pesquisa para os poços que fazem parte da rede de monitoramento da região.

O levantamento das estruturas associadas às E.A. nos dois poços foi realizado por meio da análise dos perfis geológicos e construtivos dos poços que continham informações sobre a profundidade de ocorrência das E.A., bem como de vazões associadas às entradas. Posteriormente, foi feito o imageamento óptico do poço de monitoramento, visto que esse não está equipado com bomba (diferente do poço PP), o que permitiu a realização desse procedimento. O imageamento foi feito com uso de sonda OPTV do fabricante Robertson Geologging LTD (Figura 01), visando identificar as litologias e estruturas associadas às E.A., sendo que essa identificação foi feita por meio da interpretação de uma imagem aberta do poço, gerada com o programa *WellCad*®.

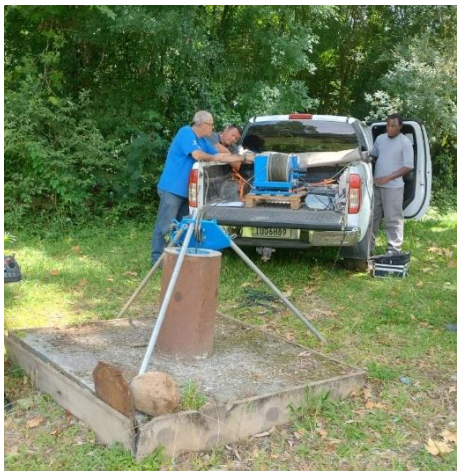


Figura 01: Estrutura e operação do imageamento do poço PM, que faz parte da rede de monitoramento, onde foi identificada a ocorrência de interferência.
Fonte: Autor (2025)

Para a avaliação das estruturas condicionadoras do fluxo e da interferência entre os poços foi realizada a identificação e o traçado de lineamentos na área onde estavam localizados os dois poços. Para isso foram utilizados dados de relevo (Modelo Digital do Terreno), hidrografia (base cartográfica disponibilizada pela Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do estado do RS) e cartas topográficas 1:50.000 elaboradas pelo Exército e disponibilizadas no BDGEx (Banco de Dados Geográficos do Exército). Com uso do programa *Google Earth* foram plotados os dois poços e identificado o lineamento existente, seu comprimento e orientação. Além disso, com esse programa foi feito o perfil de relevo (paralelo ao lineamento), que foi utilizado na construção do perfil hidrogeológico simplificado. Para a construção do perfil os dados de profundidade dos poços e das E.A. foram convertidos em valores de altitude, considerando a cota do terreno coletada com uso de GPS de Navegação da Marca GARMIN. Por fim com base na avaliação do perfil hidrogeológico simplificado e das imagens das estruturas associadas às E.A., realizou-se a interpretação das estruturas que condicionam o fluxo da água subterrânea, bem como a interferência que foi observada entre os dois poços analisados.

Resultados e Discussão

Foi observada uma interferência diária no poço de monitoramento (PM) provocada pelo poço de bombeamento (PP), durante todo o período da série de monitoramento (entre 10/01/2025 e 31/01/2026), conforme pode ser observado na Figura 02.

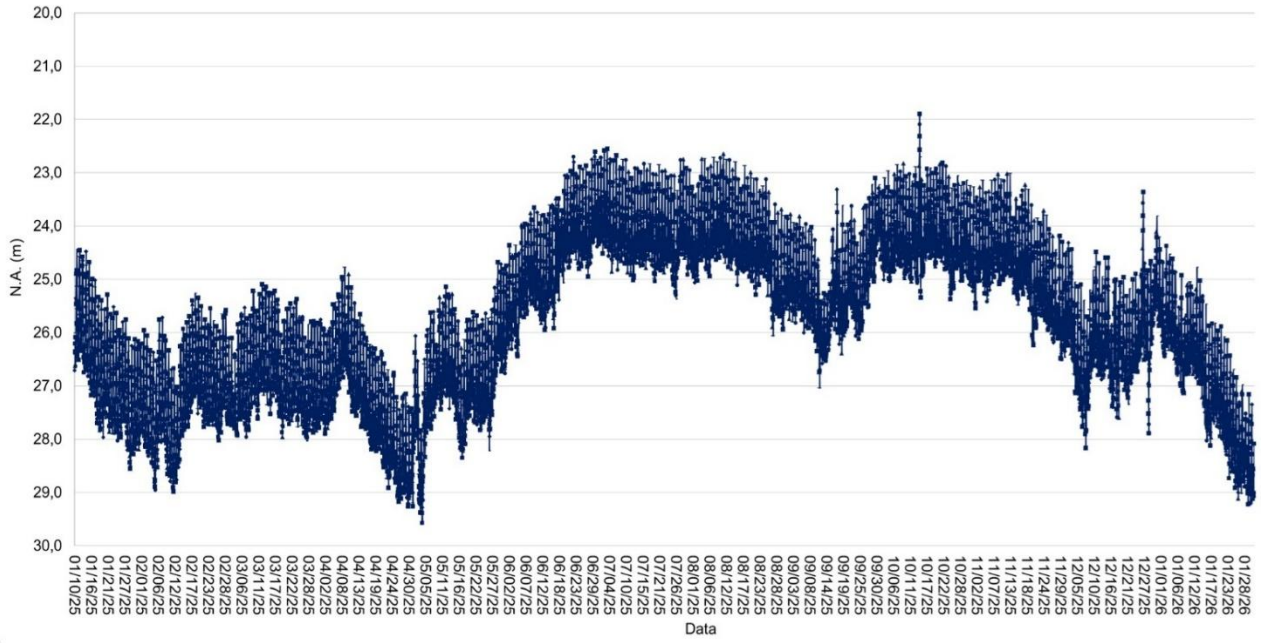


Figura 02: Gráfico das variações dos níveis de água monitorados no poço PM para o período de 10/01/2025 a 31/01/2026.
Fonte: Autor (2026)

Analisando toda a série é possível identificar tendências de variações de declínio ou de elevação do nível de água, em determinados intervalos de tempo. Isso está relacionado com as condições de bombeamento do poço PP, que provoca diferentes intensidades de interferência entre os poços, mas também apresenta forte influência das condições de precipitação que ocorre na região e que é responsável pela recarga do SASG. Embora a análise da recarga não seja objetivo desse artigo, deve-se destacar que o poço PM tem influência do poço PP e das mudanças sazonais dos processos de precipitação e recarga.

Visando avaliar as amplitudes de variação de nível de água em cada mês, foram identificados os valores máximos e mínimos do nível de água, sendo depois calculada a amplitude pela diferença entre os valores identificados. Na Figura 03 é apresentado um gráfico com as amplitudes de variações dos níveis, onde é possível observar que as maiores oscilações ocorreram nos meses de maio, agosto e dezembro de 2025 e janeiro de 2026.

Os dados geológicos e hidrogeológicos obtidos dos perfis geológicos e construtivos são apresentados na Tabela 01. Os dados indicam que os poços interceptaram estruturas que estão associadas as E.A. informadas durante o processo da perfuração do poço tubular. O poço PM, que possui uma profundidade de 180 m, interceptou três estruturas principais localizadas a 127, 139 e 156 m, sendo a primeira E.A. caracterizada pela maior vazão estimada em campo. Já o poço PP, com profundidade de 150 m e localizado em ponto mais alto do terreno em relação ao poço PM, apresentou duas E.A. localizadas em 78 e 138 m, sendo que a segunda E.A. apresentou vazão estimada em campo de 18 m³/h. A descrição litológica atribuída ao poço PP foi simplificada, entretanto devido ao detalhamento realizado na descrição das litologias do poço PM, foi possível identificar à ocorrência de diferentes tipos de basaltos que estão associados a diferentes derrames de rochas vulcânicas. As vazões finais de bombeamento dos poços são próximas, tendo o poço PM apresentado a maior vazão, que pode estar associada a maior quantidade de E.A. interceptadas, ou mesmo ao maior diâmetro desse poço.

Conforme Reginato *et al*. (2026) a quantidade de E.A. que um poço pode interceptar depende de diferentes fatores, como quantidade, tamanho, orientação, mergulho e conexão de lineamentos/fraturas, tipos e estruturação dos derrames de rochas vulcânicas, bem como contato entre os derrames. Mancuso e Santos (2021) destacam que a ocorrência de mais de uma E.A. é comum quando há ocorrência de lineamentos de maior porte.

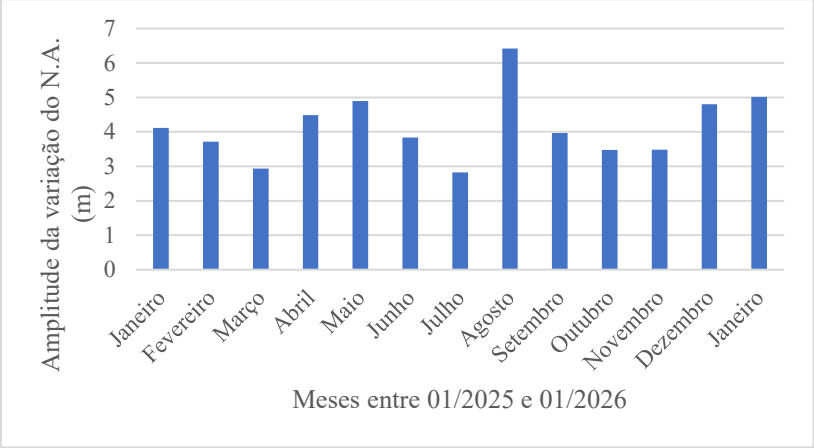


Figura 03: Gráfico das amplitudes mensais de variações dos níveis de água para a série analisada do poço PM (10/01/2025 a 31/01/2026.
Fonte: Autor (2026)

Tabela 01: Dados dos poços de monitoramento (PM) e de bombeamento (PP) informados nos perfis geológicos e construtivos dos poços.

Dados	Poço PM	Poço PP
Cota do Terreno (m)	597	618
Diâmetro (“)	8”	6”
Profundidade Final (m)	180	150
Litologias (descrição do perfil)	Basaltos cinza fraturado oxidado, basalto cinza carijó, basalto castanho oxidado, basalto cinza médio fraturados, basalto castanho amigdalar, basalto cinza acastanhado esverdeado fraturado, basalto cinza maciço e fraturado.	Basaltos de coloração cinza
NE (m)	27,02	40
Vazão De Explotação (m³/h)	28	20
E.A. - Profundidade (m) e	127 e 9,8	78 e 2
Vazão Associada (m³/h)	139 e 2,8	138 e 18
	156 e 6,6	
Distância entre os poços (m)	312	312

Com base na avaliação do perfil geológico e construtivo do poço PM e das imagens obtidos com o levantamento OPTV realizado nesse poço, foi possível identificar os tipos de estruturas que estão associadas as E.A. Os resultados são apresentados na Figura 04.

A primeira E.A. informada no perfil estaria situada em 127 m de profundidade, sendo que pela imagem observa-se a ocorrência de uma zona de contato fraturada (127,6 a 127,8 m), localizada na passagem de uma camada de basalto com estrutura amigdalóide a vesicular (predomínio de amigdalas) para uma camada de basalto alterado. A segunda E.A. foi localizada nos 139 m, sendo que pela imagem OPTV a mesma estaria associada a uma zona de contato alterada (entre 138,6 e 138,8 m), localizada entre camadas de basalto veicular a amigdaloide (predomínio de vesículas) e camadas de brechas vulcânicas pouco fraturadas. A terceira E.A. foi identificada nos 156 m, sendo que pela imagem OPTV a mesma estaria associada a uma zona de contato com fratura sub-horizontal (155,6 a 155,7 m), disposta entre uma camada de basaltos que apresentam estruturas de fluxo com uma camada de brecha vulcânica.

A ocorrência de E.A. associadas a fraturas, estruturas de resfriamento e contatos entre diferentes tipos de rochas vulcânicas já foi identificada, em estudos realizados no SASG, na região nordeste do estado do RS. Entre eles pode-se citar o trabalho de Abreu *et al*. (2025), que identificou E.A. associadas a rocha alteradas e fraturadas (Grupo 1), rochas com estrutura vesicular a amigdalóide que podem apresentar ou não fraturas (Grupo 2), brechas vulcânicas (Grupo 3) e rochas com fraturas e zonas de fraturas (Grupo 4). Para esses autores os grupos 2 e 4 são os que apresentaram maiores ocorrências de E.A. Já Sanferari *et. al*. (2022), demonstrou a importância de contatos de derrames como condicionadores de fluxo da água subterrânea e ocorrência de E.A. Também deve-se destacar que a feição de contato observada na E.A. localizada a 127 m, onde há ocorrência de basaltos alterados apresentando diferentes colocações já foi observada em campo num estudo realizado por Bortolin (2014), no município de Carlos Barbosa que faz divisa com o município onde está localizado o poço PM.

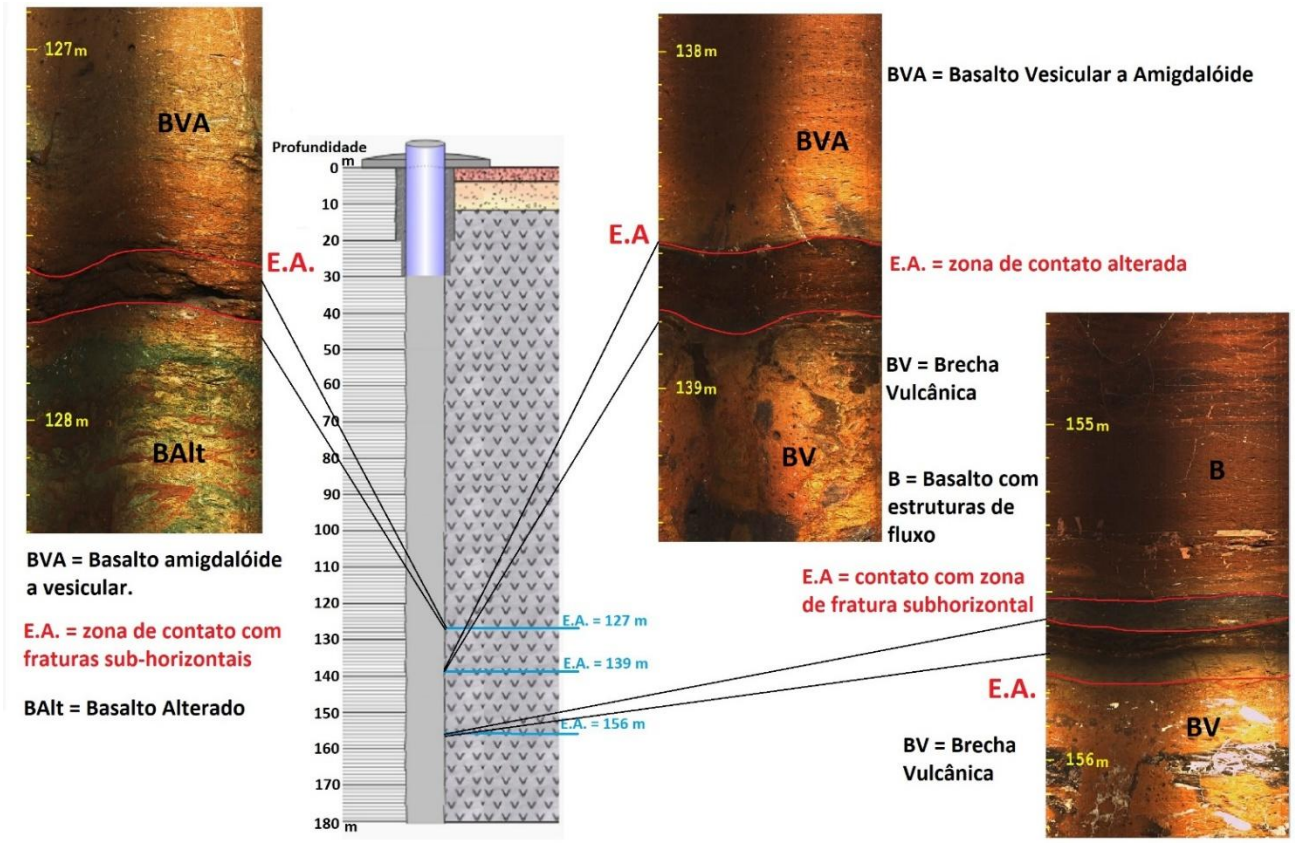


Figura 04: Perfil do poço PM, com localização das E.A. (elaborado com base no perfil disponibilizado no SIAGAS e imagens OPTV), com descrição simplificada da litologia e suas estruturas.
Fonte: Autor. (2026)

Para a avaliação das estruturas que estariam condicionando a ocorrência da interferência entre poços PP e PM foi identificada a ocorrência de lineamentos que estariam associados aos dois poços (Figura 05).

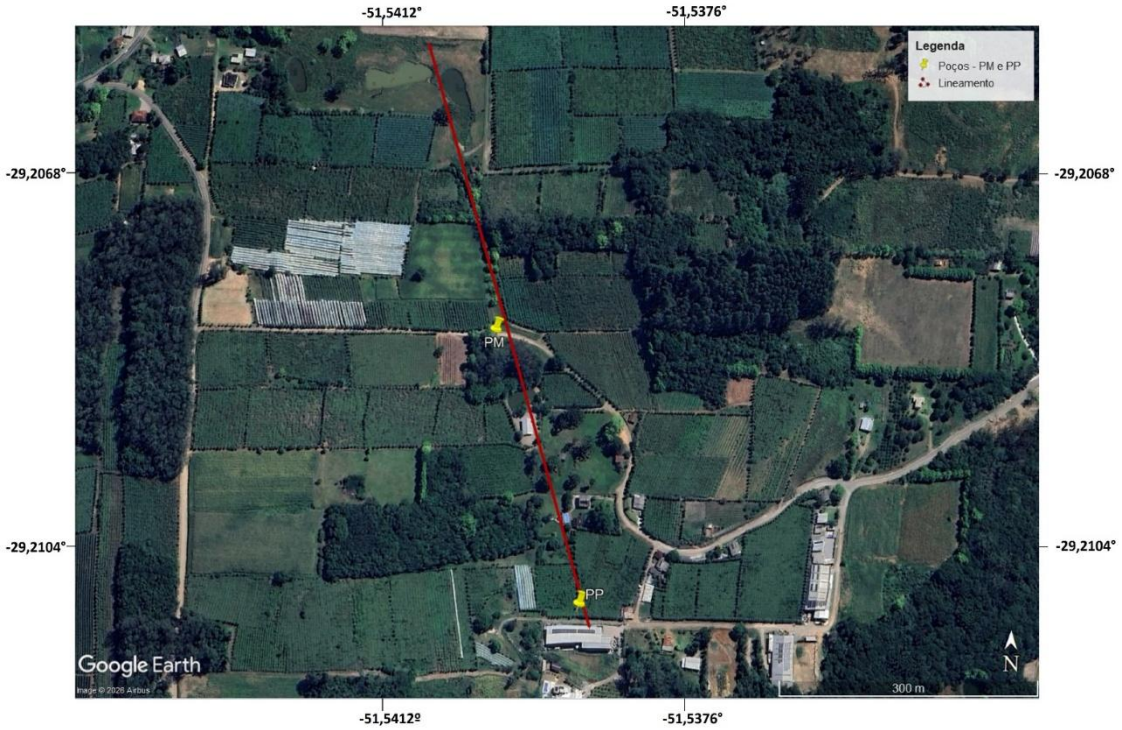


Figura 05: Localização do lineamento existente e dos poços de monitoramento (PM) e bombeamento (PP).
Fonte: Autor (2026)

Na figura 05 é apresentada a localização dos poços e do lineamento identificado, que possui um comprimento de 679 m e uma orientação de N18W (342º). O estudo realizado por Reginato *et al*. (2006) indicou que lineamentos com orientação NW são os que apresentam maior possibilidade de ocorrência de aquíferos fraturados, sendo que as orientações como N30-60W estariam associadas a poços com produtividade superior aos 20 m³/h. Além disso, a ocorrência de interferência entre poços em aquíferos fraturados pode ocorrer a diferentes distâncias, desde que os poços estejam associados ao mesmo conjunto de estruturas como identificado nos trabalhos de Vilela e Abreu (2020) e Vassolo *et al*. (2023). Assim, o lineamento identificado na área próximo aos dois poços, pode ser considerado como a estrutura de conexão entre os aquíferos, promovendo a ocorrência da interferência a uma distância de 312 m. Estando assim em concordância com o estudo desenvolvido por Reginato *et al*. (2023), que demonstraram que os raios de influência gerados pelo bombeamento de poços que captam água do SASG, podem atingir dezenas a centenas de metros de distância dentro das estruturas que conectam os poços.

Na Figura 06 é apresentado o perfil hidrogeológico simplificado, elaborado ao longo da orientação do lineamento (N18W), e com distância horizontal entre os dois poços.

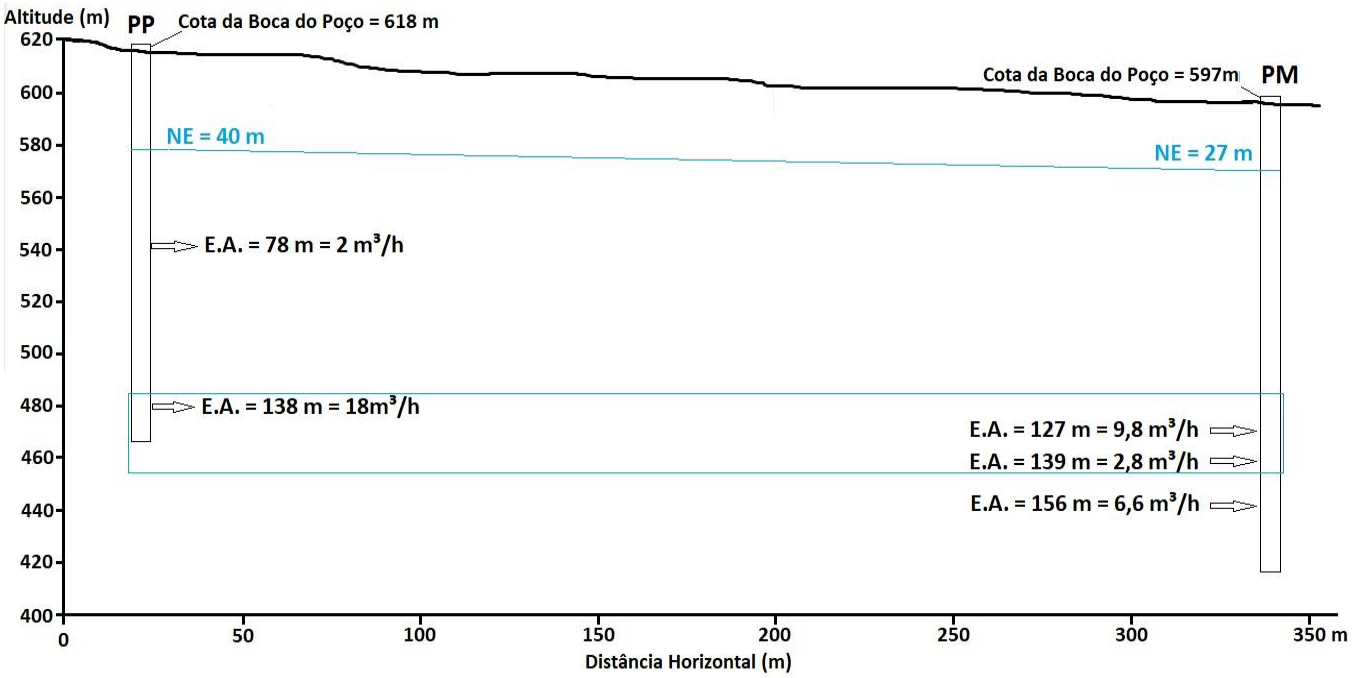


Figura 06: Perfil hidrogeológico simplificado com a identificação das E.A e vazões associadas aos poços PM e PP, bem como da região de ocorrência de estruturas (retângulo azul) responsáveis pela conexão e geração da interferência. Fonte: Autor (2026)

Com base na análise desse perfil é possível observar que a segunda E.A. do poço PP (localizada em 138 m de profundidade), pode ser correlacionada a primeira E.A. identificada no poço PM (127 m de profundidade). Como a segunda E.A. do poço PM está localizada a 12 m abaixo da primeira E.A., pode-se supor que a mesma possa contribuir também com o processo de interferência entre os poços.

Os dados dos lineamentos e do perfil hidrogeológico simplificado permitem definir que as estruturas condicionadoras do processo de interferência observado entre os poços PM e PP estão associadas ao lineamento de orientação NW (N18W) e aos contatos e fraturas sub-horizontais que foram identificadas no poço PM. O lineamento poderia representar a ocorrência de estruturas sub-verticais que quando conectadas as estruturas sub-horizontais, condicionam a ocorrência da recarga e fluxo pelo meio fraturado, bem como do processo de interferência entre os dois poços.

Considerações finais

Esse estudo demonstrou que em aquíferos fraturados pode haver ocorrência de interferência entre poços, quando os mesmos estão associados a mesmas estruturas (lineamentos e fraturas).

Foi identificada no poço de monitoramento (PM) à ocorrência de interferências diárias provocados por um poço de bombeamento (PP) localizado a 312 m de distância. Essa interferência foi responsável por rebaixamentos observados no poço PM, que variaram entre 2,823 e 5,013 m.

No poço PM foram identificadas três E.A. localizadas em 127, 139 e 156 m, enquanto no poço PP apresentou duas E.A., localizadas aos 78 e 138. As imagens obtidas com a perfilagem ótica |(OPTV) permitiram determinar que as E.A. estão associadas a estruturas sub-horizontais que ocorrem no contato entre diferentes rochas vulcânicas. Além disso, os poços estão localizados junto a um lineamento de orientação N18W, que possui comprimento de 679 m. As estruturas associadas as E.A. e o lineamento condicionam o fluxo da água subterrânea e a ocorrência da interferência.

A avaliação da interferência entre poços que captam água de aquíferos fraturados tem grande importância e deve ser considerada na gestão de recursos hídricos subterrâneos, bem como na liberação de outorgas para captação de aquíferos fraturados.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à FAPERGS – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, pelo financiamento do projeto (Termo de Outorga 23/2551-0001914-0 – Edital FAPERGS/CNPq 07/2022 – Programa de Apoio à Fixação de Jovens Doutores no Brasil), à Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Referências Bibliográficas

Abreu, A.S.; Reginato, P.A.R.; Vargas, T.; Carlos, F.S.; Bortolin, T.A.; Salvadoretti, P. Análise das Litologias Associadas às Entradas de Água em Poços Tubulares no Sistema Aquífero Serra Geral (RS). **Revista Caminhos da Geografia**. v.26, nº108. p. 133-148, Dezembro, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.14393/RCG2610877812

Athayde, G.B.; Athayde, C.M; Rosa Filho, E.F; Licht, O.A.B. 2014. Contribuição ao estudo da conectividade entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG) no Estado do Paraná, Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**. v. 71, nº1, p.36-45, Outubro, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.5380/geo.v71i0.31790

Bortolin, T.A. **Padrões Hidroquímicos e Isotópicos do Sistema Aquífero Serra Geral do Município de Carlos Barbosa, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/98154

Cruz, F.; Teramoto, E.H. Navarro, J.; Chang, H.K. Análise Derivativa de Testes de Bombeamento em Aquíferos Fissurais no Município de Jundiaí/SP. **Revista Instituto Geológico**, v.40, nº3, p.13-26. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.33958/revig.v40i3.673

Feitosa, F.A.C; Demétrio, J.D.A. Testes de Bombeamento em Poços Tubulares. In: Feitosa, F.A.C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3ªed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/14818/3/livro_hidrogeologia_conceitos.pdf

Fernandes, A.J.; Rouleau, A.; Amaral Vargas Jr. E. **Structural Geology Applied to Fractured Aquifer Characterization**. Guelph, Ontário, Canadá, 2023. Disponível em: https://gw-project.org/pt-br/books/geologia-estrutural-aplicada-a-caracterizacao-a-aquifero-fraturado/

Heath, R. C. **Basic Groundwater Hydrology**. Geological Survey Water-Supply Paper, 2220. 10ed. 86p. USGS, 1983. Disponível em: https://pubs.usgs.gov/wsp/2220/report.pdf

Lima, L.A.; Silva Jr. G.C; Menezes, J.M.; Acosta Junior, A.P. Interpretação de Ensaios de Bombeamento em Aquíferos Fraturados: Caso de Estudo na Bacia do Rio São Domingos, São José de Ubá-RJ. In: **XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Natal. 2008. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23738

Mancuso, M.A.; Santos, C.E. Avaliação Hidrogeológica quali-quantitativa do aquífero fraturado Serra Geral, localizado no noroeste do Rio Grande do Sul. **Geologia USP – Série Científica**, 21(1), 71-88. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-176588

Motta e Costa, M.L.; Batista, M.L de C.; Ribeiro, M.M.R.; Albuquerque, J.P. T.; Rêgo, J.C. Simulação da Interferência entre Poços como Critério de Outorga dos Direitos de Uso das Águas Subterrâneas. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Mato Grosso. 2009. Disponível em: https://revistas.abrhidro.org.br/article.php?Article=1678

Reginato, P.A.R. **Integração de Dados Geológicos para Prospecção de Aquíferos Fraturados em Trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS)**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/117392

Reginato, P.A.R.; Strieder, A.J. Integração de Dados Geológicos na Prospecção de Aquíferos Fraturados na Formação Serra Geral. **Águas Subterrâneas.** V20, nº1, 2006. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/9713/6701

Reginato, P.A.R.; Vargas, T.; Carlos F.S. Raio de Influência e Coeficiente de Armazenamento em poços tubulares do Sistema Aquífero Serra Geral. In: **7º Congresso Internacional de Tecnologia para o Meio Ambiente**. Bento Gonçalves, RS. 2023. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/262421

Reginato, P.A.R.; Lisboa, N.A.; Dani, N.; Remus, M.V.D.; Fragomeni, L.P. de M.; Ribeiro, R.R. Análise das Entradas de Água e sua Relação com a Produtividade de Poços Tubulares que Captam Água do Sistema Aquífero Serra Geral no Município de Passo Fundo (RS). Derbyana, 47: e895, 2026. Disponível em: https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/895

Sanferari, A.; Reginato, P.A.R.; Quillfeldt, S.D. O contato ente derrames vulcânicos como condicionante da ocorrência e da produtividade de aquíferos fraturados. **Águas Subterrâneas**, 36, nº2, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.14295/ras.v36i2.30137

Severgnini. B.R.; Bortolin, T.A; Reginato, P.A.R. Avaliação do Sistema Aquífero Serra Geral com um modelo de dupla porosidade baseado na análise de testes de bombeamento. **Águas Subterrâneas**. v.35, n. 1, p. 103-119, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.14295/ras.v35i1.30010

Vassolo, S.; Tiberghien, C.; Neukum, C.; Baranyikwa, D.; Ryumeko, M.; Miburo, D.; Nahimana, N. Evaluation of transmissivity in a fractured aquifer – the Nyanzari Wellfield, Burundi. Grundwasser – Zeitschrift der Facksektion Hydrogeologie. 27:290-42, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00767-021-00501-2

Viero, A.P.; Roisenberg, A.; Freitas, M.A.; Reginato, P.A.R (2021). O Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: A. R. Jelinek & C.A. Sommer (eds). **Contribuições a Geologia do Rio Grande do Sul e Santa Catarina** (pp. 469-485). Sociedade Brasileira de Geologia. Compasso Lugar-Cultura. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/221962

Vilela, R.C. da C.L.; Abreu, A.E.S. Estudo das Interferências entre os Poços Tubulares Profundos do Campus da Unicamp em Barão Geraldo – Campinas, SP. In: **XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Campinas, SP. 2018. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29331

QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM POÇOS TUBULARES E SUA RELAÇÃO COM ÁGUAS SUPERFICIAIS EM ÁREA DE AGRICULTURA FAMILIAR NA BAIXADA CUIABANA (MT)

1 Almeida, Edilaine Cristina da Silva, 2 Sanches, Luciana
1 Doutoranda em Física Ambiental PPGFA/UFMT),e-mail: edilaine.agronoma@gmail.com;
2 Profª Drª PPGFA/UFMT, luciana.sanches@ufmt.br.

Resumo

A qualidade da água subterrânea é um fator determinante para a segurança hídrica em áreas rurais, especialmente em regiões com forte sazonalidade climática. Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água de poços tubulares e sua relação com águas superficiais em um assentamento da agricultura familiar na Baixada Cuiabana (MT). Foram analisados sete poços tubulares, com coletas realizadas bimestralmente ao longo de um ano, além de amostras do Rio Coxipó, permitindo a comparação entre sistemas subterrâneo e superficial. As medições foram realizadas *in loco* por meio de equipamento multiparâmetro portátil, considerando os parâmetros condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais (SDT), pH e oxigênio dissolvido (OD). Os resultados evidenciaram maior mineralização da água subterrânea, com valores de condutividade e SDT significativamente superiores aos observados no rio, associados ao maior tempo de residência da água no aquífero e à interação com as formações geológicas. O pH apresentou valores levemente ácidos nos poços e próximos à neutralidade no sistema superficial, enquanto o oxigênio dissolvido foi mais elevado no rio, refletindo maior reaeração. De modo geral, os parâmetros analisados atenderam aos limites estabelecidos pela legislação vigente, embora a elevada carga iônica da água subterrânea possa implicar restrições operacionais. Conclui-se que as águas subterrâneas representam um recurso estratégico para o abastecimento em áreas rurais, sendo fundamental o monitoramento contínuo e a adoção de práticas de gestão sustentável para garantir sua qualidade e disponibilidade a longo prazo.

Palavras-chave: hidrogeoquímica; aquíferos; parâmetros físico-químicos; monitoramento ambiental; recursos hídricos.

Introdução

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida, dos ecossistemas e das atividades produtivas (Unesco, 2022; Giri, 2021), sendo sua disponibilidade diretamente influenciada por fatores climáticos e antrópicos. Em regiões tropicais, como o Centro-Oeste brasileiro, a forte sazonalidade das chuvas, com períodos bem definidos de estiagem e precipitação, condiciona a dinâmica hidrológica e influencia a disponibilidade de recursos hídricos (Souza et al, 2013).

Nesse contexto, as águas subterrâneas desempenham papel estratégico na segurança hídrica, especialmente em áreas rurais, onde frequentemente constituem a principal fonte de abastecimento (Unesco, 2022; Hirata et al, 2020). No entanto, no Brasil e em diversas regiões do mundo, a exploração desse recurso ocorre, em muitos casos, de forma desordenada, sem controle adequado, o que pode comprometer sua qualidade e sustentabilidade (Nemčić-Jurec et al., 2022).

Além disso, atividades antrópicas, como agricultura intensiva e mineração, são reconhecidas como importantes fontes de contaminação das águas subterrâneas, especialmente por nitrato e outros íons dissolvidos, podendo impactar tanto a qualidade da água quanto a saúde humana (Verma et al., 2023). O uso e ocupação do solo exercem influência direta na composição química da água subterrânea, com processos de lixiviação e transporte de contaminantes ao longo do perfil do solo (Rawat et al., 2022; Islam et al., 2025).

Adicionalmente, o tempo de residência da água no aquífero constitui um fator determinante na sua composição físico-química, favorecendo processos de dissolução mineral e aumento da carga iônica, características típicas de águas subterrâneas (Osenbrück et al., 2006). Esses processos são intensificados em ambientes tropicais, onde a interação entre clima, solo e geologia é mais dinâmica (Çalli et al, 2024; Ravbar et al, 2023).

Apesar da relevância do tema, ainda são escassos estudos em escala local que avaliem de forma integrada a qualidade da água subterrânea em comunidades rurais e sua relação com as características ambientais da região. Essa lacuna limita o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão e uso sustentável dos recursos hídricos.

Diante desse contexto, tem-se a hipótese que a água subterrânea utilizada por meio de poços tubulares em áreas de agricultura familiar apresenta características físico-químicas distintas da água superficial, refletindo processos hidrogeoquímicos e influências antrópicas locais.

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar a qualidade da água de poços tubulares em um assentamento da agricultura familiar na Baixada Cuiabana, visando subsidiar estratégias de uso e gestão sustentável dos recursos hídricos. Como objetivos específicos, busca-se: (i) caracterizar a área de estudo sob os aspectos ambientais e climáticos; (ii) comparar a qualidade da água subterrânea e superficial; e (iii) analisar os parâmetros físico-químicos da água em relação aos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação vigente.

Material e Métodos

Localização e descrição da área de estudo

A área de estudo corresponde a um distrito rural do município de Cuiabá/MT, fundado em 1932, cujo nome tem origem na língua indígena bororo e significa "Água Grande", em referência ao rio que o margeia, o Coxipó-Açu (Coxipó = rio; açu = grande). A região também apresenta ocorrência da palmeira babaçu, espécie vegetal característica local.

O distrito está situado à margem esquerda do rio Coxipó-Açu, nas coordenadas aproximadas de latitude 15º16'50" S e longitude 56º07'21" W, abrangendo uma área de aproximadamente 94.746 hectares (Mato Grosso, 2022), conforme dados do Instituto de Terras de Mato Grosso, conforme mapas de elevação e localização abaixo (Figura 1 e 2). A área integra a zona rural do município de Cuiabá e apresenta uso do solo predominantemente voltado à agricultura familiar, além da presença de atividades mineradoras e serviços públicos.

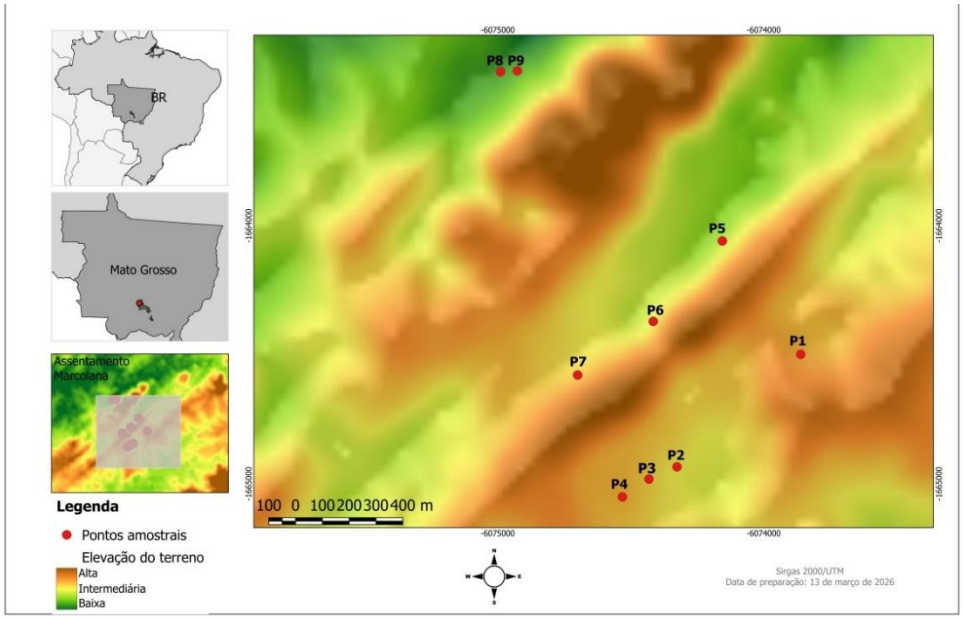


Figura 1 – Mapa de elevação da área pesquisada. Fonte: Dados da pesquisa (2026).

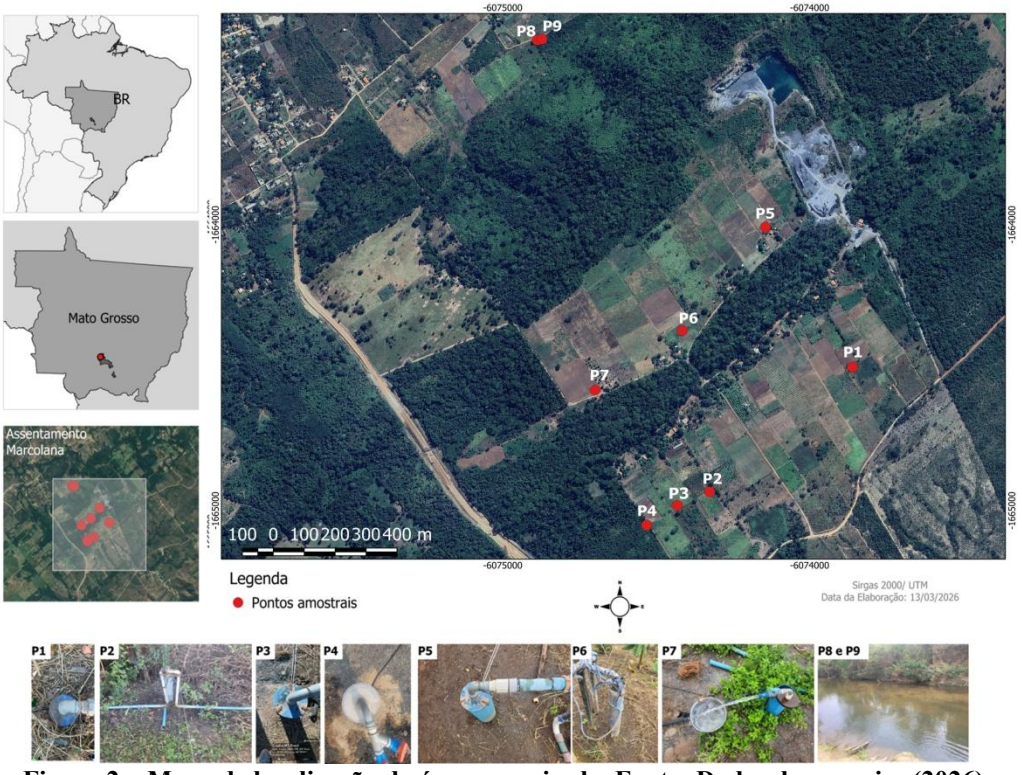


Figura 2 – Mapa de localização da área pesquisada. Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A dinâmica socioeconômica local é caracterizada pela predominância de pequenas propriedades agrícolas, associadas à produção familiar, coexistindo com empreendimentos mineradores que empregam parte significativa da população. Complementarmente, atividades ligadas aos setores de educação e saúde também contribuem para a estrutura ocupacional da região.

O clima da região é classificado como Aw (tropical de savana), segundo a classificação climática de Köppen (Souza et al, 2013), caracterizado por elevadas temperaturas do ar e pela ocorrência de duas estações bem definidas: uma estação chuvosa, entre novembro e março, e uma estação seca, entre abril e outubro. A precipitação média anual varia entre 1.200 e 1.500 mm, com forte concentração no período chuvoso, conforme dados históricos do Instituto Nacional de Meteorologia (Brasil- INMET, 2026), estação Cuiabá/MT (A901).

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do rio Cuiabá, integrante do sistema hidrográfico do Alto Paraguai, que apresenta elevada relevância regional, tanto para o abastecimento hídrico quanto para as atividades produtivas e a manutenção dos ecossistemas.

Coleta e análise de água proveniente de poços tubulares

O estudo contemplou a análise da qualidade da água proveniente de poços tubulares e do Rio Coxipó, permitindo a comparação entre sistemas subterrâneo e superficial. Foram selecionados sete poços tubulares para amostragem, e as coletas foram realizadas de forma bimestral ao longo de um período de doze meses. As medições foram realizadas *in loco*, utilizando equipamento multiparâmetro portátil e termômetro digital, de modo a garantir maior confiabilidade dos dados e minimizar possíveis alterações nas características da água durante o transporte das amostras. Foram avaliados os principais parâmetros físico-químicos indicativos da qualidade da água, incluindo condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais (SDT), potencial hidrogeniônico (pH) e oxigênio dissolvido (OD).

Resultados e Discussão

A análise das normais climatológicas da estação meteorológica de Cuiabá/MT, obtidas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), evidencia um padrão climático típico de regiões tropicais do tipo Aw (Souza et al, 2013), caracterizado por forte sazonalidade térmica e pluviométrica.

A temperatura média mensal apresenta baixa amplitude anual, variando aproximadamente entre 23°C e 29°C. Os menores valores ocorrem nos meses de junho e julho, associados à atuação de massas de ar mais frias no período seco, enquanto os maiores valores são registrados entre setembro e outubro, antecedendo o início da estação chuvosa. Observa-se ainda um leve aumento das temperaturas médias nas séries mais recentes (1991–2020), indicando possível tendência de aquecimento regional (Unesco, 2022).

A evaporação total acompanha o comportamento térmico, com aumento progressivo ao longo do ano até atingir máximos entre agosto e setembro, período de maior déficit hídrico e menor umidade relativa. Esse padrão reforça a intensificação da demanda atmosférica por água durante a estação seca (Giri, 2021).

A umidade relativa do ar apresenta comportamento inverso ao da temperatura e evaporação, com valores mais elevados no período chuvoso (janeiro a março), superiores a 80%, e redução significativa durante a estação seca, atingindo valores mínimos entre agosto e setembro, próximos a 60%. Esse período crítico está associado a condições de desconforto térmico e maior risco de incêndios e estresse hídrico.

A precipitação apresenta elevada concentração sazonal, com máximos entre dezembro e março, quando os totais mensais superam 200 mm, e mínimos acentuados entre junho e agosto, caracterizando um período de estiagem bem definido. Esse regime evidencia a dependência da recarga hídrica em poucos meses do ano (Hirata et al, 2020).

Os dados recentes de 2024 e 2025 confirmam esse padrão sazonal, porém indicam maior irregularidade na distribuição das chuvas, com eventos concentrados e períodos prolongados de estiagem, especialmente durante o inverno, o que pode estar associado a variabilidades climáticas recentes e possíveis efeitos das mudanças climáticas. De forma integrada, o regime climático da região exerce forte controle sobre os processos hidrológicos e hidrogeológicos, influenciando diretamente a recarga de aquíferos, a qualidade da água e a disponibilidade hídrica, especialmente em sistemas dependentes de águas subterrâneas.

Tabela 1. Síntese das variáveis climatológicas da região de estudo

Variável	Estação chuvosa (Nov–Mar)	Estação seca (Abr–Out)
Temperatura do ar	26–29 °C	23–27 °C
Precipitação pluvial	> 200 mm/mês	< 50 mm/mês (jun–ago)
Umidade relativa	> 80%	~60% (mínimos em ago-set)
Evaporação	Moderada	Elevada (máx. ago-set)

Fonte: Dados dda pesquisa (2024 e 2025).

Qualidade da água subterrânea (poços tubulares) e superficial (Rio Coxipó)

A Tabela 2 apresenta uma síntese integrada dos parâmetros físico-químicos da água.

Tabela 2. Qualidade da água subterrânea (poços tubulares) e superficial (Rio Coxipó).

Parâmetro	Unidade	Anual	
		Poços	Rio Coxipó
Condutividade	µS/cm	600,0	24,2
Sólidos Dissolvidos	mg/L	382,0	8,0
pH	–	6,3	7,2
Oxigênio Dissolvido	mg/L	4,5	6,7

Fonte: Dados dda pesquisa (2024 e 2025).

Os resultados evidenciam diferenças consistentes entre a qualidade da água subterrânea (poços tubulares) e superficial (Rio Coxipó), refletindo distintos processos hidrogeoquímicos e dinâmicas ambientais. A condutividade da água dos poços foi aproximadamente 24 vezes maior que a do Rio Coxipó, indicando maior concentração de íons dissolvidos na água subterrânea, associada ao maior tempo de residência e à interação prolongada com as formações geológicas. Esse comportamento é coerente com sistemas aquíferos em ambientes tropicais (Iritani & Ezaki, 2012; Von Sperling, 2007).

Os sólidos dissolvidos totais (SDT) apresentaram valores significativamente mais elevados nos poços tubulares em comparação ao Rio Coxipó, evidenciando o maior grau de mineralização da água subterrânea, associado ao prolongado tempo de residência e à interação com as formações geológicas. Em termos relativos, os valores observados nos poços são aproximadamente 47 vezes superiores aos do rio, reforçando essa diferença hidrogeoquímica entre os sistemas. Em relação a Portaria GM/MS 888/2021 (Brasil, 2021), que estabelece limite de 1.000 mg/L para SDT em águas destinadas ao consumo humano, os valores obtidos encontram-se dentro dos padrões de potabilidade. No entanto, níveis mais elevados de SDT podem estar associados a alterações nas características organolépticas da água e a possíveis efeitos operacionais, como a formação de incrustações em sistemas de abastecimento.

O pH variou entre ≈6,3 nos poços e ≈7,2 no Rio Coxipó. Esses valores atendem à faixa recomendada pela Portaria GM/MS 888/2021 (6,0–9,5), (Brasil, 2021). No contexto das águas superficiais, segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (Brasil, 2005), a faixa de pH aceitável para rios de Classe 2 (usos múltiplos, incluindo abastecimento após tratamento) também se situa entre 6,0 e 9,0, indicando adequação do Rio Coxipó nesse parâmetro.

O oxigênio dissolvido (OD) apresentou valores mais elevados no Rio Coxipó em comparação aos poços, refletindo a maior reaeração em sistemas superficiais. De acordo com a Resolução CONAMA 357/2005 (Brasil, 2005), para rios Classe 2, o OD deve ser ≥5 mg/L. Assim, os valores observados no Rio Coxipó indicam boa condição de oxigenação e, portanto, qualidade ambiental adequada sob esse aspecto.

Considerações Finais

Os resultados evidenciam que a qualidade da água na área de estudo é condicionada principalmente pelos processos hidrogeoquímicos associados ao meio subterrâneo. A água dos poços tubulares apresentou maior grau de mineralização em relação à água superficial, com valores significativamente superiores de condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais, refletindo o maior tempo de residência e a interação com as formações geológicas.

Do ponto de vista normativo, os parâmetros analisados encontram-se, em geral, dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente, indicando adequação para uso. No entanto, a elevada carga iônica da água subterrânea pode implicar restrições operacionais e necessidade de monitoramento contínuo, especialmente em sistemas de abastecimento.

O regime climático regional, caracterizado por forte concentração das chuvas em poucos meses do ano, indica elevada dependência da recarga hídrica sazonal, reforçando a importância das águas subterrâneas como alternativa estratégica para abastecimento em períodos de estiagem.

Dessa forma, o estudo contribui para o entendimento da qualidade da água em sistemas rurais dependentes de poços tubulares, evidenciando a necessidade de práticas de gestão sustentável, monitoramento sistemático e controle das pressões antrópicas, a fim de garantir a segurança hídrica e a disponibilidade do recurso a longo prazo.

Referências Bibliográficas

Brasil. Agência Nacional de Águas. Outorgas Emitidas pelas Unidades da Federação vigentes em julho de 2016 (SHP). Recuperado em 25/02/2026, em http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=a13c9093-34bd-403f-88db-6ff-bad2069e6.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2005. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. **Diário Oficial da União**, Brasília. Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf.

Brasil. Ministério da Saúde, 2021. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562.

Çallı, K. Ö.; Chiogna, G.; Bittner, D.; Sivelle, V.; Labat, D.; Richieri, B.; Çalli, S. S.; Hartmann, A., 2024. Karst water resources in a changing world: review of solute transport modelling approaches. Reviews of Geophysics, 2024. Recuperado em 25/02/2026, em https://hal.science/hal-04818837v1/file/734328.pdf.

Cuiabá/MT, 2021. Secretaria Municipal de Educação. Projeto Político Pedagógico da EMEBC Nª Sª da Penha de França. Cuiabá-MT.

Giri, S., 2021. Water quality prospective in Twenty First Century: status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: a review. Environ. Pollut, v. 271. Recuperado em 25/02/2026, em https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332.
Hartmann, A.; Scott, J.; Gleeson, T.; Wada, Y.; Andréo, B.; Barberá, J. A.; Brielmann, H.; Bouchaou, L.; Charlier, J.-B.; Darling, W. G.; Filippini, M.; Garvelmann, J.; Goldscheider, N.; Kralik, M.; Kunstmann, H.; Ladouche, B.; Lange, J.; Lucianetti, G.; Martín, J. F.; Mudarra, M.; Sánchez, D.; Stumpp, C.; Zagana, E.; Wagener, T., 2021. Risk of groundwater contamination widely underestimated because of fast flow into aquifers. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, v. 118 (20), e2024492118. Recuperado em 25/02/2026, em https://doi.org/10.1073/pnas.2024492118.

Hirata, R.; Bertolo, R. A.; Zoby, J. L. G.; Fernandes, A. J., 2006. Hidrogeologia del Brasil: una breve cronica de las potencialidades, problemática y perspectivas. Boletin Geológico y Minero, 117 (1), 25-36. Recuperado em 25/06/2026, em http://www.igme.es/boletin/2006/117_1_2006/Art.2.PDF.

Hirata, R.; Suhogusoff, A. V.; Marcellini, S. S.; Villar, P. C.; Marcellini, L., 2020. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. São Paulo: Instituto Trata Brasil. Recuperado em 25/02/2026, em https://repositorio.usp.br/directbitstream/e7d9e125-7b22-4706-915b-a397f8a91784/2928658.pdf.

Iritani, M.; Ezaki, S., 2012. As águas subterrâneas do Estado de são Paulo. São Paulo, SMA, 104 p.

ISLAM, Aznarul et al. Groundwater nitrate contamination in agroecosystems: A comprehensive review of detection methods, pollution mechanisms, and policy implications. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 49, n. 3, p. 281-317, 2025.

KHAFAGA, Doaa Sami et al. Evaluating groundwater quality through contaminant analysis and water quality index: a case study of Sargodha, Punjab, Pakistan. **Frontiers in Environmental Science**, v. 13, p. 1636843, 2025.
Mato Grosso, 2022. Secretaria de Estado do Meio Ambiente (Sema). Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH. Cuiabá.

NEMČIĆ-JUREC, J.; KOVAČ, Z.; PERKOVIĆ, D., 2022. Groundwater contamination in public supply wells and associated health risks. Applied Water Science, v. 12, 197. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01697-1

OSENBRÜCK, Karsten et al. Timescales and development of groundwater pollution by nitrate in drinking water wells of the Jahna-Aue, Saxonia, Germany. **Water Resources Research**, v. 42, n. 12, 2006.

RAWAT, Meenakshi et al. Modeling of groundwater nitrate contamination due to agricultural activities—a systematic review. Water, v. 14, n. 24, p. 4008, 2022.

Souza, A. P. et al, 2013**.** Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. Revista Nativa, v. 1, n. 1, p. 34–43. https://doi.org/10.31413/nativa.v1i1.1334

Unesco. The United Nations world water development report 2022: Groundwater: Making the invisible visible. UN, 2022. Relatório Mundial da ONU sobre o Desenvolvimento da Água 2022: Fatos e Números sobre Águas Subterrâneas . França. Recuperado em 9/05/2026, em https://coilink.org/20.500.12592/738jfq.

VERMA, Anurag et al. Nitrate contamination in groundwater and associated health risk assessment for Indo-Gangetic Plain, India. Groundwater for sustainable development, v. 23, p. 100978, 2023.

Von Sperling, M., 2007. Estudos de modelagem da qualidade da água de rios. Belo Horizonte, UFMG, 452 p.

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUSTENTABILIDADE HÍDRICA NO SEMIÁRIDO NORDESTINO: UMA ANÁLISE DA GESTÃO ATUAL

1 Julliano Falcão Ribeiro, 2 Paulo Romero Guimarães Serrano de Andrade, 3 Delma Tatiane S. de Azevedo
1 UFBA - Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), e-mail: julliano@ufba.br;
2 UFRB / UFBA - Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), e-mail:paulo@ufrb.edu.br;
3 UFBA - Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), e-mail: delmaazevedo@ufba.br.

Palavras-chave: Gestão dos recursos hídricos; Água subterrânea; Semiárido.

Resumo

Em regiões semiáridas a escassez hídrica afeta o bem-estar das populações, especificamente as rurais. No Nordeste brasileiro, cerca de 70% da sua área territorial prevalece o clima semiárido, com baixos índices de precipitação e irregularidade do regime de vazões dos rios, aliados ao quadro hidrogeológico, o que contribui para problemas de disponibilidade hídrica. Nessa região, a água subterrânea assume papel estratégico no abastecimento humano e no suporte às atividades produtivas, porém sua utilização ocorre em um contexto marcado por vulnerabilidades institucionais. A gestão das águas subterrâneas, assim, constitui um dos principais desafios para a sustentabilidade hídrica da região. O artigo objetiva analisar a gestão atual das águas subterrâneas no Semiárido nordestino, à luz dos princípios da sustentabilidade hídrica e da gestão integrada de recursos hídricos. A pesquisa baseia-se em revisão crítica da bibliográfica científica e de documentos institucionais, com ênfase nos instrumentos de governança, nos condicionantes físicos dos aquíferos e nos desafios associados à integração entre águas superficiais e subterrâneas. Os resultados indicam que, apesar dos avanços normativos, persistem fragilidades relacionadas à aplicação da outorga, ao monitoramento sistemático e à articulação institucional, comprometendo a incorporação dos limites físicos dos aquíferos nos processos decisórios. Conclui-se que o fortalecimento da governança e a adoção de abordagens integradas são elementos centrais para a promoção da sustentabilidade hídrica e para a redução da vulnerabilidade regional frente às mudanças climáticas, com vistas no cumprimento das metas previstas nos ODS 6 da Agenda 2030 da ONU.

Introdução

A crescente dependência dos aquíferos em regiões semiáridas tem sido observada em diversas partes do mundo e está associada, frequentemente, a processos de superexploração e degradação da qualidade da água, sobretudo quando a gestão ocorre de forma fragmentada e dissociada de critérios hidrogeológicos e institucionais consistentes (LIU et al., 2008; CAO et al., 2013). Diferentemente das águas superficiais, os sistemas aquíferos apresentam respostas lentas às pressões antrópicas, o que dificulta a percepção imediata dos impactos e amplia os riscos de uso insustentável em médio e longo prazos (JAKEMAN et al., 2016). No Semiárido nordestino a disponibilidade hídrica é condicionada por fatores climáticos e hidro ambientais que impõem limitações estruturais à oferta de águas superficiais, tal como elevada variabilidade interanual das chuvas, onde dos totais pluviométricos sobre a região, parte é evapotranspirada ou infiltra nas camadas subsuperficiais do solo, sendo o excedente escoado através de cursos d'água de vazão natural intermitente, ao longo do ano.

Com efeito, a natureza do nosso semiárido é fortemente marcada pela escassez hídrica em que, do ponto de vista climático, baseado na classificação de Thornthwait, o Índice de Aridez (IA) assume valores na faixa de $0,20 < IA < 0,50$. Para atualização do mapa geográfico e social do semiárido brasileiro, a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE, 2021), publicou a Resolução SUDENE No.150, de 13/12/2021 pela qual a nova lista dos municípios incluiu mais 215 e excluiu outros 50, passando o total para 1.477 municípios integrantes dessa região, que considera onze Estados da Federação (MA, PI, CE, RN, PB, PE, AL, SE, BA e MG, ES), perfazendo uma área de 1.335.298 Km^2. Na nova delimitação do Semiárido, como ilustrado pela Figura 1, a SUDENE adotou os seguintes critérios técnicos e científicos: (I) Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; (II) Índice de Aridez igual ou inferior a 0,50, (III) Percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (são considerados como de Semiárido os municípios que alcancem pelo menos um dos critérios elencados).

No contexto das águas subterrâneas da região semiárida, onde grande parte deste território é embasado por rochas cristalinas, pouco permeáveis, há predominância de águas com teor elevado de sais captadas em poços de baixa vazão, da ordem de 1,0 m^3/h. A exceção ocorre nas formações sedimentares, em que as águas normalmente são de melhor qualidade e se podem extrair maiores vazões, da ordem de dezenas a centenas de m^3/h, de forma contínua (CIRILO, 2008). A centralidade das águas subterrâneas não pode ser compreendida apenas sob a ótica da disponibilidade hídrica, mas deve ser analisada como elemento estruturante da segurança hídrica e da resiliência socioambiental regional. Em regiões caracterizadas por elevada variabilidade climática, como é o caso do semiárido brasileiro, a capacidade de armazenamento natural dos aquíferos confere maior estabilidade temporal ao fornecimento de água, reduzindo a vulnerabilidade associada à irregularidade das precipitações (FOSTER; GARDUÑO, 2004). Essa característica torna os recursos subterrâneos fundamentais para a manutenção de sistemas produtivos e para o abastecimento humano, especialmente em períodos de estiagem prolongada.

Entretanto, a intensificação do uso desses recursos tem sido acompanhada por uma crescente pressão sobre os sistemas aquíferos, evidenciando a necessidade de mecanismos de gestão capazes de compatibilizar a demanda hídrica com os limites físicos do meio. Estudos realizados em diferentes contextos internacionais demonstram que a exploração intensiva de águas

subterrâneas, quando não acompanhada por instrumentos adequados de controle e monitoramento, pode resultar em processos de depleção, degradação da qualidade da água e comprometimento de ecossistemas associados (LIU et al., 2008; CAO et al., 2013). Esses impactos tendem a ser cumulativos e, em muitos casos, de difícil reversão, o que reforça a importância de abordagens preventivas na gestão dos aquíferos.



Figura 01: Nova delimitação da região semiárida do Nordeste brasileiro.
Fonte: SUDENE (2021).

A complexidade associada à gestão das águas subterrâneas decorre, em grande medida, de sua natureza invisível e da dificuldade de observação direta de seus processos dinâmicos. Diferentemente das águas superficiais, cuja disponibilidade e variações são mais facilmente perceptíveis, os sistemas aquíferos operam em escalas espaciais e temporais que dificultam a identificação imediata de alterações decorrentes da ação antrópica (JAKEMAN et al., 2016). Essa característica contribui para a subvalorização dos impactos associados ao uso intensivo e dificulta a incorporação dos limites hidrogeológicos nos processos de tomada de decisão. Nesse sentido, a literatura tem enfatizado a necessidade de adoção de modelos de gestão integrada das águas subterrâneas, nos quais os aspectos físicos, institucionais e socioeconômicos sejam considerados de forma articulada. A gestão integrada pressupõe não apenas a coordenação entre águas superficiais e subterrâneas, mas também a integração com políticas setoriais, como agricultura, energia e planejamento territorial, de modo a promover o uso sustentável dos recursos hídricos em múltiplas escalas (BARTHEL et al., 2008; DEMETRIOU; PUNTHAKEY, 1999). Essa abordagem amplia o escopo da gestão hídrica, incorporando dimensões que transcendem o domínio estritamente técnico.

A sustentabilidade das águas subterrâneas, por sua vez, não se limita ao equilíbrio entre recarga e explotação, mas envolve a manutenção da qualidade da água, a preservação de ecossistemas dependentes e a garantia de acesso equitativo ao recurso ao longo do tempo (KONIKOW; KENDY, 2005; HAN et al., 2012). Essa perspectiva amplia a compreensão tradicional da gestão hídrica, incorporando princípios associados à sustentabilidade ambiental e à justiça hídrica, que são particularmente relevantes em contextos de escassez. No caso brasileiro, embora a Política Nacional de Recursos Hídricos tenha estabelecido princípios fundamentais para a gestão descentralizada e participativa, a incorporação efetiva das águas subterrâneas aos instrumentos de planejamento ainda apresenta limitações. A literatura aponta que a gestão desses recursos permanece, em muitos casos, subordinada a estruturas institucionais voltadas prioritariamente às águas superficiais, o que dificulta a consideração adequada das especificidades hidrogeológicas nos processos de regulação e controle (VILLAR; HIRATA, 2022). Essa lacuna institucional contribui para a adoção de práticas de uso que nem sempre estão alinhadas com os princípios da sustentabilidade hídrica.

No Semiárido, essas limitações são intensificadas pela predominância de usos difusos e descentralizados das águas subterrâneas, frequentemente associados a captações de pequeno porte e de difícil controle pelos órgãos gestores. Essa configuração impõe desafios significativos à implementação de instrumentos como a outorga e o monitoramento sistemático, uma vez que exige capacidades institucionais ampliadas e sistemas de informação mais robustos (DE FRANÇA et al., 2018). Além disso, a heterogeneidade dos sistemas aquíferos na região demanda abordagens diferenciadas, capazes de considerar as especificidades locais e os distintos níveis de vulnerabilidade. Outro aspecto relevante refere-se à governança das águas subterrâneas, entendida como o conjunto de mecanismos institucionais, normativos e sociais que orientam o uso e a gestão do

recurso. A literatura internacional tem demonstrado que a efetividade da gestão hídrica depende não apenas da existência de instrumentos legais, mas da capacidade de implementação desses instrumentos e da articulação entre os diferentes atores envolvidos (SALETH; DINAR, 2000; WIJNEN et al., 2012). Em contextos de uso difuso, como no Semiárido, essa articulação torna-se ainda mais desafiadora, exigindo estratégias que promovam a cooperação entre usuários e instituições.

Adicionalmente, a integração entre águas superficiais e subterrâneas, embora reconhecida como princípio fundamental da gestão hídrica, ainda enfrenta limitações operacionais no Brasil. A ausência de sistemas integrados de informação e a fragmentação institucional dificultam a avaliação dos impactos cumulativos das decisões de uso, comprometendo a eficiência do planejamento hídrico (QIN et al., 2013). Em regiões semiáridas, essa limitação pode resultar em pressões adicionais sobre os aquíferos, especialmente em períodos de escassez. Por fim, a discussão sobre a gestão das águas subterrâneas no Semiárido Nordestino deve considerar o contexto das mudanças climáticas, que tendem a intensificar a variabilidade hidrológica e a aumentar a frequência de eventos extremos. Nesse cenário, a dependência dos aquíferos tende a se ampliar, reforçando a necessidade de modelos de gestão que sejam capazes de lidar com incertezas e promover a adaptação dos sistemas hídricos (JAKEMAN et al., 2016). A incorporação dessa dimensão nos processos de planejamento constitui um desafio adicional para a sustentabilidade hídrica regional.

Dessa forma, a análise da gestão das águas subterrâneas exige uma abordagem que integre dimensões físicas, institucionais e socioambientais, reconhecendo a complexidade dos sistemas aquíferos e os desafios associados à sua governança. A compreensão dessas interações é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que promovam o uso sustentável dos recursos hídricos e contribuam para a redução da vulnerabilidade hídrica da região.

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo analisar criticamente a gestão das águas subterrâneas no Semiárido, à luz dos princípios da sustentabilidade hídrica e da gestão integrada de recursos hídricos, buscando identificar seus principais limites estruturais e desafios institucionais.

Material e Métodos

A análise foi embasada em revisão bibliográfica crítica de literatura científica e documentos institucionais, com foco nos instrumentos de governança, nos condicionantes hidrogeológicos e na articulação entre águas superficiais e subterrâneas. Conforme mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil (CPRM, 2007 apud Feitosa & Feitosa, 2011), registra-se que a ocorrência da água subterrânea no Nordeste é dividida em dois grandes domínios: rochas cristalinas e rochas sedimentares. A área de ocorrência das rochas cristalinas no Nordeste se situa próximo a 750.000 km2; e se for considerado apenas o Polígono das Secas esta área seria de aproximadamente 600.000 km2. Na Figura 2 é apresentado, para efeito de ilustração, um esquema simplificado da área de ocorrência dos terrenos cristalinos e a localização das ocorrências sedimentares existentes no Nordeste.

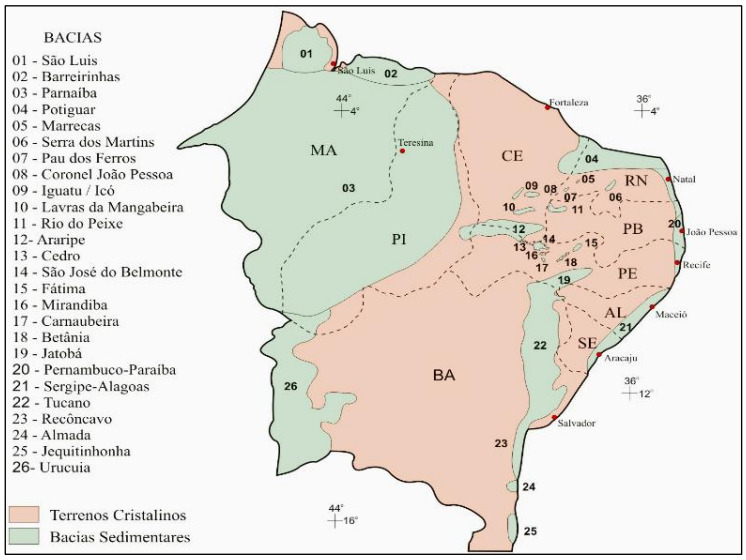


Figura 02: Terrenos cristalinos e bacias sedimentares do nordeste brasileiro.
Fonte: FEITOSA & FEITOSA (2011).

Gestão Integrada e Sustentabilidade das Águas Subterrâneas

A literatura especializada tem destacado que a sustentabilidade das águas subterrâneas depende da adoção de abordagens integradas de gestão, capazes de articular o conhecimento técnico-científico, os instrumentos normativos e os arranjos institucionais responsáveis pelo controle do uso e pela proteção dos aquíferos (BARTHEL et al., 2008; DEMETRIOU; PUNTHAKEY, 1999). Nesse sentido, a gestão integrada das águas subterrâneas pressupõe a consideração das interações entre estas e as águas superficiais, bem como a incorporação de múltiplas escalas espaciais e temporais nos processos decisórios (JAKEMAN et al., 2016).

A gestão das águas subterrâneas apresenta desafios específicos decorrentes da natureza física dos aquíferos, caracterizados por elevada heterogeneidade espacial, respostas lentas às intervenções antrópicas e dificuldades inerentes ao monitoramento e à delimitação de impactos. Essas particularidades tornam insuficientes abordagens setoriais ou exclusivamente hidráulicas, demandando modelos de gestão que incorporem múltiplas dimensões - técnicas, institucionais, sociais e ambientais - de forma articulada (FETTER, 1994; FOSTER; GARDUÑO, 2004). Nesse contexto, a literatura internacional consolidou o conceito de Gestão Integrada das Águas Subterrâneas como um processo estruturado voltado à coordenação entre o uso dos aquíferos, a gestão das águas superficiais e as demais políticas setoriais relacionadas ao território, à energia, à agricultura e ao meio ambiente, como ilustrado na Figura 3. Essa abordagem, reconhece que a sustentabilidade dos sistemas aquíferos não pode ser avaliada apenas a partir do balanço hídrico local, mas deve considerar interações hidrológicas, escalas temporais extensas e objetivos socioambientais mais amplos (BARTHEL et al., 2008; JAKEMAN et al., 2016).



Figura 03: Gestão integrada de águas subterrâneas.
Fonte: Adaptado de Foster e Garduño (2004), Barthel el al. (2008) e Jakeman et al. (2016).

A noção de sustentabilidade hídrica aplicada às águas subterrâneas ultrapassa a ideia clássica de equilíbrio entre recarga e explotação, incorporando aspectos relacionados à preservação da qualidade da água, à manutenção de ecossistemas dependentes de aquíferos e à equidade no acesso ao recurso entre diferentes usuários e gerações. Estudos demonstram que a superexploração prolongada pode resultar em impactos irreversíveis, como subsidência do solo, salinização e perda de capacidade de armazenamento dos aquíferos, comprometendo sua função estratégica como reserva hídrica (KONIKOW; KENDY, 2005; HAN et al., 2012). Diversas experiências internacionais evidenciam que a sustentabilidade das águas subterrâneas está diretamente associada à existência de arranjos institucionais robustos, capazes de articular instrumentos regulatórios e econômicos, combinando regulação, cooperação institucional e participação dos usuários, o que é fundamental para a sustentabilidade do uso (SALETH; DINAR, 2000; WANG et al., 2010). A adoção isolada de instrumentos como a outorga ou a cobrança pelo uso da água, sem integração com sistemas de monitoramento e sem articulação com os usuários, tem se mostrado insuficiente para conter processos de degradação em regiões de forte pressão sobre os aquíferos (SALETH; DINAR, 2000; WANG et al., 2010).

Resultados e Discussão

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos subterrâneos está regulamentada através de vários normativos legais, podendo ser referidos:

a) Constituição Federal de 1988 – onde o artigo 26 define que os recursos hídricos podem ser de domínio da União, dos Estados e do Distrito Federal, no entanto, as águas subterrâneas são bens dos Estados e do Distrito Federal;
b) Lei No. 9.433/1997, de 08/01/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o SINGREH, estabelecendo, entre outras, várias diretrizes para uma gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade, enfatizando que estão sujeitas a outorga a extração de água de aqüíferos subterrâneos, seja para consumo final ou insumo de processo produtivo;
c) Resolução CNRH 15, de 11/01/2001, que refere instrumentos da outorga e cobrança, incorporando diretrizes sobre a necessidade de considerar as relações entre as águas subterrâneas, superficiais e meteóricas, para a gestão integrada dos recursos hídricos;
d) Resolução do Conselho Nacional de Recurso Hídricos - CNRH 22/02, de 24/05/2002, que dispõe sobre os Planos de Recursos Hídricos de bacias hidrográficas, considerando a inserção e usos múltiplos das águas subterrâneas, caracterização dos aquíferos e sua inter-relações com os demais corpos hídricos e o meio ambiente, visando a gestão sistêmica, integrada e

participativa das águas, em prol do desenvolvimento social e ambientalmente sustentável;

e) Resolução CNRH Nº 91 de 05/11/2008, que dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos;
f) Resolução CONAMA 396, de 03/04/2008, do Conselho Nacional de Meio Ambiente, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências;
g) Resolução CNRH No 92, de 05/11 2008, que estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro, visando identificar, prevenir e reverter processos de superexplotação, poluição e contaminação;
h) Resolução CNRH No 107, de 13/04/2010, que estabelece diretrizes e critérios a serem adotados para o planejamento, a implantação e a operação de Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas;

Sobre a Lei No. 9.433/97, vale pontuar que mesmo estabelecendo diretrizes para uma gestão descentralizada e participativa, a incorporação efetiva das águas subterrâneas aos sistemas de planejamento e governança ainda apresenta fragilidades significativas. Estudos indicam que persistem lacunas relacionadas ao monitoramento, à fiscalização e à aplicação de instrumentos como a outorga do direito de uso, especialmente em contextos de explotação difusa e dependência estrutural dos aquíferos (VILLAR; HIRATA, 2022). Como consideram Aguiar & Selva (2017), pode-se referir que "*a governança tem sido apropriada pela política de águas como uma prática que traduz maior flexibilidade e capacidade do Estado em descentralizar papeis, transferir responsabilidades e ampliar o universo de atores participantes nas decisões, sem abdicar dos instrumentos de controle e supervisão*".

No entanto, como já apontou a OCDE, muitos dos atuais desafios para uma boa governança da água no Brasil permanecem enraizados numa reforma não completada e em questões controversas como: (i) a bacia hidrográfica como Unidade de Planejamento; (ii) a utilização da cobrança pelo uso dos recursos hídricos, e (iii) a gestão para usos múltiplos da água, e (iv) a participação dos usuários e da sociedade civil (OCDE, 2015). Tais questões trazem sérias implicações políticas para os tomadores de decisão e para a sociedade brasileira, como um todo.

Essas limitações tendem a ser acentuadas, uma vez que a pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos ocorre em um cenário de elevada vulnerabilidade climática e restrições institucionais dos órgãos gestores estaduais. Agrava-se a questão pois não há dados significativos de monitoramento dos aquíferos; os dados existentes são poucos e restritos a projetos de pesquisa desenvolvidos por Universidades e outras instituições federais, dentre as quais se destaca o Serviço Geológico do Brasil. Análises regionais apontam que os processos de outorga nem sempre incorporam de forma adequada a capacidade de renovação dos aquíferos e os condicionantes hidrogeológicos locais, o que compromete a sustentabilidade hídrica regional (DE FRANÇA et al., 2018; ROEDEL et al., 2021).

Águas Subterrâneas no Semiárido nordestino: papel estratégico e vulnerabilidades

A governança das águas subterrâneas assume papel central na operacionalização da gestão integrada. A literatura aponta que modelos eficazes de governança combinam marcos legais claros, capacidade técnica dos órgãos gestores, transparência na tomada de decisão e mecanismos de participação social, especialmente em contextos em que o uso do recurso é difuso e descentralizado (WIJNEN et al., 2012). Outro aspecto fundamental da gestão integrada refere-se à articulação entre águas superficiais e subterrâneas, frequentemente tratadas de forma dissociada nos sistemas de planejamento hídrico. Pesquisas indicam que a desconexão institucional entre esses componentes pode levar a decisões que, embora adequadas do ponto de vista setorial, resultam em efeitos adversos cumulativos sobre o sistema hídrico como um todo, especialmente em regiões semiáridas, onde a dependência dos aquíferos é elevada (DEMETRIOU; PUNTHAKEY, 1999; QIN et al., 2013).

No Brasil, apesar do reconhecimento formal da integração entre águas superficiais e subterrâneas na legislação, a implementação prática desse princípio ainda enfrenta limitações operacionais e institucionais. A literatura nacional destaca que a gestão das águas subterrâneas permanece, em muitos casos, subordinada a estruturas administrativas concebidas prioritariamente para a gestão de cursos d'água superficiais, o que dificulta a incorporação efetiva das especificidades hidrogeológicas nos instrumentos de planejamento e regulação (VILLAR; HIRATA, 2022).

No Semiárido Nordestino, as águas subterrâneas constituem um dos principais suportes à segurança hídrica regional, especialmente em áreas onde a disponibilidade de águas superficiais é intermitente ou insuficiente para atender às demandas humanas e produtivas. A dependência dos aquíferos está associada tanto às condições climáticas adversas quanto à distribuição espacial irregular dos mananciais superficiais, o que reforça o papel estratégico das reservas subterrâneas como fonte relativamente estável de abastecimento ao longo do tempo (FOSTER; GARDUÑO, 2004).

A intensificação do uso das águas subterrâneas na região tem ocorrido, em grande medida, de forma difusa e descentralizada, envolvendo múltiplos usuários e captações de pequeno e médio porte. Entre as principais vulnerabilidades associadas ao uso intensivo das águas subterrâneas no Semiárido Nordestino destacam-se a superexploração localizada, a salinização e a deterioração da qualidade da água. Segundo dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas-SIAGAS, o número total de poços cadastrados no Nordeste era de 202.639, numa posição referente a dezembro de 2023 (SGB, 2024). Considerando a hipótese da existência de um poço em funcionamento a cada 5 km^2, Feitosa & Feitosa (2011) estimaram que haveria algo em torno de 120.000 poços captando o aquífero cristalino no Polígono das Secas. Essa realidade dificulta o controle efetivo da explotação e amplia a complexidade da gestão, sobretudo em contextos em que os sistemas de monitoramento são incipientes ou inexistentes (JAKEMAN et al., 2016).

A exploração prolongada acima da capacidade de renovação dos aquíferos pode provocar rebaixamentos significativos dos níveis d'água, aumentando os custos de bombeamento e reduzindo a confiabilidade dos sistemas de abastecimento, além de potencializar processos de intrusão salina em áreas suscetíveis (HAN et al., 2012; KONIKOW; KENDY, 2005). A salinização constitui um problema recorrente em diversos aquíferos da região, seja em função de características geológicas naturais, seja como resultado de práticas inadequadas de manejo e de uso do solo, comprometendo o abastecimento humano e usos produtivos (TANG et al., 2006; LIU et al., 2001).

Limitações da gestão atual e desafios à sustentabilidade hídrica

A gestão das águas subterrâneas no Semiárido Nordestino apresenta limitações estruturais que comprometem a efetivação dos princípios da sustentabilidade hídrica e da gestão integrada. A concessão de direitos de uso nem sempre incorpora critérios hidrogeológicos compatíveis com a capacidade de renovação dos aquíferos, respondendo frequentemente a demandas emergenciais, o que pode intensificar processos de superexploração (DE FRANÇA et al., 2018; ROEDEL et al., 2021). A limitada integração entre águas superficiais e subterrâneas, apesar do reconhecimento normativo, compromete a avaliação de impactos cumulativos e a eficiência do planejamento hídrico regional (DEMETRIOU; PUNTHAKEY, 1999; JAKEMAN et al., 2016).

Quanto à evolução do gerenciamento integrado de recursos hídricos no Nordeste, houve muitos avanços principalmente nos últimos 25 anos, entretanto, esses avanços ainda não são suficientes para superar os desafios que se colocam para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. Com efeito, a implementação de um arcabouço legal necessário para a gestão das águas, conforme preconiza a Política Nacional de Recursos Hídricos, é satisfatório, onde uma estrutura organizacional foi implementada em nível estadual – conselhos, secretarias de estado e órgãos gestores de recursos hídricos, porém ainda precisa ser fortalecida para garantir a continuidade das ações, programas e projetos (ANA, CGEE, 2012)

Do ponto de vista institucional, a gestão das águas subterrâneas no Semiárido Nordestino enfrenta desafios adicionais relacionados à fragmentação das competências administrativas e à limitada capacidade operacional dos órgãos gestores, com predominância de captações não regularizadas e dificuldades de fiscalização (VILLAR; HIRATA, 2022). Alguns dos principais desafios estão apresentados na Tabela 01.

Dimensão	Desafios identificados	Referências
Técnica	Baixa densidade de monitoramento e incertezas hidrogeológicas; carência de definição dos parâmetros hidrogeológicos dos aquíferos (em especial os fissurais e os aquíferos aluviais); carência de informações confiáveis pertinentes aos problemas ambientais locais, bem como da construção de indicadores que sirvam de base para os gestores hídricos adotarem medidas normativas e gerenciais.	Fetter (1994); Jakeman et al. (2016); Aguiar & Selva (2017); Cabral & Santos (2006).
Institucional	Fragilidade na aplicação da outorga e fiscalização, dificultando a gestão (falta de inserção nos planos de recursos hídricos, enquadramento em classes e a proteção à contaminação).	Villar e Hirata (2022); De França et al. (2018)
Integração	Baixa articulação entre águas superficiais e subterrâneas.	Demetriou e Punthakey (1999)
Governança	Uso difuso, baixa participação social e coordenação institucional limitada.	Wijnen et al. (2012); Saleth e Dinar (2000)

Tabela 01: Principais desafios da gestão das águas subterrâneas no Semiárido Nordestino.
Fonte: Elaboração própria.

Como referenciam Wijnen et al. (2012), pode-se complementar às indicações da Tabela 01 dizendo que a escassez de dados sistemáticos reduz a capacidade de antecipação de riscos e fragiliza a governança dos aquíferos. Por outro lado, para o adequado planejamento, uso e gerenciamento das águas subterrâneas no semiárido do Nordeste se faz necessário a definição e quantificação de indicadores de vulnerabilidades e condições de sustentabilidade dos aquíferos, que podem se constituir em importantes instrumentos para os gestores com relação ao principal dilema que envolve as reservas hídricas subterrâneas: a demanda pelo uso e a necessidade de proteção. Uma interessante proposta de indicadores relacionados com a explotação de água subterrânea é tratada no trabalho de Cabral & Santos (2006), que se relacionam, por exemplo: ao escoamento de base, à relação explotação/recarga, à economicidade da explotação, à poluição, à subsidência e à contribuição das águas subterrâneas para o ecossistema.

Quanto à governança, no geral, observada a Agenda 2030 da ONU para o Desenvolvimento Sustentável, no particular do ODS 6 que visa "*Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos"*, vale apontar que na visão da ANA (2022), a Meta 6.5: Até 2030, "*implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis de governo, inclusive via cooperação transfronteiriça*", é monitorada pelo Indicador 6.5.1 (*Grau de Implementação da Gestão Integrada de Recursos Hídricos GIRH*). Para este Indicador percebe-se uma evolução positiva da Gestão Integrada de Recursos Hídricos no Brasil, com aumento do score de 44,2 em 2010 para 63,1 em 2019, como ilustrado na Figura 4. Apesar da melhora,

o Indicador GIRH é considerado Médio-alto, precisando melhorar, sendo uma lacuna significativa a falta de monitoramento e processos de avaliação. Isso representaria uma ameaça ao cumprimento da Meta 6.5 até 2030, no geral.

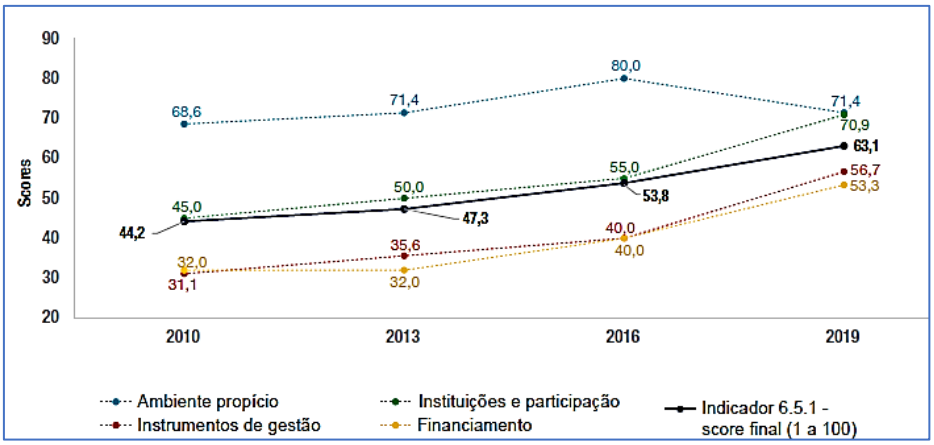


Figura 04: Evolução da Gestão Integrada de Recursos Hídricos no Brasil – 2010-2019. Fonte: ANA (2022)

Comentários finais

Em regiões de escassez hídrica, a gestão dos recursos hídricos deve ser realizada com eficiência visando a mitigação dos potenciais conflitos por seus usos. Nesse sentido, a opção da utilização dos recursos hídricos subterrâneos deve ser considerada. Dentre os fatores levantados que dificultam a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no semiárido do Nordeste estão o estabelecimento dos instrumentos previstos na Lei das Águas do Brasil: planos de recursos hídricos; outorga de direito do uso; enquadramento em classes e a proteção à contaminação.

Para auxiliar o adequado planejamento, gerenciamento integrado e uso e das águas subterrâneas, necessário se faz a definição e quantificação de indicadores de vulnerabilidades e condições de sustentabilidade de um aquífero. Estas definições constituem um importante instrumento para os gestores com relação ao principal dilema que envolve as reservas hídricas subterrâneas: a demanda pelo uso e a necessidade de proteção, levando em conta os riscos ao ambiente antrópico e aos aquíferos, a resiliência do sistema hídrico e a integridade do ecossistema como um todo.

As águas subterrâneas constituem recurso estratégico para a segurança hídrica do Semiárido Nordestino, porém sua gestão atual ainda apresenta fragilidades significativas. A análise evidenciou limitações na aplicação da outorga, na integração institucional e no monitoramento, comprometendo a incorporação dos limites físicos dos aquíferos nos processos decisórios.

O fortalecimento da governança das águas subterrâneas demanda avanços técnicos, institucionais e participativos, visando compatibilizar a dependência regional dos aquíferos com os princípios da sustentabilidade hídrica e da gestão integrada. A consolidação de estratégias de longo prazo para a gestão dos aquíferos é condição essencial para a resiliência socioambiental da região frente à variabilidade climática e às mudanças futuras.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Referências Bibliográficas

AGUIAR; W. J. de; SELVA, V. S. F. Governança da água no semiárido brasileiro: um enfoque sobre a integração dos planos de recursos hídricos. In.: Anais do I Workshop Internacional sobre Água no Semiárido Brasileiro (WIASB), 2017. https://editorarealize.com.br/edicao/detalhes/anais-iii-wiasb.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores / 2. ed. – Brasília: 2022.

ANA - Agência Nacional de Águas. A Questão da Água no Nordeste / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos –Brasília, DF: CGEE, 2012.

BARTHEL, R.; JAGELKE, J.; GÖTZINGER, J. et al. Aspectos da escolha de conceitos apropriados para modelagem de recursos hídricos subterrâneos na gestão integrada de recursos hídricos regionais. Physics and Chemistry of the Earth, v. 33, p. 92–114, 2008.

CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M. Considerações sobre indicadores de sustentabilidade na explotação de água subterrânea. In.: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2006. Disponível em: https://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/issue/view/1185.

CAO, G.; ZHENG, C.; SCANLON, B. R. et al. Use of flow modeling to assess groundwater sustainability in the North China Plain. Water Resources Research, v. 49, p. 159–175, 2013.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. DOSSIÊ ÁGUA - Estudos Avançados. Estud. av. vol.22 no.63 São Paulo 2008. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200005

DE FRANÇA, J. M. B. et al. Panorama das outorgas de uso dos recursos hídricos no Estado do Ceará no período de estiagem 2009–2017. Águas Subterrâneas, v. 32, n. 1, p. 1–14, 2018.

DEMETRIOU, C.; PUNTHAKEY, J. F. Evaluation of sustainable groundwater management options using MIKE SHE. Environmental Modelling & Software, v. 14, p. 129–140, 1999.

FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C. Realidade e perspectivas do uso racional de águas subterrâneas na região semiárida do Brasil..: In.: Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas - Pgs.270-304. Instituto Nacional do Semiárido -INSA. Campina Grande/ PB. 2011

FETTER, C. W. Applied hydrogeology. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

FOSTER, S.; GARDUÑO, H. Groundwater-resource governance. Hydrogeology Journal, v. 12, p. 1–17, 2004.

HAN, D.; CHEN, Z. et al. Sustainability of groundwater use in northern China. Hydrological Processes, v. 26, p. 4050–4066, 2012.

JAKEMAN, A. J. et al. Integrated groundwater management. Cham: Springer, 2016.

KONIKOW, L. F.; KENDY, E. Groundwater depletion: a global problem. Hydrogeology Journal, v. 13, p. 317–320, 2005. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in ... - Nature, https://www.nature.com/articles/s41586-023-06879-8.pdf.

LIU, C.; YU, J.; KENDY, E. Groundwater exploitation and its impact. Water International, v. 36, n. 2, p. 265–272, 2001.

ROEDEL, R. M. et al. Critérios hidrogeológicos para outorga de água subterrânea na Bahia. Águas Subterrâneas, v. 35, n. 3, p. 1–15, 2021.

SALETH, R. M.; DINAR, A. Institutional changes in global water sector. Water Policy, v. 2, p. 175–199, 2000.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Relatório Anual 2023. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24628

TANG, K.; WU, Y.; HOU, J. Assessment of groundwater quality in China. Water Resources Protection, v. 22, n. 3, p. 1–4, 2006.

VILLAR, P. C.; HIRATA, R. Governance of groundwater in Brazil. Ambiente & Sociedade, v. 25, p. 1–22, 2022.

WANG, J.; HUANG, J.; ZHANG, L. et al. Water governance and efficiency. Journal of the American Water Resources Association, v. 46, n. 4, p. 665–685, 2010.

WIJNEN, M. et al. Managing the invisible: groundwater governance. Washington, DC: World Bank, 2012.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM POÇOS URBANOS

1 Ana Carolina Nazário de Santana,2 Débora Eduarda Rodrigues Martins, 3 Mikaelle Jéssica da Silva, 4 Eloá Cristina Figueirinha Pelegrino

1Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: anacarol153naz@gmail.com; 2Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: debora.martins@sou.ufmt.br; 3Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail:mikaelle.silva1@sou.ufmt.br; 4Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: eloa.pelegrino@ufmt.br

Palavras-chave: qualidade da água; poços artesianos; potabilidade.

Resumo

A água subterrânea tem se tornado uma importante alternativa de abastecimento diante da crescente demanda hídrica e da degradação dos recursos superficiais; nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade físico-química e microbiológica das águas subterrâneas provenientes de poços localizados no campus Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), verificando sua viabilidade para consumo humano conforme os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Foram analisados três poços por meio de cinco campanhas de coleta realizadas entre novembro de 2023 e setembro de 2024, contemplando parâmetros físico-químicos como pH, turbidez, dureza, sólidos dissolvidos, condutividade, alcalinidade, cloreto e oxigênio dissolvido, além de indicadores microbiológicos (coliformes totais e *Escherichia coli*). Os resultados evidenciaram variações na qualidade da água entre os poços avaliados, sendo que o Poço 1 apresentou melhor desempenho, atendendo aos padrões de potabilidade, embora com elevada dureza e variações nos sólidos dissolvidos, enquanto os Poços 2 e 3 apresentaram inconformidades em parâmetros físico-químicos, sendo considerados inadequados para consumo direto sem tratamento prévio. Observou-se limitações estruturais nos sistemas de captação, concluindo-se que o uso das águas subterrâneas na UFMT apresenta viabilidade parcial como fonte alternativa de abastecimento, desde que sejam adotadas medidas de tratamento, monitoramento contínuo e adequações estruturais nos poços, visando garantir a qualidade e a segurança sanitária da água.

Introdução

A água é um recurso indispensável para a manutenção da vida e para o desenvolvimento das sociedades. Entretanto, o uso intensivo e a crescente contaminação das fontes superficiais têm comprometido sua disponibilidade, tornando urgente a busca por alternativas de abastecimento, como os poços . De acordo com o estudo do Instituto Trata Brasil (2019), cerca de 17.580 m³/ano são captados em poços, dos quais aproximadamente 18% destinam-se ao abastecimento público urbano. Esse cenário evidencia a relevância da água subterrânea para o suprimento das populações, mas também expõe os riscos associados à sua exploração sem controle adequado.A qualidade da água subterrânea pode ser afetada por diferentes fatores, como a disposição inadequada de resíduos industriais, a ausência de sistemas de esgotamento sanitário e o uso intensivo de fertilizantes na agricultura. Tais elementos contribuem para a poluição dos aquíferos e colocam em risco a saúde pública, reforçando a necessidade de estudos que avaliem a potabilidade e a segurança desse recurso. Nesse contexto, compreender os impactos da contaminação e propor estratégias de monitoramento e gestão tornam-se fundamentais para garantir o uso sustentável da água subterrânea.

Diante deste cenário, para o presente estudo foi utilizada a Portaria 888/2021, a qual dispõe sobre os procedimentos para controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano, bem como o seu padrão de potabilidade. A Portaria foi utilizada durante a análise crítica acerca dos resultados obtidos para os poços, de modo que a qualidade da água subterrânea foi avaliada conforme a legislação.

Atualmente, a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) conta com o sistema de abastecimento de água provido pela Concessionária Águas Cuiabá, filial da empresa Iguá Saneamento, mas possui poços antigos que demanandam estudos a cerca da qualidade de suas águas. O objetivo do seguinte trabalho é a avaliação da qualidade físico-química e microbiológica de águas subterrâneas em poços urbanos, em específico, no estudo de caso os poços dentro da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

Metodologia

1. Descrição da Área de Estudos

O presente estudo foi realizado no campus Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), onde foram analisados três poços já perfurados na área da instituição para análise físico-química e microbiológica. O campus Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) possui um perímetro aproximado de 4.296,97 m e uma área total de 783.100,66 m². Trata-se de um espaço com elevada rotatividade de estudantes e servidores, exercendo papel ativo na sociedade cuiabana e impacto significativo no município. As coordenadas geográficas de cada um dos poços analisados foram registradas no momento da primeira coleta, estando apresentadas na Figura 2, que ilustra a localização das estruturas avaliadas.

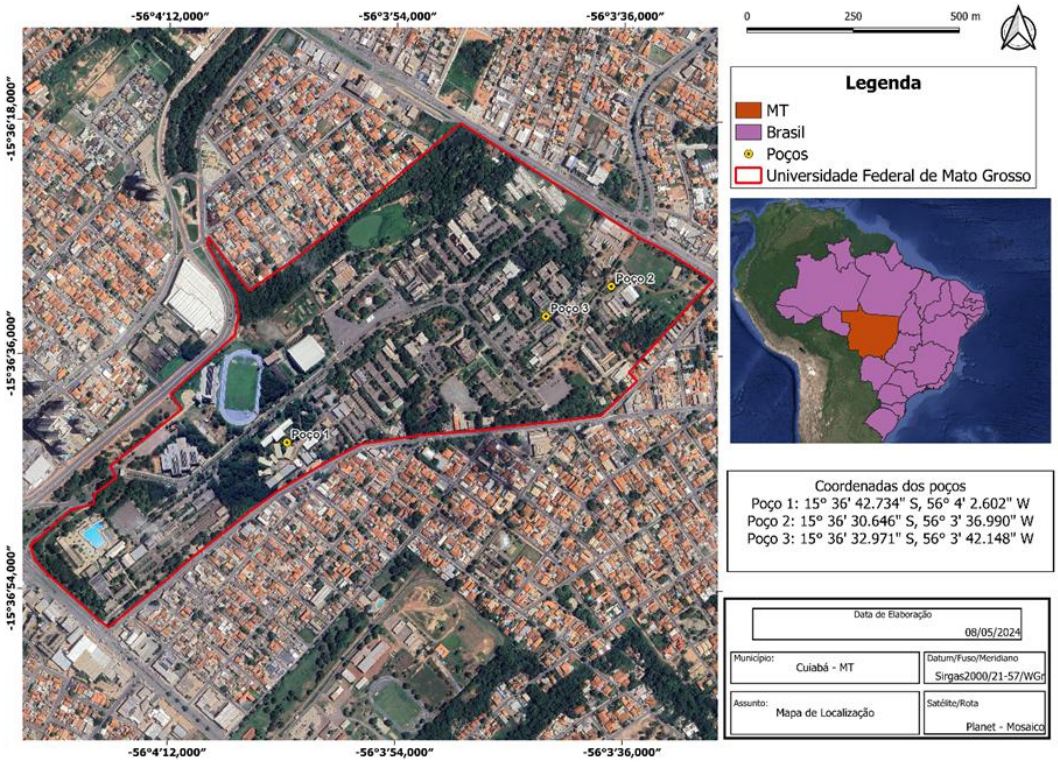


Figura 1. Mapa de localização dos poços.

2. Descrição dos Poços

A universidade possui quatro poços, mas apenas três foram considerados no estudo, pois um poço está instalado no antigo zoológico da UFMT e abastece somente uma torneira do zoológicoe por isso foi desconsiderado neste estudo. Os poços foram identificados como Poço 1, Poço 2 e Poço 3, localizados em diferentes áreas do campus. O Poço 1 está localizado na área do Centro Cultural da UFMT, o Poço 2 fica próximo à UNISELVA e o Poço 3 próximo aos blocos didáticos.



Figura 2. Poço 1 -Próximo ao centro cultural.
Fonte: Autor, 2024.



Figura 3. Poço 2-Em frente à UNISELVA.
Fonte: Autor, 2024.



Figura 4. Poço 3-Próximo aos blocos didáticos.
Fonte: Autor, 2024.

Para a caracterização da qualidade físico-química d'água, foram realizadas 5 coletas no período de novembro de 2023 até setembro de 2024, a fim de determinar a qualidade da água. . Dessa forma, para a avaliação dos resultados, utilizou-se a Portaria GM/MS nº 888/2021. A caracterização das águas subterrâneas foi realizada conforme essa legislação, permitindo verificar se os poços existentes na UFMT são viáveis para o abastecimento destinado ao consumo, sendo realizadas as seguintes análises: Dureza, Cor Aparente, Cloreto, Turbidez, sólidos dissolvidos, OD, Alcalinidade total, Condutividade e pH. As análises microbiológicas foram realizadas no Laboratório de Microbiologia Sanitária e Ambiental (LAMSA) da Universidade Federal de Mato Grosso. As amostras de água foram coletadas diretamente dos pontos de saída dos poços, após descarte inicial da água estagnada na tubulação, e armazenadas em frascos de vidro sob refrigeração a 4 °C até o momento da análise.

Foram avaliados os parâmetros de coliformes totais e Escherichia coli, indicadores da qualidade microbiológica da água, utilizando teste Colilert. As análises foram realizadas nas três primeiras campanhas de coleta. O procedimento seguiu metodologias padronizadas, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos quanto à presença ou ausência de contaminação microbiológica.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos demonstram variações relevantes na qualidade da água entre os poços avaliados na Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), possibilitando a análise da viabilidade de seu uso como fonte alternativa de abastecimento.Os resultados de cada um dos poços analisados nas 5 campanhas de coletas, estão apresentados nas figuras de 03 a 07.

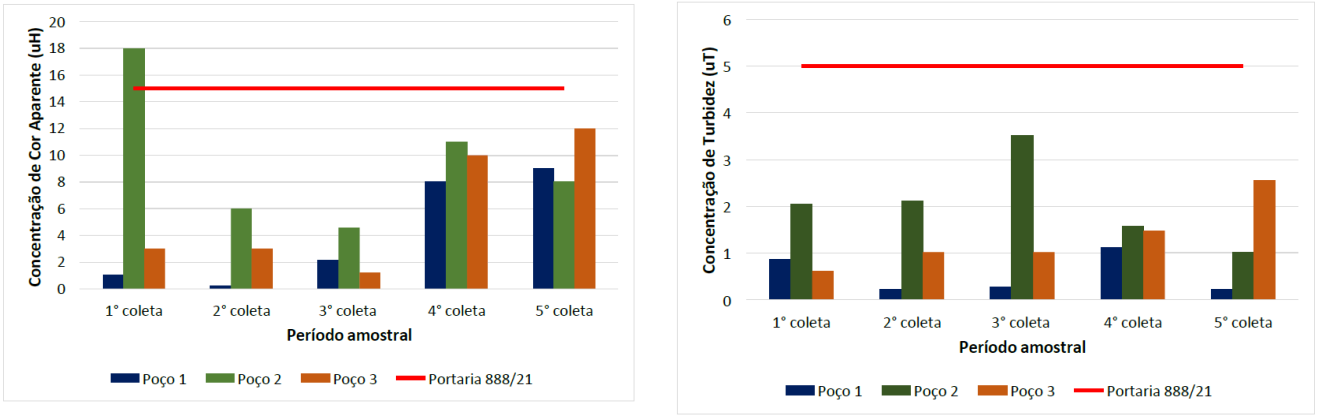


Figura 5: Relação da determinação de Cor aparente e Turbidez dos poços.
Fonte: Autor, 2024.

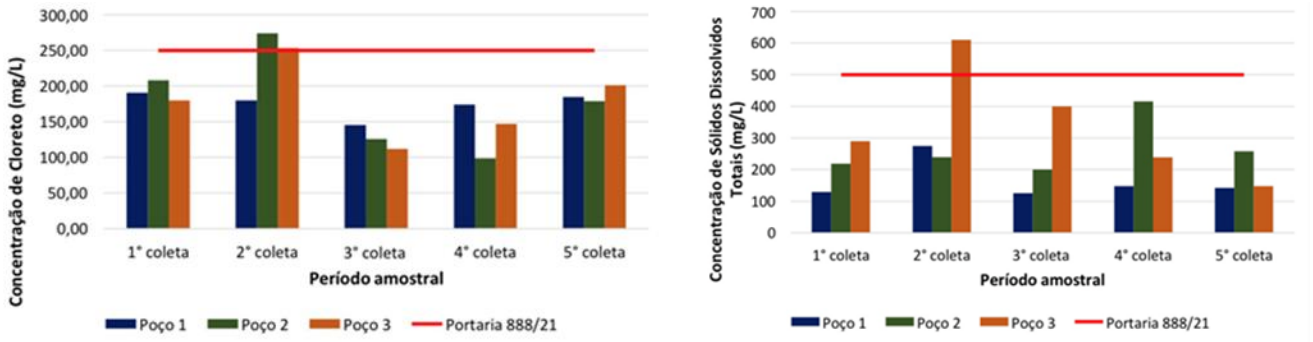


Figura 6: Relação da determinação de Cloreto e Sólidos Dissolvidos dos poços.
Fonte: Autor, 2024.

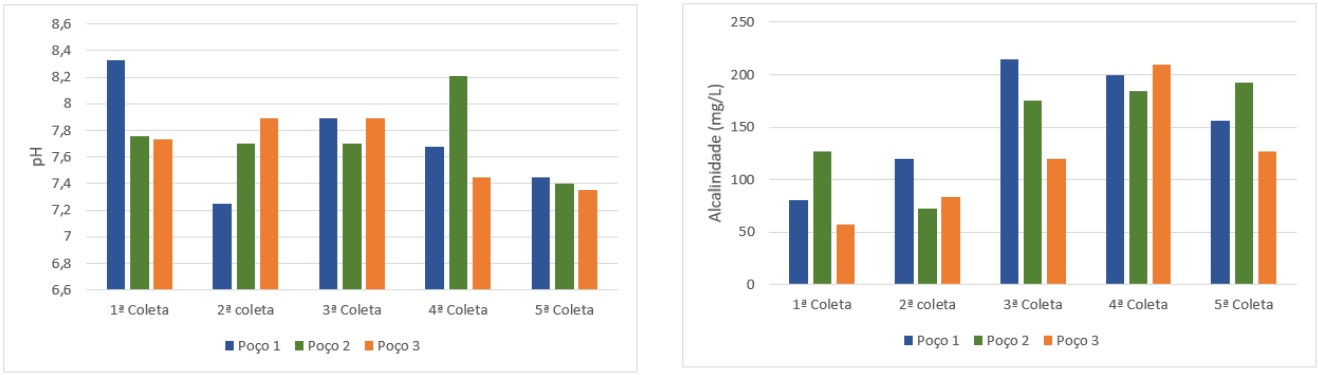


Figura 7: Relação da determinação do pH e Alcalinidade total dos poços.
Fonte: Autor, 2024.

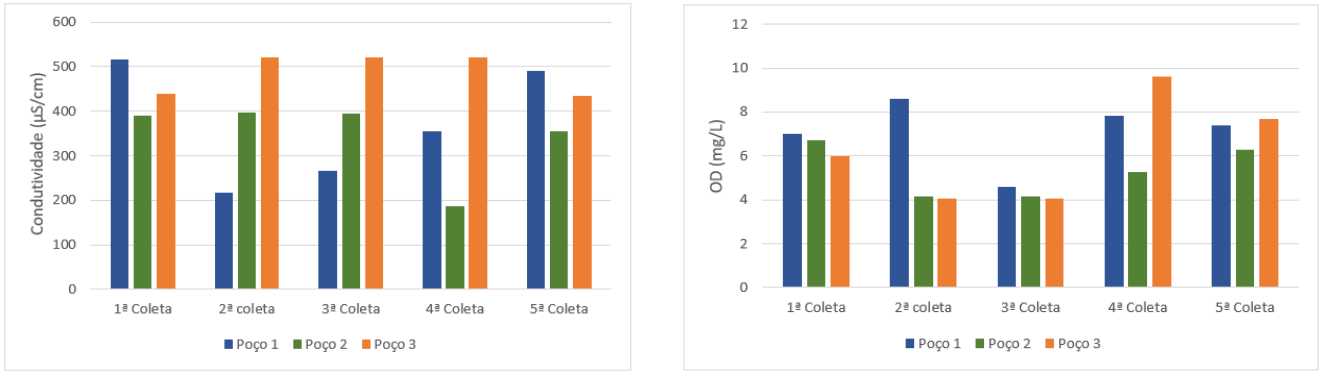


Figura 8: Relação da Condutividade eletrolítica e Oxigênio Dissolvido dos poços.
Fonte: Autor, 2024.

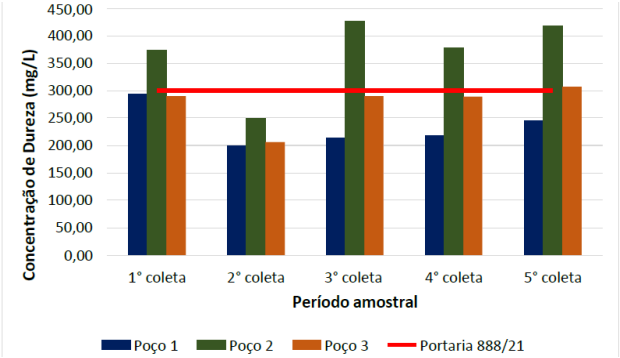


Figura 9. Relação da determinação de dureza total dos poços
Fonte: Autor, 2024.

O Poço 1 apresentou o desempenho hidroquímico mais satisfatório entre os pontos monitorados, evidenciando melhores condições qualitativas em comparação aos demais sistemas avaliados. A dureza total permaneceu elevada ao longo de todas as campanhas, enquadrando a água nas classes dura a muito dura, em função das concentrações de cálcio e magnésio dissolvidos. Tal condição representa potencial de precipitação de carbonatos e consequente formação de incrustações em redes de distribuição, reservatórios e equipamentos hidráulicos. A cor aparente manteve-se predominantemente dentro de faixas aceitáveis, com discretas oscilações sazonais associadas, possivelmente, à recarga pluviométrica e ao transporte de matéria orgânica natural. As concentrações de cloreto mantiveram-se estáveis e compatíveis com os limites normativos, sugerindo reduzida interferência de fontes antrópicas ou aporte de efluentes. A turbidez apresentou baixos valores na maior parte do período amostral, indicando reduzida carga de partículas suspensas e adequada integridade do sistema de captação. Os sólidos dissolvidos totais apresentaram incrementos pontuais, atribuídos à interação água-rocha, processos de dissolução mineral e tempo de residência hidráulica. O oxigênio dissolvido manteve-se em concentrações compatíveis com ambientes subterrâneos pouco impactados, enquanto a alcalinidade evidenciou adequada capacidade tamponante, relacionada predominantemente à presença de bicarbonatos, contribuindo para a estabilidade do pH e do equilíbrio carbonático.

O Poço 2 apresentou o quadro qualitativo mais restritivo entre os poços analisados. A dureza total registrou concentrações persistentemente elevadas, superiores aos valores recomendados em grande parte das amostras, caracterizando água com limitações de uso e necessidade de tratamento prévio para abastecimento humano. A cor aparente apresentou maior variabilidade temporal, especialmente em períodos de precipitação elevada, indicando influência sazonal e possível ingresso de material coloidal e matéria orgânica no aquífero raso ou no entorno da captação. As concentrações de cloreto permaneceram dentro dos limites legais, embora com flutuações discretas entre campanhas, possivelmente relacionadas à dinâmica de recarga e diluição do aquífero. A turbidez apresentou elevações episódicas, sugerindo ressuspensão de finos, carreamento de partículas ou deficiências construtivas no revestimento e vedação sanitária do poço. Os sólidos dissolvidos totais apresentaram concentrações elevadas, evidenciando maior mineralização e maior carga iônica dissolvida. O oxigênio dissolvido manteve-se, em geral, dentro da faixa esperada para águas subterrâneas, ao passo que a alcalinidade apresentou comportamento variável, compatível com alterações hidrogeoquímicas sazonais e processos de dissolução de minerais carbonáticos.

O Poço 3 também apresentou restrições relevantes sob o ponto de vista qualitativo. A dureza total apresentou valores elevados em parte significativa das amostras, indicando necessidade de abrandamento para adequação aos padrões de uso potável. A cor aparente apresentou alterações pontuais, possivelmente associadas à presença de substâncias húmicas, óxidos metálicos e influência de eventos pluviométricos. Os teores de cloreto mantiveram-se dentro dos padrões estabelecidos, não indicando evidências consistentes de contaminação salina ou contribuição de efluentes sanitários. A turbidez apresentou variações intermitentes, sugerindo mobilização de sedimentos da zona filtrante, entrada de partículas finas ou falhas na proteção sanitária da estrutura. Os sólidos dissolvidos totais oscilaram entre concentrações moderadas e elevadas, refletindo a composição litológica local e os mecanismos de dissolução geoquímica. O oxigênio dissolvido permaneceu em concentrações adequadas durante a maior parte do monitoramento, enquanto a alcalinidade apresentou valores coerentes com a geologia regional, contribuindo para a manutenção do equilíbrio ácido-base do sistema aquoso.

De forma integrada, os resultados indicam que o Poço 1 apresentou melhor padrão de qualidade, ao passo que os Poços 2 e 3 demandam gestão mais rigorosa, incluindo monitoramento sistemático, reavaliação das condições construtivas, proteção sanitária do entorno e adoção de tecnologias de tratamento, com ênfase na remoção de dureza e no controle de sólidos dissolvidos totais, visando ao atendimento integral aos requisitos de potabilidade e segurança hídrica. A análise dos parâmetros dureza total, cor aparente, cloreto, turbidez, sólidos dissolvidos totais (SDT), oxigênio dissolvido (OD) e alcalinidade permitiu caracterizar a qualidade hidroquímica das águas subterrâneas avaliadas. A dureza total apresentou valores elevados em parte das amostras, indicando concentrações expressivas de cálcio e magnésio, com potencial para incrustações em tubulações e equipamentos.

Os parâmetros microbiológicos obtiveram resultados positivos, estando ausentes em 100 mL, conforme exigido pela Portaria 888/2021, tanto nas coletas realizadas em período chuvoso quanto seco.

A cor aparente apresentou variações sazonais, possivelmente associadas ao carreamento de matéria orgânica, óxidos metálicos e partículas finas durante períodos chuvosos. As concentrações de cloreto mantiveram-se, em geral, dentro dos limites estabelecidos, sugerindo baixa influência de contaminação antrópica ou salinização.

A turbidez apresentou oscilações pontuais, relacionadas à presença de sólidos em suspensão, mobilização de sedimentos ou interferências estruturais nos poços. Os sólidos dissolvidos totais variaram entre concentrações moderadas e elevadas, refletindo processos de mineralização natural decorrentes da interação água-rocha.

A condutividade elétrica variou entre as amostras, indicando diferenças na concentração de sais dissolvidos e no grau de mineralização da água. Valores elevados estão associados à maior presença de íons, como cálcio, magnésio e cloretos, podendo refletir influência geológica ou concentração de sólidos dissolvidos totais. É um importante indicador da qualidade hidroquímica da água subterrânea. O oxigênio dissolvido manteve-se em concentrações compatíveis com águas subterrâneas de baixa carga orgânica, indicando relativa estabilidade geoquímica. A alcalinidade apresentou valores compatíveis com sistemas bicarbonatados, conferindo capacidade tamponante e estabilidade do pH.

O pH apresentou valores dentro da faixa esperada para águas subterrâneas, indicando condições químicas relativamente estáveis. Esse parâmetro influencia a solubilidade de minerais, processos corrosivos e a eficiência de tratamentos, sendo essencial para a avaliação da potabilidade da água. De modo geral, os resultados evidenciam necessidade de monitoramento contínuo, com atenção especial à dureza, turbidez e SDT, parâmetros com maior potencial de restrição ao uso potável.

Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a utilização dos poços subterrâneos da Universidade Federal de Mato Grosso como fonte alternativa de abastecimento apresenta viabilidade parcial.

O Poço 1 demonstrou condições favoráveis para utilização, uma vez que atendeu aos padrões de potabilidade estabelecidos, embora tenha apresentado elevada dureza e variações na concentração de sólidos, o que indica a necessidade de monitoramento contínuo e possíveis adequações para melhoria da qualidade da água.

Por outro lado, os Poços 2 e 3 não atenderam integralmente aos parâmetros exigidos para consumo humano, sendo classificados como inadequados para abastecimento direto. Dessa forma, torna-se indispensável a aplicação de tratamentos prévios para que a água desses poços possa ser utilizada de forma segura.

Além disso, foram identificadas inadequações estruturais nos sistemas de captação, como vazamentos e ausência de proteção adequada, fatores que podem comprometer a qualidade da água e favorecer processos de contaminação. Assim, recomenda-se a realização de intervenções estruturais para garantir maior segurança sanitária e eficiência no sistema. Dessa forma, a utilização das águas subterrâneas como fonte complementar de abastecimento na universidade configura-se como uma alternativa promissora, especialmente no que se refere à redução de custos e à sustentabilidade hídrica. No entanto, sua implementação deve estar associada à adoção de medidas técnicas adequadas, incluindo tratamento da água, manutenção estrutural dos poços e controle sistemático da qualidade.

Agradecimentos

Os Autores expressam seus sinceros agradecimentos ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), a Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia (FAET) e a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho. Agradecem, de forma especial, à professora Eloá Pelegrino, da área de Qualidade das Águas de Abastecimento, pela orientação, apoio e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento deste artigo.

Referências Bibliográficas

Águas subterrâneas e saneamento básico. 2019 – Instituto Trata Brasil

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. –Brasília: Funasa, 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9898: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

CADEADO, A. Avaliação Químico e Microbiológica da Água para o consumo Humano. Licenciatura em Engenharia do AMBIENTE, Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Engenharia. Moçambique, 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008.** Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2008.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality.** 4. ed. Geneva: WHO, 2017.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo.** São Paulo: CETESB, 2022.

ZERWES, Cristian Mateus et al. Análise da qualidade da água de poços artesianos do município de Imigrante, Vale do Taquari/RS. Ciência e Natura, v. 37, n. 3, p. 651-663, 2015.

SOLAR PHOTODECOMPOSITION FOR REMOVING BTEX (BENZENE, TOLUENE, ETILBENZENO E XILENO) COMPOUNDS FROM GROUNDWATER CONTAMINATED BY GASOLINE STATION ACTIVITIES

1 Priscila Moreira Peres Garcia, 2 Nilce Ortiz

1 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, e-mail: priscila.garcia1008@gmail.com; 2 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, e-mail: nortizbr@gmail.com

Keywords: Solar photodecomposition; BTEX; environment remediation.

Abstract

This study investigates the application of solar photodecomposition to remove BTEX compounds (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes) from groundwater contaminated by activities gasoline stations. By the end of 2024, Brazil had 44,67 fuel stations authorized by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), occupying the 9th position in the ranking of the largest oil consumers. Due to their high toxicity and carcinogenicity, BTEX compounds pose serious risks to both the environment and public health. The photodecomposition process uses TiO_2 as a catalyst, resulting in hydroxyl radical by many reactions. The primary goal of this research was to develop effective and sustainable technology for treating and removing BTEX from groundwater contaminated using solar photodecomposition. The synthesis of Microstructured Titanium dioxide (TiO_2) was synthesized with diatomite to develop heterogeneous photocatalysis for BTEX degradation to achieve this objective. The TiO_2-Diatomite composite characterization used scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetric analysis. SEM provided detailed insights into the material's microstructure and morphology, while TGA assessed the thermal stability of the photocatalyst in BTEX degradation processes. BTEX concentration measurements used a UV-visible spectrophotometer for benzene determination, with aliquots collected at 30-minute intervals. The methodology used involved the synthesis of TiO_2-Diatomite from the hydrolysis of titanium isopropoxide with diatomite, where the characterization of this material was tests conducted with 9.0 g of TiO_2-Dt and 40% BTEX solutions evaluated the removal efficiency across varying catalyst masses (0.8 g to 2.5 g). The highest BTEX removal efficiency, 79.0%, was achieved with 1.0 g of TiO_2-Dt.

Introduction

The commercialization of petroleum-derived fuels has led to the release of mono-aromatic hydrocarbons such as benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes (BTEX), which are significant toxic pollutants. Effective remediation of contaminated sites is crucial for mitigating water contamination risks and protecting human health ANP (2021).

According to CETESB – Environmental Company of the State of São Paulo, approximately 4,52 gas stations are installed in the state of São Paulo. BTEX compounds (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes) are potential pollutants in groundwater contamination due to leaks from gas stations. The high number of contaminated areas also represents an increased risk of water supply shortages Figure 1.

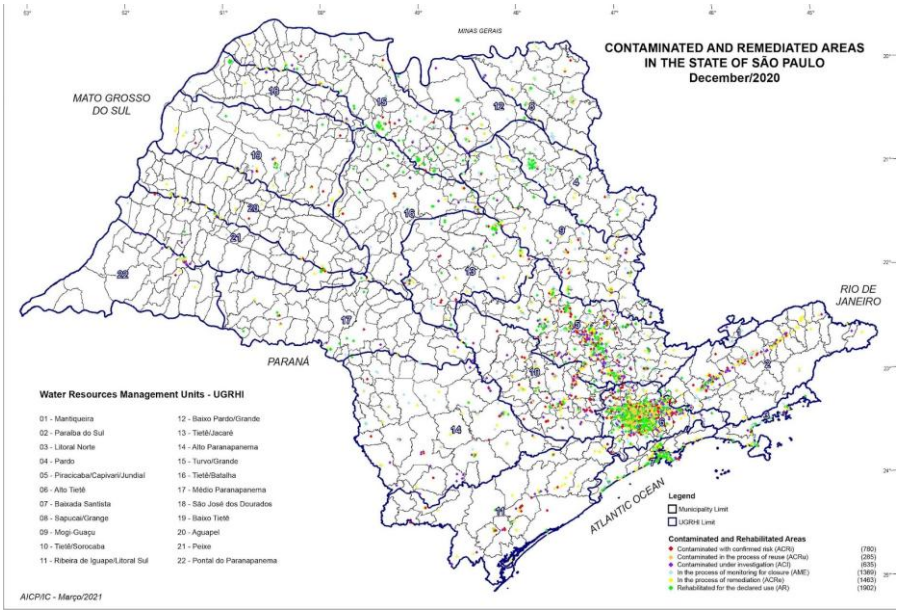


Figure 1: Map showing the gas station distribution and contaminated areas. Source: CETESB, 2020.

This work addresses using solar photodecomposition to remove BTEX from groundwater contaminated by gas stations. The study's main objective was to develop an effective technology for treating and eliminating BTEX from groundwater using solar photodecomposition. For this purpose, there was the synthesis of microstructured titanium dioxide (TiO_2) with diatomite, aiming at the heterogenous photocatalysis of BTEX compounds. The combination of BTEX adsorption by TiO_2-diatomite with solar radiation-mediated photodecomposition proved to be effective in contaminant removal. Additionally, the calculation of Thomas and Yoon-Nelson curves demonstrates that solar photodecomposition of BTEX compounds and efficient catalysts is a powerful strategy to mitigate groundwater contamination by organic compounds.

The study's second phase was the treatment of some synthetic water samples contaminated with BTEX using photodecomposition processes. The gasoline content in these synthetic water samples was equivalent to the levels reported by environmental agencies for contaminated groundwater. The treatment utilized microstructured titanium dioxide (TiO_2) synthesized with diatomite as a biotemplate catalyst widely employed in heterogeneous photocatalysis. The development enhances the ability of the catalyst's approach benefits from the catalyst's ability to mineralize a broad range of organic due to the high efficiency in producing hydroxyl radicals, the potential for catalyst reuse, and the use of solar radiation during the reaction and as an energy source Suri *et al*. (1993).

In Brazil, the application of heterogeneous solar photocatalysis is particularly well-suited due to the country's favorable solar energy conditions. The abundant solar resource makes the process viable and sustainable, leveraging renewable energy Luiz (1985). Solar energy is promising for meeting wastewater treatment needs through advanced oxidative processes, especially in countries with high solar insolation. Brazil's consistently high levels of global irradiation across its territory support the feasibility of solar-driven treatments.

Materials and Methods

1. Photocatalytic Mechanism

Heterogeneous catalytic reactions involve a series of physical transport steps that can influence the overall reaction rate. In photocatalytic systems, these steps occur sequentially, as described by Vazzoler (2019):

1) Initial movement of reactants or microorganisms through a boundary layer adjacent to the catalyst surface.
2) Internal transport within the catalyst pores allows the reactants to reach the active sites (intraparticle diffusion).
3) The interaction of reactants with the catalyst surface leads to adsorption.
4) Chemical conversion at the active sites, followed by the release of products (desorption).
5) Transport of products within the pores, moving toward the catalyst's external surface.
6) Dispersion of products through the external boundary layer, enabling their release into the surrounding fluid.

The main chemical transformations associated with photocatalytic decomposition and disinfection occur during steps 3 and 4, where the catalyst's surface area is crucial. However, the other steps can also affect the process's overall efficiency. Typically, the slowest step is the limiting factor, determining the overall reaction behavior.

The kinetic study of these systems aims to determine the rate of chemical reactions and identify the factors influencing them. For this purpose, pseudo-first-order equations (Equation 2), pseudo-second-order equations (Equation 3), and intraparticle transport equations (Equation 4) are commonly applied Ray *et al*. (2017).

2. Synthesis of Diatomite + TiO_2

The TiO_2-Dt semiconductor synthesis allows its use in tests as a magnetic stirrer using a beaker containing distilled water, glacial acetic acid, titanium isopropoxide, and natural diatomite Ortiz *et al.* (2018). After adding the reagents and the distilled water, complete the volume until 400 ml with the final suspension mixed for 2 to 3 hours. After decantation and filtration, the solid formed by the sol-gel process was placed in an oven heated to an average temperature of 373K for 24 hours to obtain TiO_2-Dt microstructures. The prepared material suffered a drying step and storage and was in solar photodecomposition. Figure 2.

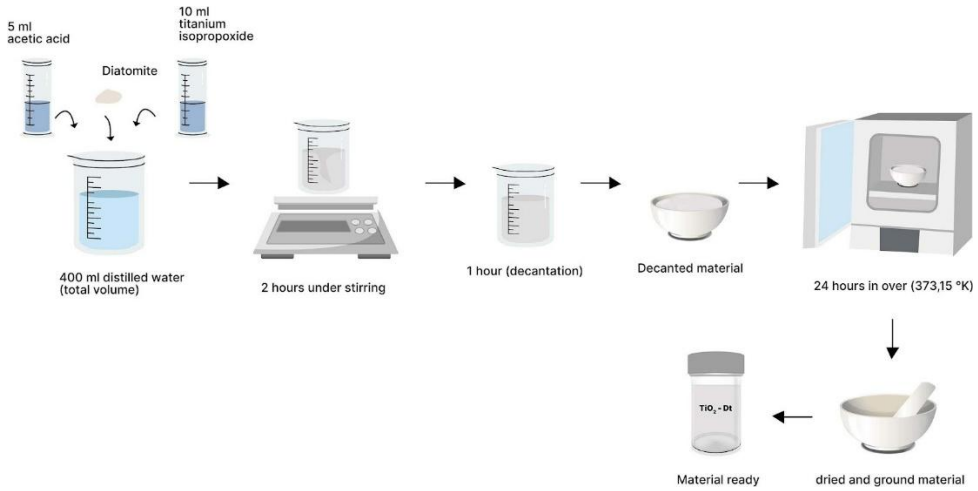


Figure 2: Steps of the TiO_2-Diatomite synthesis process. Source: Author.

3. Photodecomposition Processes

The parameters of the photodecomposition process studies were the mass proportion 9.0 g of TiO_2-Dt, the synthetic solutions of water and BTEX % prepared in the laboratory, stirring time and incidence of artificial solar radiation, pH = 5.0 values, lux 380, and temperature 295 K—298 K.

Two LED lamps installed in the solar chamber simulated solar radiation, allowing solar photodecomposition to occur under controlled conditions. The BTEX solutions were prepared and diluted in different concentrations (BTEX and distilled water) at values equivalent to those found in the literature for contaminated waters.

The experiments conduction in the laboratory over a total period of 2 hours. After preparing the sample containing BTEX and TiO_2-diatomite, inserted into the photodecomposition column, samples were collected at intervals of 0, 30, 60, 90, and 120 minutes and measure the benzene content to control the BTEX decomposition using a UV-VIS spectrophotometer. These measurements allowed the evaluation of the efficiency of the photodecomposition processes over time. Figure 3 shows the photodecomposition process. UV-VIS spectrophotometry helps control the photodecomposition process by determining the benzene concentration in each collected aliquot at the characteristic wavelength of λ268 nanometers (nm).

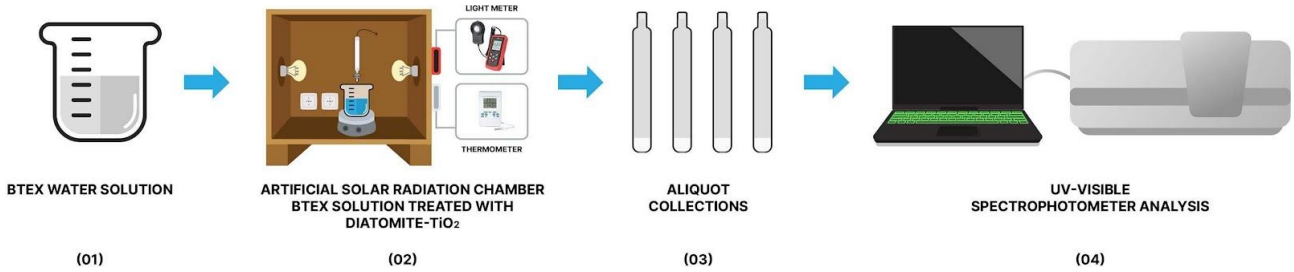


Figure 3: Photodecomposition process carried out in the laboratory. Source: Author.

1 – BTEX solution with TiO_2-Dt;
2 – Artificial solar radiation chamber;
3 – Aliquot collections;
4 – Analysis with UV-visible spectrophotometer;

Results and Discussion

During the research, the experiments conducted were in a controlled laboratory environment. Initial photodecomposition tests aimed to investigate the effects of variations in the initial percentages of BTEX in water solutions, the impact of adding different amounts of the photocatalyst obtained by the synthesis of TiO_2 with the diatomite acting as a template (TiO_2-Dt), and the variation of photodecomposition temperature within the range of 298 K to 313 K.

Generally, photodecomposition processes are feasible at temperatures between 293 and 353 K, with values below or above this range potentially significantly influencing the efficiency of organic compound removal Buth (2009).

1. The mass of Semiconductor Material

The maximum removal efficiency was achieved using 0.5 g and 0.8 g of TiO_2-Dt with dilution percentages of 60% and 40% BTEX, respectively. Increasing the mass beyond this point decreases process efficiency as the system reaches saturation equilibrium. **Table 1** presents the results.

By determining the optimal semiconductor mass for maximum efficiency, other process parameters could be optimized, and BTEX removal evaluated more effectively.

TiO_2/Dt Mass 9.0 (g)	BTEX Percentage (%)	Removal (%)
0.8	40	84.96
1.0	40	78.97
1.2	40	75.00
1.2	40	74.00
0.5	40	71.37
1.3	40	70.91
1.5	40	70.43
TiO_2/Dt Mass 6.0 (g)	**BTEX Percentage (%)**	**Removal (%)**
1.5	60	70.43
0.5	60	88.33

Table 1: The synthesis rate TiO_2/Dt , the total TiO_2-Dt mass and the removal efficiency, measured at λ 268 nm after 120min. Source: Author.

2. Characterization of theTiO_2 - Dt

The preparation of titanium dioxide with diatomite was in the laboratory under controlled conditions. Later, the synthetic material was subjected to photodecomposition tests and physical-chemical characterization using SEM and thermogravimetry analytical methods.

The microstructural analysis presents morphological information such as the orientation and quality of the reinforcing fiber interface, the interface between the matrix and dispersed phase of immiscible blends, and the presence of impurities, bubbles, cracks, and irregular surfaces.

The thermogravimetric heating ramp varied between 273 and 1123 K, observing the variability of the semiconductor mass. From 873 K, there was a loss of 93.3% of the mass value compared to the initial value of 7.1 mg, and this is due to the use of diatomite with greater volatility as a structuring agent.

3. Infrared Analysis of TiO_2-Dt before and after the Process

The infrared analysis of the synthesized photocatalyst showed that the characteristic silica peaks remained unchanged before and after the photodecomposition process. Nevertheless, the structural peaks of the Si-Ti bond remain the same.

4. Chemical Analysis of the Photocatalyst

The photodecomposition tests were determined by spectrophotometric methods based on a calibration curve prepared with standard solutions. The concentration measurements of the complexes formed were carried out with the aid of a UV-visible spectrophotometer device.

An Experimental Design matrix used the process parameters: the mass ratio between the initial percentage of BTEX solutions measured by benzene determinations and the mass of diatomite doped with TiO_2, the system's pH values, and the temperature of the photodecomposition process.

The results allowed the construction of the benzene percentage curves in solutions at different percolation time intervals on photodecomposition columns. The experiments indicate the best photodecomposition conditions, the system's equilibrium concentration, saturation times, and the influence of pH and temperature. Some photodecomposition processes were accomplished by changing the initial percentages of BTEX in solution and studying the effect of adding different masses of the semiconductor (TiO_2-Dt) at various intervals for 2 hours.

The tests with 60% BTEX in water and 1.0 g of TiO_2-Dt mass presented satisfactory results, as shown in Table 2.

TESTS	Semiconductor TiO_2 - Dt (g)	Percentage BTEX (%)	Removal (%)
37	0.5	60	88.3
59	1.5	60	70.4
69	0.8	40	85.0
74	1.0	40	75.0
75	1.0	40	73.0

Table 2: Semiconductor total mass and respective removals. Source: Author.

The results indicate that moderate amounts of catalyst, such as 0.5 g to 1.5 g, are more effective for BTEX removal, while larger quantities may reduce the efficiency of the photodecomposition reaction. This behavior is related to common phenomena in heterogeneous photocatalytic systems. Excess catalysts can cause light scattering and shading, which hinders the penetration of solar radiation necessary to activate the photocatalytic material. Additionally, it may lead to particle agglomeration, reducing the effective surface area available for the reaction. Another factor is mass transfer limitation, which can impair the diffusion of contaminants to the catalyst's active sites. The application of the Thomas model, used to estimate photodecomposition performance, enabled the evaluation of BTEX removal capacity by the catalytic material. The Thomas calculation demonstrated efficient photodecomposition in the tests using TiO_2-Dt with 40% BTEX solutions, especially with 1.2 g of TiO_2-Dt, indicating increased removal capacity with greater catalyst mass. However, this increase was not proportional, which reinforces the existence of an optimal catalytic concentration range to maximize process efficiency, as shown in Figure 4.

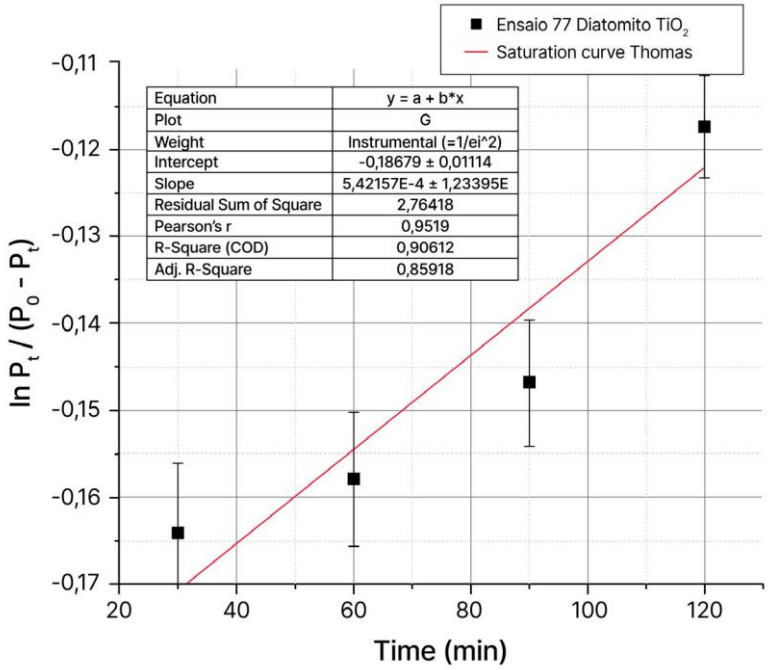


Figure 4: Thomas model calculation for 1.2 g TiO_2-Dt and 40% BTEX. Source: Author.

The Thomas calculations showed that the amount of TiO_2-Dt and the BTEX percentage mainly influenced BTEX removal efficiency. The 60% BTEX demonstrated better performance with TiO_2-Dt, particularly when the masses of TiO_2-Dt were higher. The $R_2 = 0.952$ indicates high correspondence with the Thomas model.

The Yoon-Nelson calculation indicated efficient photodecomposition performance, short breakthrough times, and efficient removal capacity. Figure 5 shows the result of the Yoon-Nelson model calculation. The R^2 values of 0.869 indicate some correspondence with the model; more experimental data can improve the R2 values.

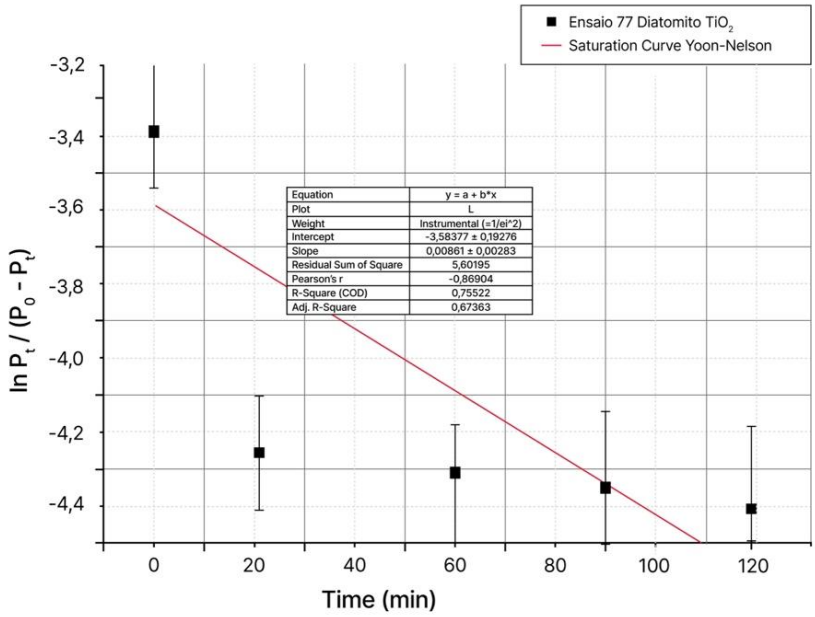


Figure 5: Yoon-Nelson model calculation for 1.2 g TiO_2-Dt and 40% BTEX. Source: Author.

The Table 3 presents the values of the Thomas (KTh) and Yoon-Nelson (KYN) in the literature and those obtained in this study, allowing a comparison of the contaminant removal rates across different studies.

REFERENCE	THOMAS CONSTANT – K_{Th} (ml/mg/h)	YOON-NELSON CONSTANT – K_{YN} (1/ min) 10^{-5}
In this study	From 0,0092 to 7,76	From 0,0016 to 5,42
El-Aswar, E.I. et al. Removal of ciprofloxacin Journal of Molecular Liquids 403 (2024)	From 0,055 to 3,54 Depending on the bed height, flow rate, and initial concentration	From 0,0091 to 0,0134 Depending on the bed height, flow rate, and initial concentration
Lv, N. Li, X. Phosphorous removal from wastewater using Ca modified attapulgite: fixed bed column performance and breakthrough curves analysis. Journal of Environmental Management (2023) 328.	From 0,083 to 0,36	From 0,086 to 0,11

Table 3: KTh and KYN values obtained in the literature and this study. Source: Autor.

When the values obtained in this study are compared with those presented in the literature, they are of the same order of magnitude, although with a wider range of variation. This indicates that the parameters of the photodecomposition process are efficient, can be used, and can still be improved and stabilized.

The optimization of the photocatalytic decomposition process offers a promising alternative for treating groundwater contaminated with BTEX. The results showed that TiO_2 microstructured with diatomite could remove up to 100% of BTEX from contaminated water. Additionally, the process allows for the recovery of leaked fuel from gasoline tanks. The photocatalytic decomposition tests indicated that solar radiation is essential for the complete degradation of BTEX. The solar photocatalysis is crucial for the total removal of contaminants.

The TiO_2-Dt and solar photocatalysis proved an effective strategy for contaminated water remediation, offering a sustainable and accessible solution. The thermogravimetric analysis confirmed the stability of the photocatalyst, highlighting its importance for process efficiency.

The developed system is applicable in both open and closed areas, and field tests using natural solar radiation prove its effectiveness. Solar energy can also power the system, making the photocatalyst system autonomous and cost-effective.

Optimizing the photodisinfection process can provide a new alternative to the disinfection methods used in the country.

Conclusion

The results of this study confirm that the combination of diatomite and TiO_2, prepared from the hydrolysis of titanium isopropoxide and microstructured with natural diatomite as a template, results in a material with exceptional properties for use as a semiconductor in solar photocatalytic decomposition processes. Through various tests, the parameters of the solar photocatalytic decomposition process were optimized, achieving complete (100%) removal of BTEX compounds from contaminated water.

The results demonstrate the feasibility and efficiency of using solar photocatalytic decomposition to treat contaminated groundwater with BTEX. This process effectively removed and proved a sustainable solution, in line with the growing need to preserve water quality. Promoting solar photocatalytic decomposition could represent a practical and environmentally friendly alternative for treating gasoline-derived contamination.

Additionally, the photocatalytic decomposition tests significantly improved BTEX removal from contaminated water. Solar radiation played a key catalytic role, accelerating the photocatalytic degradation of compounds adsorbed on TiO_2-Dt. Samples exposed to solar radiation exhibited a faster and more efficient reduction of BTEX levels, highlighting the importance of photocatalysis as an essential complement to the adsorption process.

Acknowledgments

To CAPES – Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel for the research scholarship process n° 88887.757078/2022-00.

References

ANDRADE, JA; AUGUSTO, F.; JARDIM ICSF. (2010). *Bioremediation of soils contaminated by petroleum and its derivatives.* Eclectic Chemistry, v. 35, no. 3, p. 17 - 43. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-46702010000300002

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP - Brasil (2021). *Brazilian statistical yearbook for oil, natural gas and biofuels*. Rio de Janeiro. http://www.anp.gov.br/conteudo-do-menu-superior/31-dados-abertos/6010-anuario-estatistico

BUTH, D. F. (2009). *Degradação fotocatalítica da tetraciclina em solução aquosa empregando TiO_2 suportado.* Dissertação de Mestrato – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB (2021). *Contaminated areas management manual.* http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/manual-de-gerenciamento/

EL-ASWAR, E.I. et al. (2024). *Removal of ciprofloxacin*. Journal of Molecular Liquids 403p.
INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (2012). Rio de Janeiro. https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-consumidores-de-petroleo-e-lgn-em-2019/

LV, N. LI, X. (2023). *Phosphorous removal from wastewater using Ca modified attapulgite: fixed bed column performance and breakthrough curves analysis*. Journal of Environmental Management 328p.

LUIZ, A.M. (1985). *How to Take Advantage of Solar Energy*. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda., 191p.
ORTIZ, N.; SILVA, A.; LIMA, G. N. S.; HYPPOLITO, F. P. (2018). *Using Solar-TiO_2 and Biocarbon to Decompose and Adsorb Amoxicillin from Polluted Waters.* International Journal of Chemistry; Vol. 10, No. 1.

RAY, S. K.; DHAKAL, D. K. Y. K.; LEE, S. W. (2017). *Cu-alfa-$NiMoO_4$ photocatalyst for degradation of methylene blue with pathways and antibacterial performance*. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, v. 348, p. 18 - 32.
SURI, R. P. S. et al. (1993). *Heterogeneous photocatalytic oxidation of hazardous organic contaminants in water*. Water Environmental. Research, v.65, n.5, p. 665 - 73.

VAZZOLER, A. (2019). *Cálculo de reatores catalíticos gás-sólido*. Volume 1, 1°edição, Vitória.

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM POÇOS TUBULARES: INFLUÊNCIA DAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS EM GRÃO-PARÁ/SC

1 Guilherme Semprebom Meller, 2 Gabriel da Silva Souza, 3 Álvaro José Back, 4 Rinaldo Betcher Neto, 5 João Carlos Costa Barboza Neto

1 Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Laboratório de Planejamento e Gestão Territorial - LabPGT, e-mail: gsm@unesc.net; 2 Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Laboratório de Planejamento e Gestão Territorial – LabPGT, e-mail: eng.agrimensorgabriel@gmail.com; 3 Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, e-mail: ajb@unesc.net; 4 Universidade Federal de Catalão – UFCAT, Instituto de Química, e-mail: rinaldo-richard-maria@hotmail.com 5 Centro Universitário UniSatc, email: joao.carlosbarboza@outlook.com

Palavras-chave: Água subterrânea; Hidrogeologia; Aquiferos

Resumo

O presente trabalho apresenta o levantamento e a avaliação físico-química e microbiológica de amostras de água captadas em onze poços tubulares profundos localizados na zona rural do município de Grão-Pará, sul de Santa Catarina. Os poços estão distribuídos em três unidades hidroestratigráficas distintas, conforme mapeamento da CPRM (2013): Unidade Rio do Sul e parcialmente Rio Bonito (Grupo Itararé), de caráter sedimentar permocarboniano; Formações Permianas e Cretácicas; e Embasamento Cristalino, de natureza fissural. As coletas foram realizadas em quatro campanhas entre julho e dezembro de 2020 por laboratório credenciado junto ao Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA/SC). Os resultados foram comparados aos valores máximos permitidos (VMP) pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, norma federal atualmente vigente sobre potabilidade de água para consumo humano. Não conformidades para ferro total foram detectadas em seis dos onze poços, com valores entre 0,92 mg Fe/L e 5,70 mg Fe/L; o pior resultado foi registrado no Poço P05, correspondente a 19 vezes o VMP de 0,3 mg/L. Coliformes totais foram identificados em oito poços, com contagens entre 25 e > 250 UFC/100 mL. Escherichia coli foi detectada nos Poços P03 e P04, com coletas realizadas em dia chuvoso. Nitrato acima do VMP individual foi verificado nos Poços P07 (21,0 mg/L), P08 (20,0 mg/L) e P09 (14,0 mg/L); o critério de soma de razões nitrato/nitrito estabelecido no Art. 39 da Portaria 888 foi violado nos mesmos pontos. Turbidez acima de 5 UNT foi observada nos Poços P05 (25 NTU), P09 (47 NTU) e P01 (7 NTU). Os Poços P02 e P11 foram os únicos em conformidade microbiológica plena. Os resultados reforçam a necessidade de implantação de sistemas de tratamento individualizados e monitoramento semestral.

Introdução

A água subterrânea é a principal fonte de abastecimento hídrico para a população rural do município de Grão-Pará, localizado no Alto Vale do Rio Braço do Norte, sul de Santa Catarina. A ausência de sistema de abastecimento público na zona rural faz com que os moradores dependam de poços tubulares profundos perfurados individualmente, sem monitoramento analítico periódico. Essa condição expõe os consumidores a riscos sanitários associados à ingestão de água com parâmetros em desconformidade com os padrões nacionais de potabilidade.

A Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 é o instrumento legal federal que estabelece atualmente os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade no Brasil. A portaria aplica-se também a soluções alternativas individuais de abastecimento de água para consumo humano, categoria na qual se enquadram os poços tubulares de uso domiciliar uni-familiar (Art. 4º). Em relação à Portaria MS 2.914/2011, a Portaria 888 manteve os VMP de ferro total (0,3 mg/L), manganês total (0,1 mg/L), turbidez (5 UNT), cor aparente (15 Pt/Co), fluoreto (1,5 mg/L), nitrato (10 mg/L) e nitrito (1 mg/L), além de exigir a ausência de Escherichia coli e coliformes totais. Entretanto, introduziu o critério adicional de que a soma das razões das concentrações de nitrato e nitrito, divididas pelos respectivos VMP, não deve exceder 1 (Art. 39), e removeu a faixa de recomendação de pH de 6,0 a 9,5, que passa a ter função orientativa para processos de desinfecção.

O município de Grão-Pará tem seu território abrangido por três unidades hidroestratigráficas distintas, conforme o mapeamento da CPRM (2013): a Unidade Rio do Sul e parcialmente Rio Bonito (Grupo Itararé), de natureza sedimentar permocarboniana, que constitui aquífero poroso intergranular de caráter confinado com produtividade expressiva no sul catarinense; as Formações Permianas e Cretácicas, que ocorrem na porção oeste do município; e o Embasamento Cristalino, unidade fissural predominante na porção leste. A composição litológica da Unidade Rio do Sul, rica em minerais ferruginosos, é determinante para a ocorrência generalizada de ferro total elevado nas águas subterrâneas dos poços ali instalados. O objetivo deste trabalho é realizar o levantamento e a análise da qualidade físico-química e microbiológica de amostras de água captadas em onze poços tubulares profundos na zona rural de Grão-Pará/SC, avaliar a conformidade com a Portaria GM/MS 888/2021 e discutir as prováveis origens das alterações detectadas.

Material e Métodos

A área de estudo localiza-se na zona rural do município de Grão-Pará, região do Alto Vale do Rio Braço do Norte, sul de Santa Catarina. Foram analisados onze poços tubulares profundos, identificados pelos códigos P01 a P11, distribuídos em

quatro campanhas de coleta realizadas entre julho e dezembro de 2020. A Tabela 01 apresenta a identificação completa dos poços com as respectivas datas de coleta e condições climáticas. Por razões de privacidade dos proprietários rurais, os poços são identificados apenas pelos códigos internos adotados neste estudo.

Código	Relatório de Ensaio	Data da Coleta	Cond. Climáticas	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota (m)
P01	A_380/2020	10/07/2020	Ensolarado	667853	6885295	302
P02	A_380/2020	10/07/2020	Ensolarado	663122	6878936	292
P03	A_448/2020	12/08/2020	Chuvoso	662081	6886006	471
P04	A_448/2020	12/08/2020	Chuvoso	667655	6883472	372
P05	A_568/2020	14/10/2020	Ensolarado	666592	6890535	384
P06	A_568/2020	14/10/2020	Ensolarado	672267	6878979	325
P07	A_568/2020	14/10/2020	Ensolarado	671953	6878218	360
P08	A_568/2020	14/10/2020	Ensolarado	670678	6877516	375
P09	A_568/2020	14/10/2020	Ensolarado	663424	6877507	325
P10	A_668/2020	01/12/2020	Não pertinente	668538	6874162	348
P11	A_668/2020	01/12/2020	Não pertinente	659607	6885513	409

Tabela 01: Identificação dos poços tubulares analisados no município de Grão-Pará/SC.
Fonte: Autor (2024).

A área de estudo abrange três unidades hidroestratigráficas distintas, conforme o mapeamento sistemático da CPRM (2013), cuja distribuição espacial condiciona as características hidráulicas e hidroquímicas dos poços perfurados (Figura 2). A Unidade Rio do Sul e parcialmente Rio Bonito, porção intermediária do Grupo Itararé, de idade permocarboniana, é a unidade de maior expressão na área e na qual se inserem os Poços P02, P04, P05 e P09. Esta unidade apresenta cinco litofácies principais: folhelhos e siltitos cinza-escuros a pretos, conglomerados, diamictitos, ritmitos e varvitos, e arenitos com estratificações plano-paralela, cruzada de baixo ângulo e cruzada hummocky. Sua faixa de afloramento inicia-se ao norte no município de Mafra, com largura aproximada de 15 km, e vai se estreitando em direção ao sul, raramente ultrapassando 2 km de largura na latitude do município de Alfredo Wagner. Na região de Grão-Pará, o contato basal da unidade se dá diretamente com o embasamento cristalino ou com paleovales tectônicos preenchidos por sedimentos do Grupo Itararé. As Formações Permianas e Cretácicas ocorrem na porção noroeste e sudoeste do município, onde se localizam os Poços P03 e P11. O Embasamento Cristalino, unidade de natureza fissural, predomina na porção leste do município e abriga os Poços P01, P06, P07, P08 e P10, cujas características hidrogeológicas diferem substancialmente das observadas nas unidades sedimentares.

O perfil geológico característico da Unidade Rio do Sul e parcialmente Rio Bonito (Poços P02, P04, P05 e P09) possui camadas e lentes areníticas que formam um aquífero poroso intergranular. Como essas camadas estão inseridas em meio a rochas de granulometria predominantemente fina, como siltitos, folhelhos e argilitos, o aquífero adquire caráter confinado, fator que incrementa significativamente a sua produtividade. O confinamento impede a descarga livre da água subterrânea para a superfície e mantém a pressão hidrostática acima do topo da zona saturada, condição que favorece a surgência em poços com menor nível estático e possibilita maior vazão de explotação. O nível estático em poços desta unidade no sul de Santa Catarina pode variar de surgente até aproximadamente 13 m de profundidade (CPRM, 2013).

Em termos de permeabilidade primária, folhelhos e argilitos são litologias naturalmente pouco permeáveis. No entanto, a produção de água na região de Grão-Pará é mais elevada do que o esperado com base na litologia dominante, fato atribuído ao fraturamento tectônico das rochas, que atua como componente adicional de transmissividade, criando descontinuidades e caminhos preferenciais para o fluxo da água subterrânea. Essa dupla origem da permeabilidade, primária nas lentes areníticas e secundária nas fraturas, é responsável pela variabilidade observada na produtividade entre poços próximos, uma vez que a interceptação de zonas fraturadas durante a perfuração é um fator estocástico de difícil previsão sem levantamento estrutural prévio detalhado.

A combinação do aquífero confinado com o fraturamento tectônico resulta em poços com expressivo potencial de produção, com vazões que podem variar entre 4,5 e 45 m³/h (CPRM, 2013). Em áreas específicas que ocupam paleovales tectônicos, como a região entre os municípios de Grão-Pará e Braço do Norte, a capacidade específica dos poços pode ser ainda mais elevada, podendo alcançar até 3,5 m³/h por metro de rebaixamento do nível d'água. Para que essa produtividade seja atingida, a perfuração deve ocorrer idealmente entre 80 e 130 m de profundidade, faixa em que as camadas areníticas e as zonas fraturadas de maior transmissividade tendem a se concentrar nesta unidade hidroestratigráfica.

Embora o potencial hídrico da Unidade Hidroestratigráfica Rio do Sul seja reconhecidamente elevado, a produtividade dos poços pode variar consideravelmente de uma propriedade para outra. Fatores desfavoráveis que podem reduzir a vazão incluem condições locais de sedimentação, as características texturais dos arenitos, a menor espessura e frequência das camadas arenosas, a diminuição da porosidade primária, o grau de compactação das rochas e os processos diagenéticos envolvidos, como a cimentação por sílica, calcita ou minerais argilosos. Essa variabilidade reforça a necessidade de avaliação hidrogeológica preliminar e de acompanhamento técnico habilitado durante a perfuração, de modo a identificar as zonas produtoras e definir a instalação adequada dos filtros e revestimentos, maximizando a eficiência do poço e minimizando o risco de contaminação por conexão hidráulica com horizontes superficiais.

Os Poços P03 e P11, localizados sobre as Formações Permianas e Cretácicas, inserem-se em unidade de natureza predominantemente sedimentar a vulcano-sedimentar, com aquíferos de permeabilidade variável conforme a litologia predominante em cada ponto de captação. Os Poços P01, P06, P07, P08 e P10, situados sobre o Embasamento Cristalino na porção leste do município, estão inseridos em aquífero fissural, cujo armazenamento e circulação de água subterrânea dependem essencialmente da densidade, abertura e interconectividade das descontinuidades tectônicas. Nesse tipo de aquífero, a produtividade dos poços é altamente heterogênea no espaço e dificilmente previsível sem investigação geofísica prévia, podendo variar de nula a expressiva em curtas distâncias horizontais, em função da interceptação ou não de zonas fraturadas permeáveis durante a perfuração (CPRM, 2013). A diferenciação hidroestratigráfica entre os poços é relevante para a interpretação dos resultados analíticos, uma vez que as características geoquímicas das águas subterrâneas são diretamente condicionadas pela litologia e pelas condições redox do aquífero explotado.

Previamente à perfuração de cada poço tubular, foram realizados estudos geofísicos por meio da técnica de tomografia elétrica (caminhamento elétrico de eletrorresistividade), com o objetivo de identificar as zonas com maior probabilidade de ocorrência de água subterrânea e subsidiar a definição dos pontos de captação. Em cada propriedade foram executadas duas seções de caminhamento elétrico.

A tomografia elétrica consiste na injeção de corrente elétrica artificial no terreno por meio de dois eletrodos de corrente (A e B), com medição simultânea das variações de voltagem por dois eletrodos de potencial (M e N). A partir dos dados adquiridos em campo, calcula-se a resistividade elétrica aparente da seção, obtendo-se a pseudo-seção de resistividade. Os dados são submetidos a inversão por algoritmo numérico de elementos finitos, resultando no modelo de resistividade real da seção (Inverse Model Resistivity Section). Com base na distribuição dos valores do modelo invertido, identificam-se as zonas com maior probabilidade de ocorrência de água subterrânea, caracterizadas por baixos valores de resistividade, indicativos de rochas fraturadas e saturadas.

A Figura 1 apresenta, a título ilustrativo, a seção de tomografia elétrica executada na propriedade do Poço P09, com erro de inversão (RMS) de 4,7%, considerado satisfatório para fins de interpretação hidrogeológica. O espaçamento entre eletrodos adotado foi de 5,0 m, conferindo profundidade de investigação máxima de aproximadamente 99,3 m.

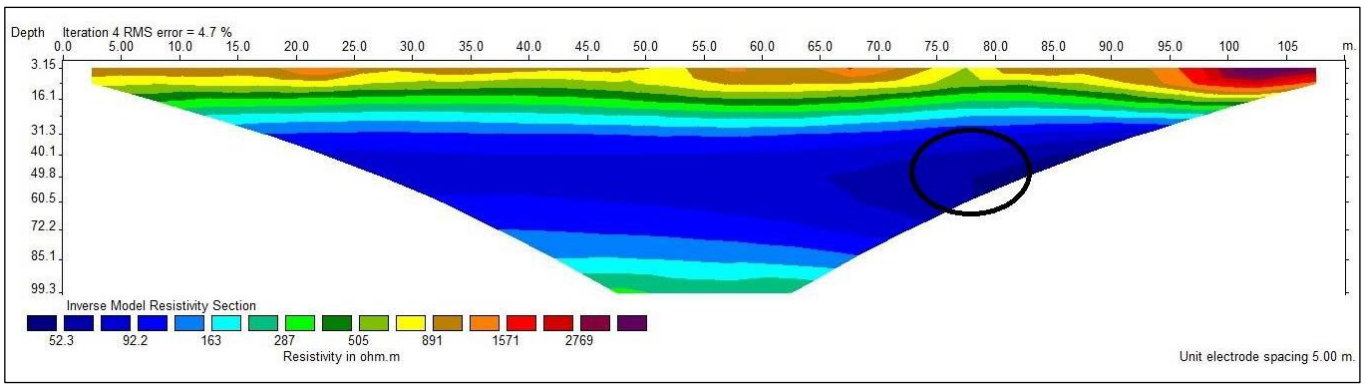


Figura 1: Seção de tomografia elétrica executada na área do Poço P09. A elipse indica zona de baixa resistividade (52,3 a 92,2 Ω·m) entre 40 e 65 m de profundidade, interpretada como horizonte fraturado e saturado. Fonte: Geopas (2020).

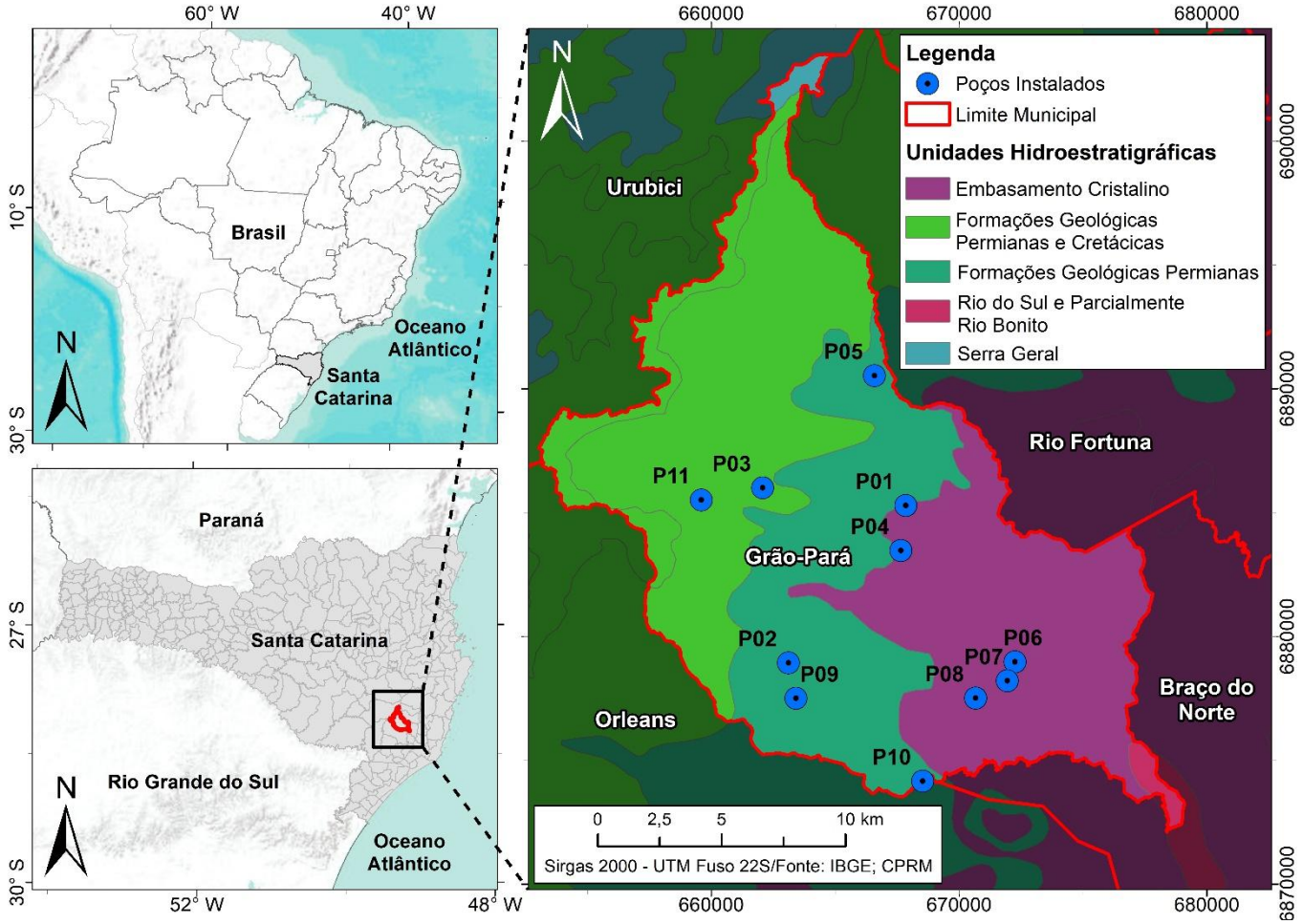


Figura 2: Mapa hidrogeológico do município de Grão-Pará/SC com a localização dos onze poços tubulares analisados (P01 a P11), sobrepostos às unidades hidroestratigráficas mapeadas pela CPRM (2013): Embasamento Cristalino (porção leste), Formações Permianas e Cretácicas (porção oeste), Unidade Rio do Sul e parcialmente Rio Bonito (Grupo Itararé, porção central) e Serra Geral (extremo norte). As linhas cinza representam as isopiezas do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Fonte: CPRM (2013), adaptado pelos autores (2026).

A interpretação da seção de resistividade evidencia estrutura geológica típica da Unidade Hidroestratigráfica Rio do Sul. Os valores elevados de resistividade na porção superficial (amarelo a vermelho, acima de 505 Ω·m, entre 0 e 3 m de profundidade) correspondem ao solo de cobertura e à zona não saturada. Em profundidades intermediárias (16 a 40 m), os valores de resistividade decrescem progressivamente (verde a azul claro, 163 a 287 Ω·m), indicando a transição para litologias de granulometria mais fina, como siltitos e folhelhos parcialmente saturados. Na porção inferior da seção (abaixo de 40 m), dominam valores muito baixos de resistividade (azul escuro, 52,3 a 92,2 Ω·m), interpretados como rochas sedimentares fraturadas e saturadas. A anomalia condutiva destacada pela elipse, posicionada entre 65 e 85 m de distância horizontal e entre 40 e 65 m de profundidade, representa zona de fraturamento tectônico com maior grau de saturação, constituindo o alvo prioritário de captação. Esta interpretação é coerente com o modelo hidrogeológico da unidade, no qual o fluxo subterrâneo possui componente importante por fraturamento tectônico, conforme descrito por CPRM (2013).

Com a correlação da geologia local, as anomalias de menor resistividade elétrica são as que apresentam maior probabilidade de ocorrência de água subterrânea. Ressalta-se que anomalias detectadas nas bordas da imagem de resistividade devem ser interpretadas com cautela, sendo utilizadas para locação de poços somente em último caso. De modo geral, a técnica de tomografia elétrica não permite fazer considerações sobre a quantidade e a qualidade da água no substrato, sendo seus resultados complementares aos dados hidrogeológicos e analíticos obtidos após a perfuração.

As coletas foram realizadas pelos responsáveis pelos técnicos especializados e encaminhadas ao laboratório credenciado pelo IMA/SC, conforme NBR 9898/1987. Os parâmetros avaliados compreenderam alcalinidades, balanço iônico, cálcio, cloretos, condutividade elétrica, coliformes totais, Escherichia coli ou coliformes termotolerantes, cor aparente, DBO, DQO, dióxido de carbono livre, dureza total, ferro total, fluoreto, fosfato total, magnésio, manganês total, nitrato, nitrito, odor, pH, potássio, sílica dissolvida, sódio, sólidos dissolvidos totais, sólidos totais, sulfatos e turbidez. Os métodos analíticos seguiram o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012), e os resultados foram avaliados conforme os VMP da Portaria GM/MS nº 888/2021, incluindo o critério de soma de razões de nitrato e nitrito estabelecido em seu Art. 39.

Resultados e Discussão

Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas dos onze poços analisados são apresentados na Tabela 02 e discutidos a seguir por grupos de parâmetros, considerando os valores máximos permitidos estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Para fins de organização da discussão, os parâmetros foram agrupados em: parâmetros físicos (pH, turbidez e cor aparente); parâmetros inorgânicos relacionados ao contexto geológico local (ferro total e manganês); parâmetros indicadores de contaminação antrópica (nitrato e nitrito, incluindo o critério de soma de razões do Art. 39); e parâmetros microbiológicos (coliformes totais e Escherichia coli).

Parâmetro	VMP (888/2021)	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11
pH	orientativo (a)	7,0	6,8	6,7	7,1	6,2	7,0	7,0	7,2	7,4	7,8	7,5
Turbidez (NTU)	≤ 5	7*	5	2	3	25*	< 1	3	1	47*	5	1
Cor Aparente (Pt/Co)	≤ 15	31,3*	7,0	2,6	6,4	26,5*	1,0	11,4	0,4	38,0*	1,4	1,4
Ferro Total (mg/L)	≤ 0,3	2,16*	1,25*	0,17	0,05	5,70*	0,92*	1,41*	0,09	2,75*	0,06	0,09
Mn Total (mg/L)	≤ 0,1	< 0,03	0,05	< 0,01	0,03	0,07	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,03
Nitrato (mg/L)	≤ 10	0,6	0,6	2,7	0,9	8,9	7,0	21,0*	20,0*	14,0*	0,6	1,8
Nitrito (mg/L)	≤ 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	2,6*	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Soma NO3/NO2 (b)	≤ 1	0,06	0,06	0,27	0,09	0,89	0,70+2,6*	2,10*	2,30*	1,40*	0,06	0,18
Fluoreto (mg/L)	≤ 1,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,7	1,2	0,7	< 0,1	0,6	< 0,1	< 0,1
Dureza Total (mg/L)	≤ 500 (c)	20	184	< 1	35	< 1	< 1	39	112	107	92	< 1
SDT (mg/L)	≤ 1000	26	54	80	172	< 10	130	100	170	184	200	568
Col. Totais (UFC/100mL)	ausência	Aus.	Aus.	> 250*	> 250*	> 250*	> 250*	25*	25*	> 250*	> 250*	Aus.
E. coli (UFC/100mL)	ausência	Aus.	Aus.	> 250*	> 250*	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.

Tabela 02: Resultados dos parâmetros selecionados e VMP da Portaria GM/MS 888/2021. Fonte: Laboratório Hidroambiental (2020). *Não conforme com a Portaria GM/MS 888/2021. (a) pH sem VMP numérico na Portaria 888/2021. Lalor usado para orientar desinfecção (Art. 39). (b) Soma das razões: (NO3/10)+(NO2/1); não deve exceder 1 (Art. 39, Portaria 888/2021). (c) Dureza: VMP de 500 mg/L conforme Anexo 11. SDT = Sólidos Dissolvidos Totais; Aus. = Ausente.

O pH não possui mais valor máximo permitido explícito na Portaria GM/MS 888/2021, tendo sido retirada a faixa de recomendação de 6,0 a 9,5 existente na Portaria 2.914/2011. Os valores de pH passam a orientar os processos de desinfecção por cloro, uma vez que o pH influencia a eficácia do cloro como desinfetante. Os onze poços apresentaram pH entre 6,2 e 7,8, faixa tecnicamente adequada para desinfecção por cloro livre e sem indicativos de agressividade corrosiva à tubulação. A turbidez excedeu o VMP de 5 NTU nos Poços P01 (7 NTU), P05 (25 NTU) e P09 (47 NTU). Valores de turbidez elevados comprometem a eficácia da desinfecção por cloro, pois partículas em suspensão protegem microrganismos da ação do agente desinfetante, o que torna este parâmetro duplamente relevante sob a ótica da Portaria 888/2021. A cor aparente excedeu 15 Pt/Co nos mesmos poços (P01: 31,3 Pt/Co; P05: 26,5 Pt/Co; P09: 38,0 Pt/Co), padrão este consistente com as elevadas concentrações de ferro observadas nesses pontos.

O ferro total foi o parâmetro com maior frequência de não conformidade, afetando seis dos onze poços (55%): P01 (2,16 mg/L), P02 (1,25 mg/L), P05 (5,70 mg/L), P06 (0,92 mg/L), P07 (1,41 mg/L) e P09 (2,75 mg/L). O Poço P05 apresentou o valor mais elevado do conjunto, 19 vezes o VMP de 0,3 mg Fe/L estabelecido pela Portaria 888/2021. O Art. 38 da Portaria 888/2021 admite valores superiores ao VMP para ferro e manganês apenas quando esses elementos estiverem complexados com produtos químicos de baixo risco, como poliortosfosfatos, e desde que as concentrações não ultrapassem 2,4 mg/L (ferro) e 0,4 mg/L (manganês). Esta exceção não se aplica ao contexto dos poços analisados, que são captações sem tratamento. A ocorrência generalizada de ferro elevado nos Poços P02, P05 e P09, inseridos na Unidade Rio do Sul e parcialmente Rio Bonito (Grupo Itararé), é coerente com a composição litológica desta unidade, cujos folhelhos e siltitos contêm minerais ferruginosos que, sob as condições redutoras do aquífero confinado, liberam ferro na forma de Fe^{2+} dissolvido (Von Sperling, 2005). A detecção de ferro acima do VMP também nos Poços P01 (2,16 mg/L), P06 (0,92 mg/L) e P07 (1,41 mg/L), localizados sobre o Embasamento

Cristalino, sugere que processos de oxidação de sulfetos e de mobilização de ferro a partir de minerais máficos nas descontinuidades fissurais podem contribuir para enriquecimento desse elemento mesmo em aquíferos cristalinos (CPRM, 2013). O manganês permaneceu dentro do VMP (0,1 mg/L) em todos os pontos, com valor máximo de 0,07 mg/L no Poço P05.

O nitrato excedeu o VMP individual de 10 mg/L nos Poços P07 (21,0 mg/L), P08 (20,0 mg/L) e P09 (14,0 mg/L). O Poço P05 apresentou 8,9 mg/L, valor abaixo do VMP individual mas próximo ao limite. O nitrito excedeu o VMP de 1 mg/L exclusivamente no Poço P06 (2,6 mg NO2-/L). A Portaria GM/MS 888/2021, em seu Art. 39, introduziu critério adicional: a soma das razões (concentração de nitrato/10) + (concentração de nitrito/1) não deve exceder 1. Aplicando este critério, os Poços P07, P08 e P09 apresentaram somas de 2,10, 2,30 e 1,40, respectivamente, em desconformidade adicional com a legislação vigente. O Poço P06 também não atende ao critério de soma, pois a concentração de nitrito (2,6 mg/L) isoladamente já supera o VMP. Concentrações elevadas de nitrato em ambiente rural estão tipicamente associadas à percolação de efluentes de fossas sépticas, lixiviação de dejetos animais e uso de fertilizantes nitrogenados. A proximidade dos valores entre P07 e P08 sugere possível fonte de contaminação comum.

A contaminação por coliformes totais foi detectada em oito dos onze poços analisados (73% do conjunto): P03, P04, P05, P06 e P09 com contagens > 250 UFC/100 mL; P07 e P08 com 25 UFC/100 mL; e P10 com > 250 UFC/100 mL. A Portaria GM/MS 888/2021 manteve a exigência de ausência de coliformes totais em 100 mL de água analisada, configurando não conformidade em qualquer resultado positivo. Escherichia coli foi detectada nos Poços P03 e P04 (> 250 UFC/100 mL), ambos com coleta realizada em condição climática chuvosa. A precipitação favorece a mobilização de contaminantes fecais superficiais para o interior do poço por escoamento ao longo do revestimento externo ou por infiltração direta no entorno da laje de proteção. A detecção de E. coli configura o risco sanitário mais grave do conjunto, por indicar contaminação de origem fecal e potencial veiculação de patógenos entéricos.

Os únicos poços sem contaminação microbiológica detectada foram P02 e P11. O Poço P01, embora com contaminação por coliformes totais ausente no resultado apresentado, excedeu o VMP de turbidez. A elevada frequência de contaminação microbiológica (73% dos poços com coliformes totais positivos) é consistente com estudos em zonas rurais brasileiras com perfil similar (Rodrigues et al., 2019), evidenciando que a ausência de projetos construtivos técnicos é fator determinante para a vulnerabilidade microbiológica das captações rurais.

Considerações Finais

O levantamento e análise de onze poços tubulares profundos na zona rural de Grão-Pará/SC, avaliados conforme os padrões da Portaria GM/MS nº 888/2021, revelou não conformidades expressivas. O ferro total foi o parâmetro físico-químico de maior frequência fora dos limites, afetando 55% dos poços, com valor máximo de 5,70 mg Fe/L no Poço P05, resultado que não se enquadra nem mesmo na exceção prevista no Art. 38 da Portaria 888/2021 para sistemas com complexação química. Coliformes totais foram detectados em 73% dos poços e E. coli em dois pontos cujas coletas coincidiram com condições chuvosas. O critério de soma de razões nitrato-nitrito introduzido pelo Art. 39 da Portaria 888/2021 foi violado nos Poços P06, P07, P08 e P09, reforçando a identificação de não conformidades que a análise isolada dos VMP individuais da legislação anterior não capturava.

Os poços P05 e P09 apresentaram os perfis analíticos mais comprometidos, com múltiplas não conformidades simultâneas. Os Poços P02 e P11 foram os únicos em conformidade microbiológica plena. Recomenda-se a implantação de sistemas individuais de aeração e filtração para remoção de ferro nos Poços P01, P02, P05, P06, P07 e P09, acompanhada de desinfecção por cloração contínua em todos os poços com não conformidades. Da mesma forma, o monitoramento analítico semestral, conforme previsto para Soluções Alternativas Individuais na Portaria GM/MS 888/2021, é indispensável para assegurar a segurança hídrica da população rural de Grão-Pará.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Sindicato dos Trabalhadores Rurais Agricultores e Agricultoras Familiares de Grão-Pará pelo apoio institucional e pela articulação com os proprietários rurais que viabilizou o acesso aos poços e a realização deste estudo, ao Laboratório Hidroambiental pela realização das análises físico-químicas e microbiológicas, e aos proprietários rurais pela disponibilização dos dados e acesso às propriedades.

Referências Bibliográficas

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22. ed. Washington, D.C.: APHA, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 2021.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Hidrogeologia do Estado de Santa Catarina: Programa Disponibilidade Hídrica do Brasil. Brasília: CPRM, 2013.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrología Subterránea. 2. ed. Barcelona: Omega, 1983. 2350 p.

GEOPAS. Parecer técnico sobre processamento e inversão dos dados geofísicos de eletrorresistividade: locação de poço tubular. Balneário Piçarras, 2020.

HIRATA, R.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial. In: BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (Org.). Águas do Brasil: análises estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. p. 149-161.

NBR 9898:1987 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

RODRIGUES, A. L. et al. Levantamento e análises das fontes alternativas de captação de água utilizadas no abastecimento de uma população rural de Visconde do Rio Branco – MG. Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 33, n. 1, 2019. Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452 p.

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO AQUÍFERO FRATURADO SERRA GERAL ATRAVÉS DE ÍNDICES DE SÉRIES TEMPORAIS: UM ESTUDO COMPARATIVO DE TIPOLOGIAS DE RESPOSTA

1Taison Anderson Bortolin, 2 Tiago de Vargas, 3 Pedro Antonio Roehe Reginato, 4 Franciéle Schwanck Carlos, 5 Paulo Salvadoretti, 6 Luis Felipe Faccioni

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: taison.bortolin@ufrgs.br; 2 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: tiago.devargas@ufrgs.br; 3 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: pedro.reginato@ufrgs.br; 4 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: schwanck.carlos@ufrgs.br; 5 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: paulo.salvadoretti@ufrgs.br; 6 Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAMAE), e-mail: lfaccioni@caxias.rs.gov.br

Resumo

A compreensão da dinâmica temporal dos níveis de água subterrânea é fundamental para a gestão de aquíferos fraturados, especialmente diante de cenários de variabilidade climática. O presente estudo objetivou caracterizar o comportamento hidrodinâmico do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na região de Caxias do Sul (RS), através da aplicação de índices de séries temporais. Foram analisados dados de monitoramento diário de dois poços tubulares profundos, aplicando-se métricas de *Flashiness* (Índice de Richards-Baker), Sazonalidade (Pardé), Amplitude e Previsibilidade (Colwell), conforme framework metodológico proposto por Heudorfer et al. (2019). Os resultados revelaram heterogeneidade nas respostas hidrodinâmicas: identificou-se desde comportamentos com alta inércia e regularidade até sistemas com resposta rápida a eventos de precipitação (alto *Flashiness*), mas com baixa capacidade de armazenamento (baixa amplitude e constância). A análise comparativa demonstrou que o uso de índices quantitativos permite distinguir a ocorrência de diferentes condições de recarga e fluxo que não são evidentes apenas com estatísticas descritivas clássicas. Conclui-se que a abordagem baseada em índices é eficaz para classificar a memória hidráulica do aquífero fraturado, fornecendo subsídios robustos para a gestão de outorgas e proteção de fontes em meios hidrogeológicos complexos.

Palavras-chave: Hidrogeologia; Séries Temporais; Sistema Aquífero Serra Geral.

Introdução

A gestão sustentável das águas subterrâneas em cenários de mudanças climáticas e aumento de demanda hídrica exige uma compreensão profunda não apenas dos volumes armazenados, mas da dinâmica temporal de resposta dos aquíferos (Gleeson, et al, 2012). Tradicionalmente, o monitoramento de níveis de água fornece dados pontuais que, sem um tratamento estatístico robusto, dificultam a interpretação dos mecanismos de recarga e descarga em diferentes escalas de tempo (Alley et al., 2002). A complexidade inerente aos sistemas hidrogeológicos, muitas vezes compostos por meios fraturados, cársticos ou porosos heterogêneos, resulta em comportamentos hidráulicos distintos que não podem ser capturados apenas por médias estáticas de nível de água dos poços (Cuthbert et al., 2019).

A análise de séries temporais tem se consolidado como uma ferramenta essencial para decifrar a memória e a inércia dos sistemas aquíferos (Bloomfield e Marchant, 2013). Estudos recentes demonstram que a forma do hidrograma contém assinaturas físicas do meio, refletindo a interação entre a precipitação, a zona não saturada e a difusividade hidráulica do aquífero (Lee et al., 2006, Heudorfer et al., 2019). No entanto, a comparação visual de hidrogramas é subjetiva e limitada, especialmente quando se lida com grandes conjuntos de dados ou séries com ruídos antrópicos, exigindo a adoção de métricas quantitativas padronizadas (Haaf e Barthel, 2018).

Nesse contexto, o uso de índices hidrológicos — métricas escalares que resumem características complexas do fluxo — permite a classificação tipológica dos poços (Pardé, 1933). Índices adaptados da hidrologia superficial, como o Baseflow Index ou métricas de Flashiness, juntamente com índices ecológicos de previsibilidade, têm sido adaptados para descrever regimes de aquíferos, permitindo distinguir entre sistemas de fluxo rápido e sistemas dominados pelo armazenamento Colwell (1974). A proposta de Heudorfer et al. (2019) sintetiza essas abordagens, estabelecendo um framework baseado em componentes de dinâmica (magnitude, tempo e forma) normalizados, facilitando a comparação entre diferentes domínios hidrogeológicos (Baker et al., 2004).

A aplicação desses índices é particularmente valiosa em regiões onde a rede de monitoramento abrange aquíferos com diferentes graus de confinamento ou conectividade hidráulica. A capacidade de quantificar a sazonalidade (dependência climática) e a contingência (repetibilidade do padrão) oferece subsídios diretos para a gestão de outorgas e avaliação de vulnerabilidade à contaminação, visto que aquíferos com respostas mais rápidas tendem a ser mais suscetíveis a poluentes superficiais (Scanlon et al., 2006; Taylor et al., 2013).

O objetivo deste trabalho é aplicar e avaliar um conjunto de índices de dinâmica de águas subterrâneas (sazonalidade, estrutura, flashiness e amplitude) em dois poços tubulares perfurados no Sistema Aquífero Serra Geral. Busca-se, através desta abordagem quantitativa, classificar o comportamento hidrodinâmico de cada ponto, correlacionando as respostas de nível com a precipitação local para identificar padrões de recarga e amortecimento inercial.

Material e Métodos

O estudo baseou-se no processamento de séries históricas de níveis diários de dois poços de monitoramento (denominados P1 e P3) inseridos no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) localizados no município de Caxias do Sul conforme mostra a Figura 1 e dados pluviométricos concomitantes. Esses poços fazem parte de um projeto de pesquisa financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) onde são monitorados vários poços no SASG.

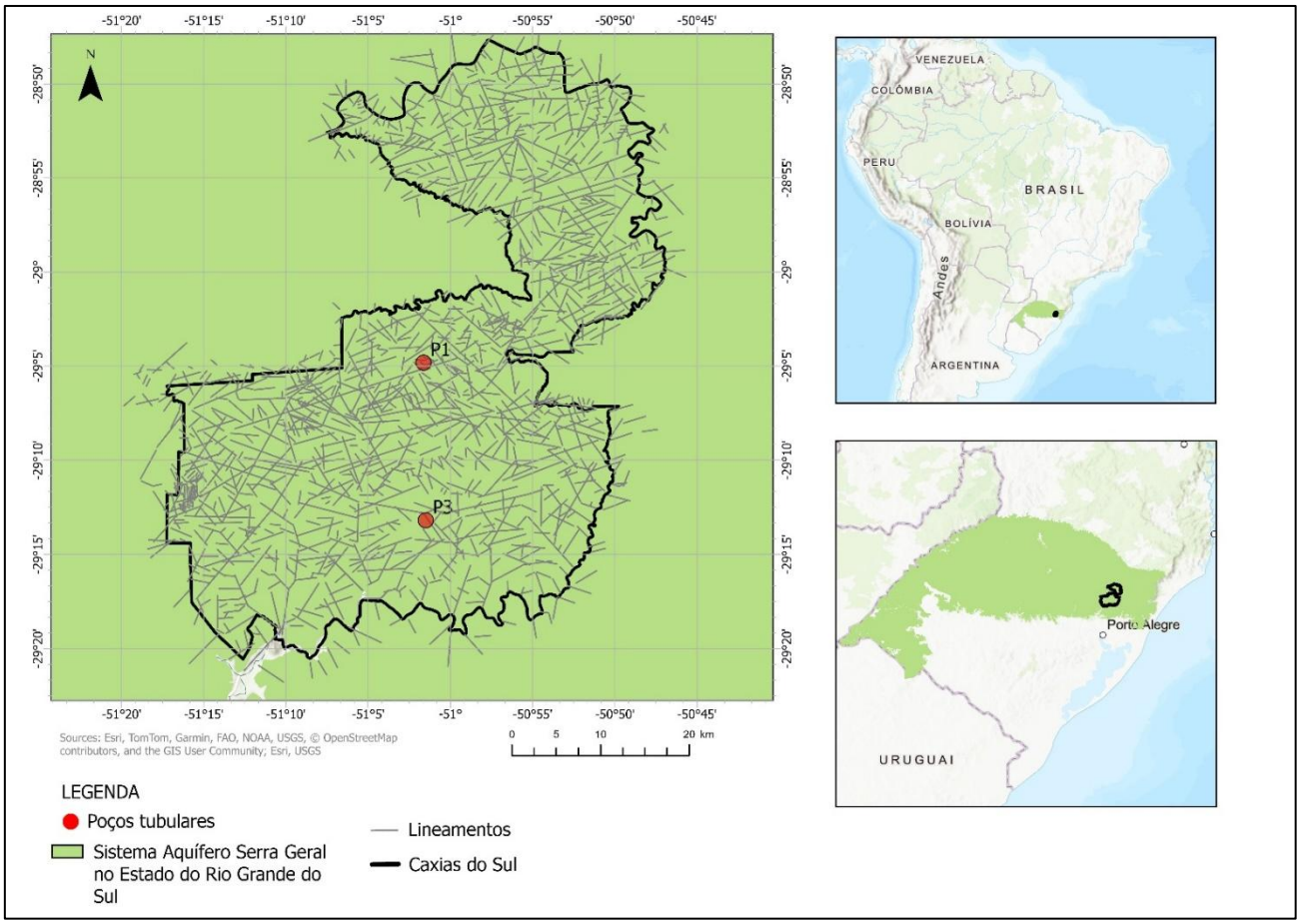


Figura 1: Localização da área de estudo e dos poços monitorados

A circulação e o armazenamento da água subterrânea no SASG estão associados à ocorrência de estruturas tectônicas (fraturas, zonas de fraturas, falhas) e de resfriamento (disjunções verticais, horizontais, zonas vesiculares a amigdalóides, zonas de brechas), bem como de estruturas associadas ao contato entre derrames vulcânicos básicos e ácidos da Formação Serra Geral (Reginato; Strieder, 2004; Freitas et al., 2012; Bortolin et al., 2016; Souza, 2022; Sanferari, 2022; De Vargas et al. 2022; Abreu et al. 2025). A Tabela 1 apresenta os parâmetros hidrogeológicos de cada poço perfurado obtidos a partir de dados de perfuração e teste de bombeamento.

Tabela 1: Parâmetros hidrogeológicos dos poços monitorados

Poço / Localidade	Profundidade Total	Entradas de Água (Profundidade)	Nível Estático (NE)	Nível Dinâmico (ND)	Vazão do Teste (Q)	Transmissividade (T)	Cap. Específica (q)
P1 - Boca da Serra (Vila Seca)	162 m	30 m; 70 m	28,62 m	91,90 m	2,43 m³/h (média)	0,022 m²/h	0,038 m³/h/m
P3 - Caravaggio (Santa Lúcia)	180 m	36 m; 144 m	3,00 m	150,00 m	1,70 a 2,90 m³/h	0,004 m²/h	0,012 m³/h/m

Pré-processamento e Normalização

A rotina de cálculo foi implementada em linguagem Python, utilizando as bibliotecas *Pandas* para manipulação de dados e *NumPy* para operações algébricas. Inicialmente, os dados brutos de profundidade do nível estático foram convertidos para carga hidráulica relativa, invertendo-se o sinal, de modo que incrementos positivos representem elevação do nível d'água (recarga). Para permitir a comparação entre poços com diferentes profundidades de instalação, aplicou-se a normalização *Feature Scaling* (escala 0-1) conforme Heudorfer et al. (2019), apresentada na equação 1.

$$y_t = \frac{x_t - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Equação 1

Onde y_t é o valor normalizado no tempo t, e x refere-se à série original. Foram geradas duas séries derivadas: uma diária para análises de curto prazo e uma semanal para análises de estrutura e sazonalidade.

Cálculo dos índices:

Foram utilizados os seguintes índices baseados no trabalho de Heudorfer et al. (2019):

Amplitude (Amp): Calculada sobre os dados absolutos (em metros), representando a faixa total de oscilação do aquífero:

$$Amp = h_{max} - h_{min}$$

Equação 2

Índice de Flashiness de Richards-Baker (I_{RB}): Quantifica a frequência e rapidez das oscilações de curto prazo na série diária normalizada. Reflete a reatividade do aquífero aos eventos de chuva:

$$I_{RB} = \frac{\sum_{t=1}^{n} |h_t - h_{t-1}|}{\sum_{t=1}^{n} h_t}$$

Equação 3

Onde:
n: Número total de dias na série temporal.
h_t: Valor do nível da água (ou profundidade normalizada) no dia t.
h_{t-1}: Valor do nível da água no dia anterior $(t-1)$.
$h_t - h_{t-1}$: O valor absoluto da variação diária (seja subida ou descida)

Sazonalidade de Pardé (P_s): Avalia a influência do ciclo anual. Calcula-se a razão entre a média mensal de longo termo de cada mês k_i e a média global da série $\overline{K}$. O índice é a diferença entre o coeficiente máximo e mínimo:

$$P_s = max\left(\frac{k_i}{\overline{K}}\right) - \min\left(\frac{k_i}{\overline{K}}\right)$$

Equação 4

Índices de Colwell (Previsibilidade): Baseados na Teoria da Informação de Shannon (Colweel, 1974), discretizando a série normalizada em 11 estados (classes), com dois parâmetros:

- **Constância (C):** Mede a tendência do nível permanecer no mesmo estado.
- **Contingência (M):** Mede a regularidade dos padrões temporais (sazonalidade repetitiva).

Sendo H(X) a entropia dos tempos (meses), H(Y) a entropia dos estados (níveis) e H(XY) a entropia conjunta, os índices são derivados de:

$$C = 1 - \frac{H(Y)}{\log(s)}$$

Equação 5

$$M = \frac{H(Y) - H(Y|X)}{\log(s)}$$

Equação 6

Pulsos Altos: A metodologia para o cálculo de Pulsos Altos (*High Pulses*), conforme utilizada por Heudorfer et al. (2019), foca na frequência com que o nível da água excede um determinado limiar, o qual foi utilizado como sendo o percentil 80. Para águas subterrâneas, este índice é crucial para entender se o aquífero enche e esvazia repetidamente (sistema dinâmico/vulnerável) ou se enche uma vez e mantém a carga por longo tempo (sistema de armazenamento).

Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os valores calculados para os índices hidrodinâmicos dos quatro poços monitorados.

Tabela 2: Índices de dinâmica de águas subterrâneas calculados.

Poço	*Amplitude (m)*	*Sazonalidade (Pardé)*	*Constância (Colwell)*	*Contingência (Colwell)*	*Flashiness (Baker)*	*Pulsos Altos (n)*
P1	1,21	1,27	0,14	0,43	0,036	2
P3	0,77	1,67	0,06	0,44	0,058	4

A análise visual dos hidrogramas sobrepostos à precipitação (Figura 2) e o gráfico de radar (Figura 3) revelam dois comportamentos hidráulicos distintos no domínio estudado.

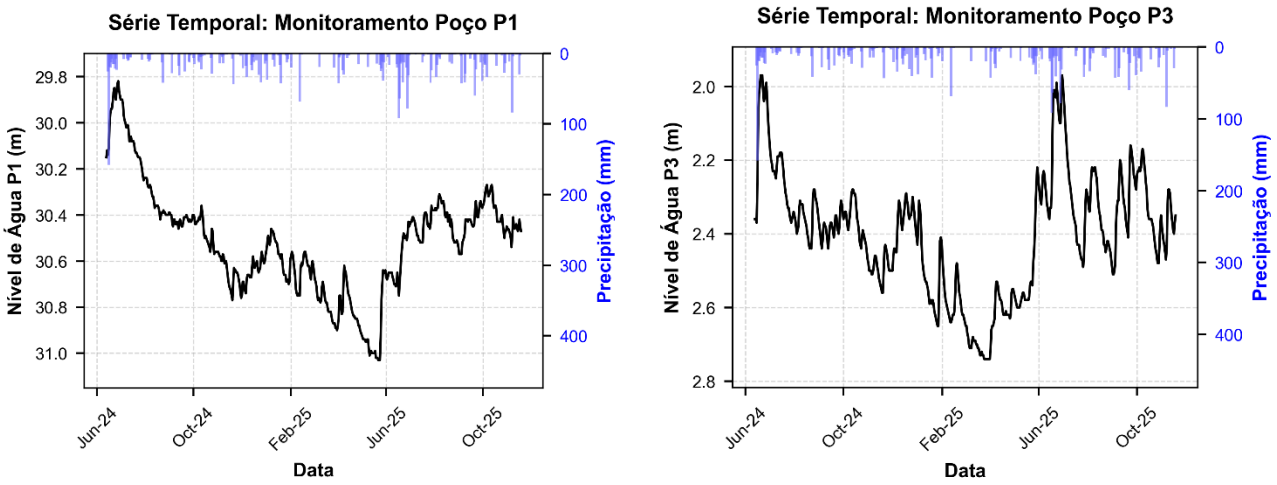


Figura 2: Variação dos níveis de água e precipitação para os dois poços no período monitorado

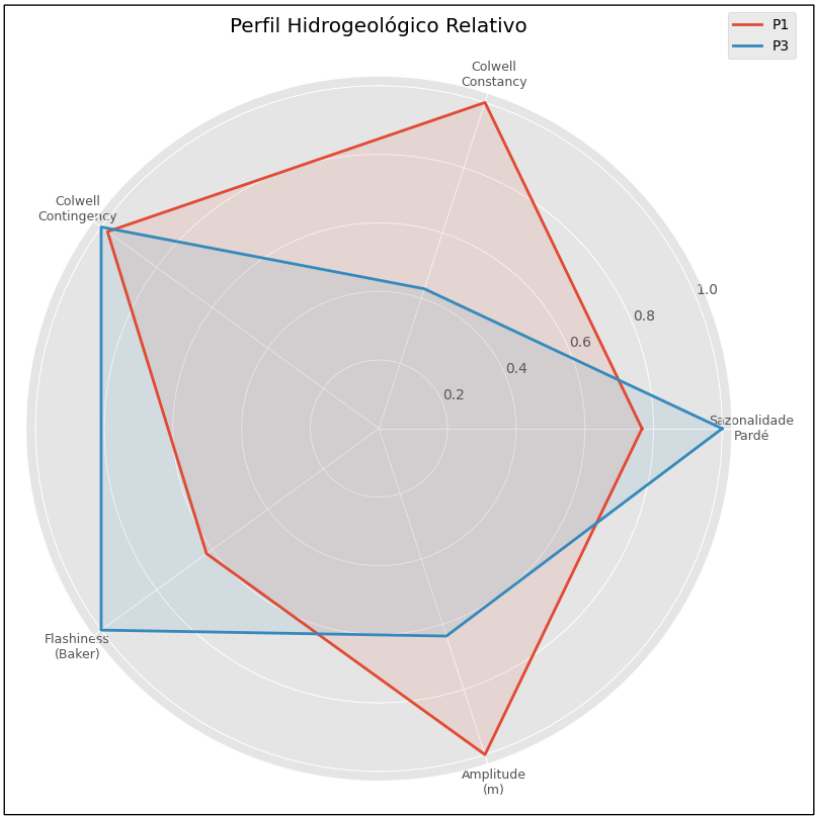


Figura 3: Perfil hidrogeológico relativo baseado nos índices calculados

O Poço P3 destaca-se como o sistema de resposta mais rápida e dinâmica. Apresenta o maior índice de *Flashiness* (0,058) e a maior *Sazonalidade* (1,67). A correlação visual na Figura 1 demonstra que picos de precipitação resultam em elevações quase imediatas do nível freático, seguidas de recessões rápidas. O comportamento do P3, com alto Flashiness e Sazonalidade, mas baixa amplitude, sugere um sistema fraturado com baixa inércia e rápida resposta a eventos de recarga local,

possivelmente associado a um compartimento isolado de volume finito associado à baixa transmissividade global do maciço rochoso neste ponto.

Em contraste, o Poço P1 representa um sistema inercial. Apesar de possuir a maior amplitude de oscilação (1,21 m), seu índice de *Flashiness* é menor (0,036). O hidrograma exibe curvas mais suaves de subida e descida, filtrando os eventos de chuva diários. Tal comportamento indica um efeito de retardamento (*lag time*), típico de aquíferos com zona não saturada espessa ou maior capacidade de armazenamento, onde o fluxo é dominado pela difusividade hidráulica do meio poroso (solo) e não apenas pela recarga vertical direta.

Essa diferença pode ser observada por exemplo em um dos eventos monitorados, conforme mostra a Figura 4:

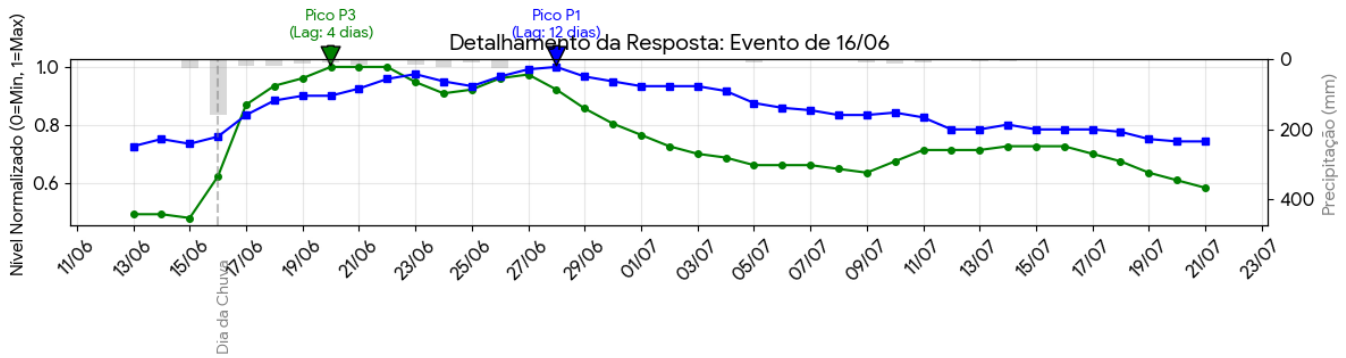


Figura 4: Resposta dos níveis do poço 1 e poço 3 para um dos eventos de chuva monitorados

Ao analisar o evento de recarga em detalhe (Figura 4), observa-se que a resposta do Poço P3, embora rápida, não é instantânea, apresentando um atraso (*lag time*) de aproximadamente 4 dias entre o pico pluviométrico e o nível máximo. Já o Poço P1 exibe uma inércia maior, com um atraso de 12 dias, corroborando a hipótese de um fluxo amortecido por uma zona não saturada mais espessa ou de menor condutividade.

A análise conjunta dos índices de séries temporais e dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em testes de bombeamento revela que a resposta dos aquíferos à precipitação é governada por mecanismos físicos distintos em cada localidade. A heterogeneidade observada nos índices de *Flashiness* (I_{RB}) e Sazonalidade (P_s) não reflete apenas a permeabilidade do meio, mas a interação complexa entre a profundidade do Nível Estático (NE), a Transmissividade (T) e a capacidade de armazenamento.

O comportamento do Poço P1 (Boca da Serra) confirma o modelo clássico de fluxo em meio poroso com zona não saturada espessa. Com um nível de água mais profundo e Transmissividade baixa (0,022 m²/h), este sistema atua como um filtro passa-baixa (Gelhar, 1974; Baulon et al., 2022) eficiente, ou seja, possui capacidade natural de suavizar ou remover flutuações rápidas (alta frequência) em parâmetros como o nível de água pelo solo antes que a água atinja as fraturas do sistema aquífero. O baixo índice de *Flashiness* (0,036) pode ser consequência direta da espessura da zona não saturada, que retarda a chegada da frente de umidade. A alta amplitude sazonal (1,21 m), paradoxalmente associada a uma baixa transmissividade, explica-se pela baixa capacidade específica (0,038 m³/h/m) sendo que em meios de baixa produtividade, pequenos volumes de recarga resultam em variações expressivas de carga hidráulica, uma vez que a dissipação lateral do fluxo é lenta. Deve-se considerar que a entrada de água de 30m deve ter baixa contribuição, pois o nível estático fica um pouco acima dela. Dessa forma, essa entrada de água pode ter relação com a resposta a recarga, mas não com a produtividade, ficando a entrada de água mais profunda como a principal que poderia estar associado a esse atraso na resposta.

O Poço P3 (Caravaggio) apresenta o caso mais crítico de interpretação. Inicialmente, seu alto *Flashiness* (0,058) e resposta rápida (4 dias) sugeriam um aquífero de alta permeabilidade. Contudo, os dados físicos revelam uma Transmissividade baixa (0,004 m²/h) e vazão reduzida. A resposta rápida deste poço pode estar associada à combinação de um NE muito raso (3,0 m) com uma capacidade de armazenamento quase nula. O sistema de fratura não possui espaço suficiente para acomodar a recarga; assim, a entrada de água pela fratura mais rasa a 36 m provoca uma elevação instantânea da pressão (efeito pistão em meio confinado/fraturado), seguida de uma recessão rápida por falta de sustentação de fluxo de base. Portanto, o P3 é pouco produtivo, visto que o aquífero fraturado deve ser caracterizado pela ocorrência de poucas estruturas que não têm grande continuidade lateral ou apresentam baixo grau de conexão. Nesse poço a entrada de água de 36m deve ser a principal, mas possui muito baixa transmissividade. No entanto deve ter mais conexão com outras estruturas mais superficiais, por isso responde mais rapidamente à recarga, mas como deve ser uma região de menor grau de fraturamento ou com estruturas de menor porte, não tem muita capacidade de produzir água. Outro ponto é que esse poço está localizado próximo a drenagens e essas estruturas mais rasas podem ter ligação com a drenagem.

Referente ao regime estacional e à sensibilidade climática (Índice de Pardé), os poços apresentaram índices de Sazonalidade de Pardé elevados (1,27 < P_S < 1,67), quando comparados a médias de aquíferos em climas temperados, que frequentemente orbitam entre 0,5 e 1,0 (Heudorfer et al., 2019). Valores acima de 1,2 indicam um regime fortemente estacional, típico de regiões tropicais ou monçônicas com estações seca e chuvosa bem definidas. Isso indica que, independentemente da profundidade ou transmissividade, todo o sistema aquífero é governado pelo ciclo hidrológico anual. O valor máximo observado

no Poço P3 reflete sua incapacidade de manter reservas de base. Com Transmissividade e capacidade específica baixas, este aquífero pode exaurir na estiagem e saturar-se rapidamente durante as chuvas.

Em relação à Previsibilidade e Memória do Aquífero (Índices de Colwell), os poços possuem Baixa Constância indicando que nenhum dos poços funciona como um reservatório estático. A baixa constância confirma que são sistemas ativos, com recarga e descarga contínuas. Possuem também Contingência Moderada (~ 0,40), valor indicativo de que os poços têm "memória sazonal", mas não são determinísticos. Existe uma correlação clara entre a época do ano e o nível (sabe-se que subirá no inverno), mas a magnitude dessa subida varia anualmente dependendo do volume precipitado.

A relação entre a Amplitude (variação vertical máxima) e o número de Pulsos de Cheia (frequência de picos) revela a geometria dos vazios do aquífero. O poço P1 com 1,21 m de amplitude, mas apenas 2 pulsos de cheia, funciona como um reservatório de baixa condutividade. A água entra devagar (zona não saturada espessa) e, como a saída é restrita (T baixa), o nível sobe, ou seja, acumula carga hidráulica. Em contrapartida, o poço P3, com 4 pulsos de cheia, mas a menor amplitude (0,77 m), mostra que não consegue armazenar água. Ele enche rápido (pulso), porém perde água imediatamente devido ao seu baixo volume de armazenamento efetivo. Ele reage a qualquer chuva, mas não consegue converter essa chuva em ganho sustentado de nível (carga).

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos:

Tabela 3 – Síntese dos resultados e mecanismos hidrogeológicos predominante

Poço	Diagnóstico dos Índices	Parâmetros Físicos Chave	Mecanismo Hidrogeológico Predominante
P1	**Inercial de Alta Amplitude** (Baixo Flashiness, Alta Amplitude)	Nível mais profundo Baixa T	**Efeito de Retardamento:** Zona não saturada atua como filtro. Baixa permeabilidade causa grandes variações de carga (sobe mesmo com pouca água).
P3	**Raso Vulnerável** (Máx. Flashiness, Máx. Pulsos)	Nível mais Raso Transmissividade Mínima	**Baixo Armazenamento:** Saturação rápida ("efeito pistão") e exaustão rápida. Altamente dependente da chuva recente.

Considerações Finais

A aplicação de índices de dinâmica de séries temporais aos poços do Sistema Aquífero Serra Geral permitiu uma caracterização hidrodinâmica mais refinada do que a simples análise visual de hidrogramas. O estudo confirmou a heterogeneidade típica de meios fraturados, onde poços geograficamente próximos apresentaram assinaturas temporais distintas, refletindo diferentes graus de conectividade hidráulica e mecanismos de recarga.

Destaca-se o comportamento singular do poço P3, cujos índices de alto Flashiness (0,058) e alta Sazonalidade (1,67), contrapostos a uma baixa Constância (0,06), indicam um sistema de resposta rápida e baixa memória hidráulica. Isso sugere uma conexão eficiente com a superfície, provavelmente via fraturas verticais. Em contraste, o outro poço apresentou maior amortecimento, indicando fluxo por sistemas de fraturas com maior armazenamento.

A metodologia baseada no framework de Heudorfer et al. (2019) mostrou-se robusta para regionalização de comportamentos em aquíferos fraturados. Recomenda-se, para estudos futuros, a correlação destes índices com dados estruturais locais e a expansão da janela temporal de análise para capturar ciclos climáticos de longo prazo, como o ENOS, garantindo assim uma gestão hídrica adaptativa e resiliente.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradecemos ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Os Autores também agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul FAPERGS, termo de outorga 23/2551-0000859-9, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO/UFRGS), Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE-Caxias do Sul) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio e recursos recebidos.

Referências Bibliográficas

ABREU, A. S. *et al.* Análise das litologias associadas às entradas de água em poços tubulares no Sistema Aquífero Serra Geral (RS). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 26, n. 108, p. 133-148, dez. 2025.

ALLEY, W. M. *et al.* Flow and Storage in Groundwater Systems. **Science**, v. 296, n. 5575, p. 1985-1990, 2002.

BAKER, D. B. *et al.* A new flashiness index: characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 2, p. 503-522, 2004.

BAULON, L. *et al.* Influence of low-frequency variability on high and low groundwater levels: example of aquifers in the Paris Basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 26, n. 11, p. 2829–2854, 2022.

BLOOMFIELD, J. P.; MARCHANT, B. P. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 4769–4787, 2013.

BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R.; LEÃO, M. I.; SCHNEIDER, V. E. Relação entre padrões Hidroquímicos e as profundidades de fraturas com entradas de água em rochas vulcânicas ácidas da Formação Serra Geral. Revista Águas Subterrâneas, v. 30, n.1, p 99-108. 2016.

COLWELL, R. K. Predictability, constancy, and contingency of periodic phenomena. **Ecology**, v. 55, n. 5, p. 1148-1153, 1974.

CUTHBERT, M. O. *et al.* Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. **Nature Climate Change**, v. 9, p. 137–141, 2019.

DE VARGAS, T; BOFF, F. E. ; BELLADONA, R. ; FACCIONI, L. F. ; REGINATO, P. A. R. ; CARLOS, F. S. . Influence of geological discontinuities on the groundwater flow of the Serra Geral Fractured Aquifer System. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 18, p. 1-14, 2022. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100780.

FREITAS, M.A. DE; BINOTTO, R.B.; NANNI, A.S; RODRIGUES, A.L.M.; BORTOLI, C.R. Avaliação do potencial hidrogeológico, vulnerabilidade intrínseca e hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral no Noroeste do RS. Revista Brasileira de Recursos Hídricos.v.17, n.2, p.31-41,, 2012.

GELHAR, L. W. Stochastic analysis of phreatic aquifers. **Water Resources Research**, v. 10, n. 3, p. 539–545, 1974.

GLEESON, T. *et al.* Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. **Nature**, v. 488, p. 197-200, 2012.

HEUDORFER, B. *et al.* Index-based characterization and quantification of groundwater dynamics. **Water Resources Research**, v. 55, p. 5575-5592, 2019.

PARDÉ, M. (1933). Fleuves et Rivières. Armand Colin, Paris.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização Hidrogeológica e Potencialidades dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS,13., 2004. Anais [...].p.1-9. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23398/15487. Acesso em: 2 jan. 2026.

SANFERARI, A; REGINATO, P.A.R.; QUILLFELDT, S.D. O contato entre derrames vulcânicos como condicionante da ocorrência e da produtividade de aquíferos fraturados. Revista Águas Subterrâneas.v.36, n.2, e-30137, p. 1-17, 2022.

SCANLON, B. R. *et al.* Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 3335-3370, 2006.

SOUZA, M. E. R. Variação do Nível de Água e Métodos de Recarga no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG): Estudo de uma Bacia Hidrográfica Experimental Localizada no munícipio de Caxias do Sul, RS. 2022. 107f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022

TAYLOR, R. G. *et al.* Ground water and climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 322-329, 2013.

ANÁLISE ESPACIAL DE VARIÁVEIS CONDICIONANTES À RECARGA AQUÍFERA NO DISTRITO FEDERAL COMO BASE PARA MODELAGEM MULTICRITÉRIO AHP

1 Pedro Silva de Souza, 2 Rejane Ennes Cicerelli,
1 Universidade de Brasília, e-mail: pedrosilva.civil@gmail.com; 2 Universidade de Brasília, e-mail: rejaneig@unb.br

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Análise Multicritério - AHP, Recarga de aquíferos.

Resumo

A crescente pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos, intensificada pela expansão urbana e pelas mudanças nas condições ambientais, tem ampliado a necessidade de identificar e proteger áreas estratégicas de recarga aquífera. No Distrito Federal, onde parte significativa do abastecimento depende desses sistemas, a limitação de informações hidrogeológicas espacialmente detalhadas dificulta o planejamento e a gestão sustentável da água. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo analisar espacialmente as variáveis condicionantes a recarga de aquíferos, sendo estas físicas, hidrológicas e antrópicas, estabelecendo uma base estruturada para aplicação do método de Análise Hierárquica de Processos (AHP). Foram utilizados dados de geologia, pedologia, hidrogeologia, precipitação, uso e cobertura do solo e modelo digital de elevação, a partir do qual foram derivados parâmetros como declividade, além de variáveis integradas, como a classificação hidrológica dos solos e os coeficientes de Curve Number. Os dados foram obtidos de bases institucionais oficiais e submetidos a procedimentos de padronização, reclassificação e normalização, garantindo consistência espacial entre as camadas. Os resultados preliminares indicam coerência entre os fatores analisados, evidenciando que áreas com menor declividade, maior permeabilidade dos solos e menor interferência antrópica apresentam maior potencial de infiltração, enquanto regiões urbanizadas tendem a favorecer o escoamento superficial. A metodologia proposta permite a organização e integração de dados ambientais de forma sistemática, constituindo uma base consistente para a etapa subsequente de aplicação do AHP, na qual serão atribuídos pesos aos critérios com base em julgamento de especialistas. Espera-se que a consolidação do modelo multicritério contribua para a identificação de áreas prioritárias para recarga aquífera, fornecendo subsídios ao planejamento territorial e à gestão sustentável dos recursos hídricos, além de apresentar potencial de replicação em outras regiões do bioma Cerrado.

Introdução

Problemas relacionados à disponibilidade hídrica, incluindo escassez, conflitos de uso do solo e eventos extremos, representam desafios crescentes para a sociedade contemporânea (SERAPHIM, 2019). No Brasil, o tema é particularmente relevante, uma vez que uma parcela significativa dos municípios depende das águas subterrâneas para o abastecimento público, enquanto os dados hidrogeológicos disponíveis ainda apresentam limitações quanto à resolução espacial, comprometendo a efetividade das políticas públicas (ANA, 2022; ADASA, 2023).

A crescente pressão sobre os sistemas de água subterrânea, impulsionada pela crise climática e pela exploração insustentável de recursos naturais, tem ampliado os desafios relacionados à identificação e à proteção de áreas estratégicas de recarga de aquíferos (TAYLOR et al., 2013). Nesse contexto, a compreensão dos processos hidrológicos torna-se essencial para subsidiar respostas técnicas e estratégias de gestão frente a essas questões.

No contexto brasileiro, essa problemática assume maior relevância, uma vez que uma parcela significativa dos municípios depende das águas subterrâneas para o abastecimento público. Entretanto, apesar dessa dependência, as informações hidrogeológicas disponíveis ainda apresentam limitações quanto à resolução espacial, o que dificulta a elaboração e a implementação de políticas públicas mais eficazes (ANA, 2022).

Os efeitos da recarga raramente se restringem a uma escala local. Os fluxos subterrâneos tendem a se deslocar ao longo da bacia hidrográfica e emergem em áreas de menor energia, como nascentes, lagos e cursos d'água. Em determinadas condições regionais, esses processos podem ultrapassar limites político-administrativos, inclusive em escala interestadual ou nacional, o que amplia os desafios associados à pesquisa e à gestão integrada dos recursos hídricos.

A disponibilidade hídrica resulta do encadeamento de diversos processos naturais, entre os quais se destaca a recarga das águas subterrâneas. Esse processo apresenta relevância particular por exercer um papel duplo, contribuindo diretamente para a renovação e o potencial das reservas aquíferas e sustentando a manutenção das vazões superficiais, especialmente durante períodos de estiagem, garantindo a perenidade de rios e nascentes (SERAPHIM, 2018).

O bioma Cerrado exemplifica de forma expressiva esse contexto. Seus solos, em grande parte profundos e relativamente permeáveis, aliados a condições ambientais específicas, favorecem a infiltração e a percolação da água precipitada. Considerando sua ampla extensão territorial e sua posição estratégica no Planalto Central, o Cerrado desempenha função fundamental como área de recarga, contribuindo significativamente para a manutenção da vazão de base de importantes sistemas fluviais brasileiros.

Estima-se que uma parcela relevante da demanda de água do Distrito Federal seja suprida por aquíferos, com destaque para o Sistema Aquífero Paranoá, principal reservatório subterrâneo da região (ADASA, 2023; BRASIL, 2021). Entretanto, a intensificação do processo de urbanização nas últimas décadas tem provocado alterações significativas no balanço hídrico, sobretudo em razão da impermeabilização do solo e da expansão desordenada de áreas urbanas, o que compromete diretamente os processos naturais de infiltração e recarga.

No Distrito Federal, essa heterogeneidade dos usos da terra assume particular relevância em função de sua inserção em uma região de nascentes e divisores de águas, onde os cursos d'água apresentam baixa capacidade de armazenamento superficial e forte dependência do aporte subterrâneo para a manutenção das vazões de base. Os aquíferos locais, associados principalmente a formações fraturadas e porosas, exercem papel fundamental na sustentação hidrológica das bacias distritais, reforçando a importância da recarga natural como elemento-chave para a segurança hídrica regional (CPRM, 2021; ADASA, 2023)

A situação do Lago Paranoá no Distrito Federal ilustra de forma expressiva as consequências da ocupação urbana sobre os sistemas hídricos regionais, uma vez que as bacias contribuintes funcionam como vetores de transporte de poluentes e sedimentos, intensificando conflitos de uso da água e pressionando tanto os mananciais superficiais quanto os subterrâneos (SERAPHIM, 2018).

O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) integrado ao método de Análise Hierárquica de Processos (AHP) tem sido amplamente empregado no delineamento de zonas potenciais de risco, de inundação e de recarga de aquíferos, sendo recorrente na literatura científica recente. O método AHP foi desenvolvido como um modelo de tomada de decisão multinível, aplicável em diferentes contextos, como gestão organizacional, engenharia e planejamento estratégico. Sua estrutura permite a comparação de alternativas com base em múltiplos critérios, em um processo sistemático que amplia a capacidade analítica e a robustez na tomada de decisões complexas.

Especificamente para o DF, estudos como o de Santos (2016) avaliou a variabilidade espacial de recarga aplicando o método AHP-SIG para distribuição dos fatores que influenciam no processo de recarga na bacia do córrego do capão cumprido, considerando critérios como altimetria, solos, geologia, pluviometria e profundidade do lençol freático, O autor verificou que a recarga apresenta forte relação com as características do solo, cobertura vegetal e regime de precipitação, evidenciando a complexidade dos mecanismos de infiltração e percolação em sistemas típicos do Cerrado. Esses resultados reforçam a relevância de abordagens integradas para a análise da recarga, considerando a interação entre variáveis físicas e hidrológicas em diferentes escalas espaciais.

Diante desse contexto, este trabalho parte da hipótese de que a integração de variáveis físicas, hidrológicas e antrópicas, por meio de uma abordagem multicritério baseada no método AHP em ambiente SIG, é capaz de discriminar espacialmente, de forma consistente, as áreas mais favoráveis à recarga aquífera no Distrito Federal, refletindo padrões coerentes com a dinâmica hidrogeológica regional. O objetivo deste trabalho consiste em padronizar os dados ou camadas temáticas que posteriormente serão analisados e modelados a favorabilidade espacial à recarga de aquíferos no Distrito Federal, utilizando uma abordagem multicritério AHP em ambiente SIG, com o intuito de identificar e hierarquizar áreas com diferentes níveis de potencial de recarga.

Materiais e métodos

A área de estudo definida para o trabalho é limite geográfico do Distrito Federal, situado no planalto central do país e inserido no bioma Cerrado, local com grande importância hidrográfica pois funciona como divisor de águas das nascentes de importantes bacias como a do Rio São Francisco, Rio Tocantins/Araguaia e Rio Paraná. Em contrapartida Brasília-DF possui um histórico recente de ocupação urbana acentuada nos últimos anos e com características complexas e heterogêneas considerando os 33 núcleos administrativos que compões a região do Distrito Federal.

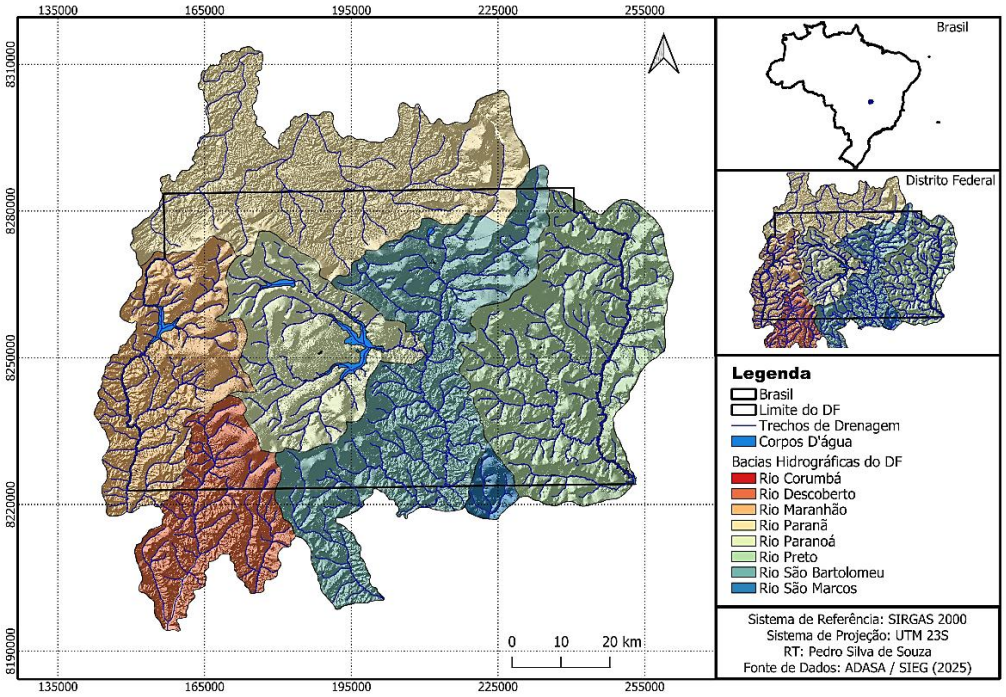


Figura 1 : Localização da área de estudo.
Fonte: Elaborado pelos autores.

A região do Distrito Federal se divide em sete bacias hidrográficas (Figura 1), integrantes de três regiões hidrográficas. A bacia do Rio Preto pertence à região hidrográfica do São Francisco, já a bacia do Rio Maranhão pertence à região hidrográfica do Tocantins/Araguaia. Enquanto as bacias dos rios São Bartolomeu, Descoberto, Corumbá, São Marcos e Paranoá que possui maior aérea diretamente afetada pela urbanização de Brasília integram a região hidrográfica do Paraná.

A coleta de dados geoespaciais, em formato vetorial e raster, para confecção dos fatores temáticos utilizados neste trabalho, se deu através de banco de dados online. As informações referentes a estes dados estão sintetizadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Conjunto de dados utilizados como camadas temáticas para o método AHP.

Dado	Fonte	Formato	Ano	Resolução/Escala	Finalidade
Pedologia	CODEPLAN / IPE-DF (Atlas DF)	Vetorial	2020	1:100.000	Avaliação da capacidade de infiltração
Geologia	CODEPLAN / IPE-DF (Atlas DF)	Vetorial	2020	1:100.000	Identificação de litologias permeáveis
Geomorfologia	CODEPLAN / IPE-DF (Atlas DF)	Vetorial	2020	1:100.000	Análise das formas de relevo
Hidrogeologia	CODEPLAN / IPE-DF (Atlas DF)	Vetorial	2020	1:100.000	Caracterização hidrogeológica
Modelo digital de Elevação (MDE)	GEDTM30	Raster	2025	30 metros	Extração de declividade e variáveis topográficas
Precipitação Média Histórica	CODEPLAN / IPE-DF (Atlas DF)	Vetorial	2020	250 metros	Estimativa do volume potencial de recarga
Uso e Ocupação do Solo	SISDIA / SEMMA-DF	Vetorial	2023	5 metros	Avaliação da influência antrópica

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados referentes à classificação dos solos do Distrito Federal foram obtidos junto à CODEPLAN, por meio do catálogo de mapas do IPE-DF, utilizando bases cartográficas temáticas oficiais disponibilizadas em formato vetorial (Figura 2 - A). Essas informações derivam de levantamentos pedológicos realizados a partir de trabalhos de campo, análises laboratoriais e interpretação de imagens, posteriormente sistematizados em mapas compatíveis com escalas regionais, permitindo a caracterização das propriedades físicas e hidrológicas dos solos.

As informações geológicas utilizadas no estudo foram obtidas a partir da base temática de geologia do Distrito Federal, disponibilizada pela CODEPLAN e pelo IPE-DF, em formato digital georreferenciado (Figura 2 - B). Esses dados são oriundos de mapeamentos geológicos regionais elaborados com base em levantamentos de campo, análises litológicas e interpretação estrutural, contemplando a formação genética e deposicional das rochas que constituem os domínios fraturados e porosos dos sistemas aquíferos do DF.

As características hidrogeológicas foram obtidas a partir de mapeamentos oficiais disponibilizados pela CODEPLAN e pelo IPE-DF, os quais descrevem os principais domínios hidrogeológicos do Distrito Federal (Figura 2 - C). Esses mapeamentos resultam da integração de informações geológicas, estruturais e hidrodinâmicas, incluindo a caracterização de aquíferos fraturados e porosos, além da análise de parâmetros como permeabilidade, armazenamento e circulação das águas subterrâneas, permitindo compreender o comportamento dos fluxos subterrâneos e sua relação com os processos de recarga aquífera.

A precipitação média anual acumulada foi obtida a partir do Atlas do Distrito Federal, elaborado pela CODEPLAN em conjunto com o IPE-DF (Figura 2 - D). Essas informações resultam da consolidação de séries históricas de precipitação, com dados provenientes de 16 estações da CAESB e 1 estação da EMBRAPA, abrangendo um período de 38 anos, entre 1979 e 2017, tratados estatisticamente para representar padrões médios regionais.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) (Figura 2 - E) empregado neste estudo foi obtido a partir do produto GEDTM30 (2025), disponibilizado pela plataforma OpenLandMap, que apresenta resolução espacial de 30 metros e é adequado para aplicações ambientais, geomorfológicas e hidrológicas em escala regional. O conjunto de dados consiste em uma superfície raster contínua, contendo valores altimétricos expressos em metros, permitindo a derivação de variáveis topográficas relevantes para análises espaciais. O MDE foi submetido a procedimentos de recorte da área de estudo, reprojeção cartográfica e correção hidrológica no ambiente do QGIS, com o objetivo de garantir compatibilidade entre as bases utilizadas e maior consistência nos processamentos subsequentes.

O mapa de uso e cobertura do solo do Distrito Federal de 2023 (Figura 2 - F), elaborado pela SEMA-DF, foi produzido por meio da plataforma Google Earth Engine, que permite o processamento e análise de grandes volumes de imagens de satélite. Para sua elaboração, foi utilizado um mosaico de imagens do satélite Planet, com resolução espacial de 4,77 m, referente ao mês de maio de 2023, possibilitando a identificação detalhada das classes de uso e cobertura do solo em escala compatível com análises regionais.

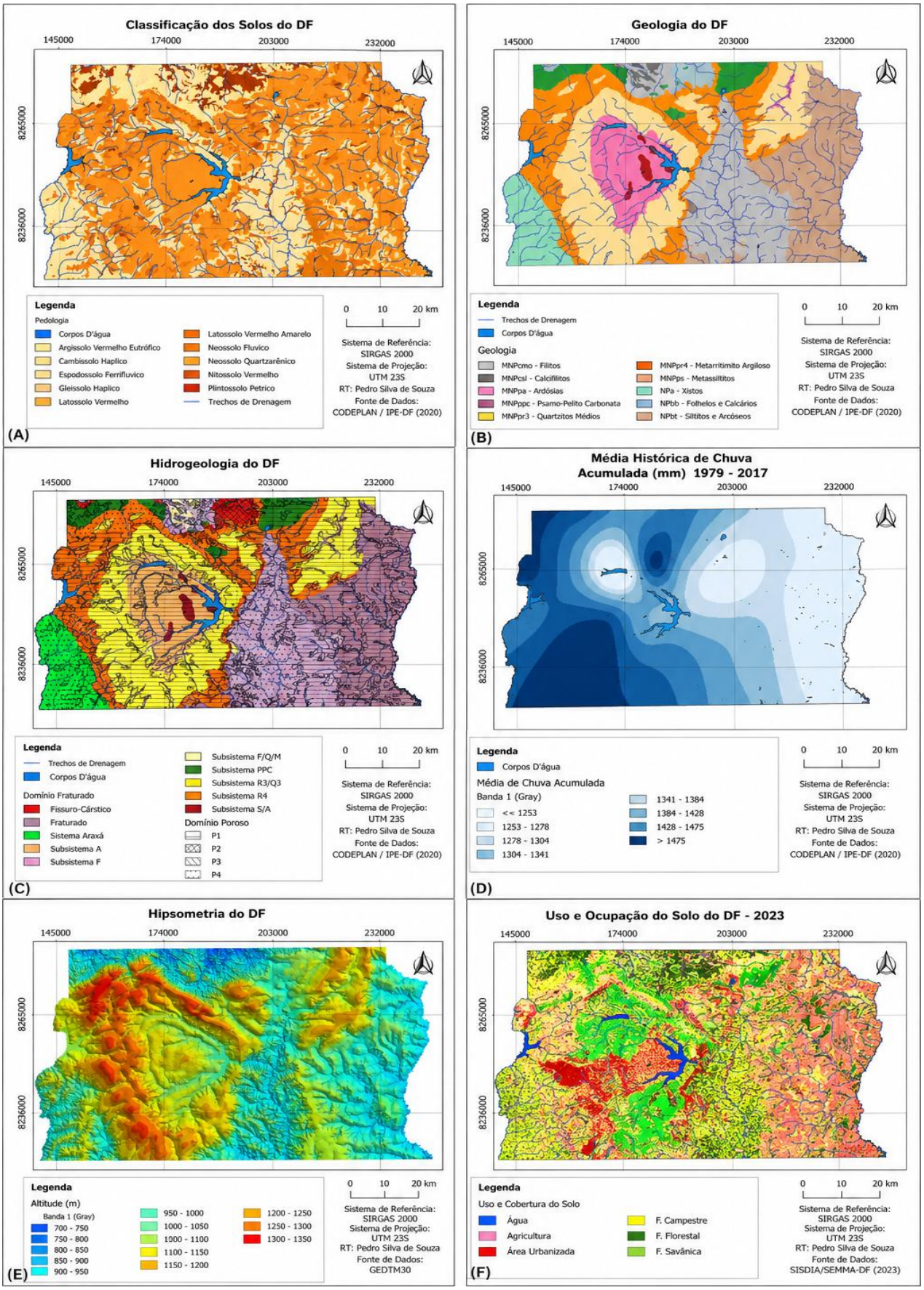


Figura 2 - Mapas temáticos do banco de dados: (a) Classificação dos Solos do DF; (b) Geologia do DF; (c) Hidrogeologia do DF; (d) Precipitação média acumulada do DF; (e) MDE do DF; (f) Uso e Ocupação do solo do DF. Fonte: Elaborado pelos autores.

A integração dessas diferentes bases de dados, provenientes de fontes institucionais consolidadas, possibilita a construção de um conjunto de informações espaciais consistente e confiável para a análise proposta. A combinação de variáveis pedológicas, geológicas, geomorfológicas, climáticas e antrópicas permite uma abordagem integrada dos processos que condicionam a recarga aquífera, contribuindo para uma representação mais fiel da dinâmica ambiental do Distrito Federal e fornecendo suporte técnico adequado para as etapas subsequentes da modelagem multicritério.

Pré-processamento dos dados

O MDE foi inicialmente submetido a procedimentos de pré-processamento em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, incluindo reprojeção para o sistema de coordenadas UTM, datum SIRGAS 2000, zona 23S, e recorte à área de estudo. A partir do MDE corrigido e padronizado, realizou-se o cálculo da declividade do terreno, expressa em porcentagem (%), utilizando ferramentas específicas de análise de relevo disponíveis no software QGIS. Após a obtenção do mapa de declividade (Figura 3), foi posteriormente reclassificado segundo os intervalos propostos pela EMBRAPA, amplamente utilizados em estudos ambientais e de planejamento territorial no Brasil.

O mapa de Grupo Hidrológico do Solo, Hydrologic Soil Group (HSG), foi elaborado com base na classificação hidrológica dos solos para condições brasileiras, conforme sistematização apresentada por estudos nacionais recentes. Essa classificação agrupa os solos em quatro classes principais (A, B, C e D), de acordo com sua profundidade efetiva, textura, gradiente textural, drenagem interna e taxa de infiltração, parâmetros diretamente relacionados à geração de escoamento superficial e ao potencial de recarga aquífera.

A geração do mapa de Curve Number (CN), Figura 4, foi elaborado por meio do cruzamento espacial, fazendo uma associação por localização entre o mapa de uso e ocupação do solo e o mapa de grupo hidrológico do solo, ambos em formato vetor e padronizados quanto à resolução espacial e sistema de referência. O uso e ocupação do solo foi representado por classes como formação florestal, formação savânica, formação campestre, agricultura, pastagem, áreas urbanizadas e água, conforme classificação utilizada na pesquisa.

A atribuição dos valores de CN foi realizada por meio de expressão condicional do tipo CASE WHEN, aplicada em ambiente SIG, na qual cada combinação entre classe de uso do solo e grupo hidrológico recebeu o valor correspondente de CN conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de CN para cada tipo de solo e seu uso e cobertura.

TIPO USO	TIPO SOLO				FONTE
	A	B	C	D	
Formação Florestal	**26**	**52**	**62**	**69**	Santos e Lollo, 2016.
Formação Savânica	**46**	**68**	**78**	**84**	Santos e Lollo, 2016.
Formação Campestre	**56**	**75**	**86**	**91**	Santos e Lollo, 2016.
Pastagem	**25**	**59**	**75**	**83**	Soares et al, 2017.
Agricultura	**62**	**71**	**78**	**81**	Soares et al, 2017.
Área Urbanizada	**77**	**85**	**90**	**92**	Soares et al, 2017.
Água		**100**			Soares et al, 2017.
Solo Exposto	**72**	**82**	**87**	**89**	Rezende et al, 2018.

Esse procedimento seguiu exatamente a lógica apresentada no arquivo utilizado pelo autor, no qual são explicitadas todas as combinações possíveis entre classes de uso e grupos hidrológicos, assegurando rastreabilidade e consistência metodológica. Como resultado, obteve-se um vetor de Curve Number para toda a área de estudo, representando espacialmente o potencial de geração de escoamento superficial e, de forma indireta, o potencial de infiltração e recarga aquífera.

Aplicação do Método AHP – Etapas Subsequentes

A etapa subsequente da pesquisa consistirá na aplicação do método AHP, com o objetivo de atribuir pesos relativos aos critérios temáticos previamente definidos e viabilizar a integração das variáveis em um modelo multicritério espacial.

A estrutura metodológica da AHP organiza os elementos do problema em níveis hierárquicos sucessivos, partindo de um objetivo principal e avançando para critérios, subcritérios e alternativas. A construção dessa hierarquia exige a definição clara dos componentes relevantes do problema, a compreensão do contexto em que está inserido e a identificação dos atributos que contribuem para a solução proposta. Esse arranjo hierárquico facilita a visualização das relações entre os fatores envolvidos, além de auxiliar o tomador de decisão na comparação entre elementos de mesma natureza e magnitude.

Após a definição da hierarquia, procede-se à comparação gradual das alternativas em relação aos elementos do nível imediatamente superior. Com base nesses julgamentos, são calculadas prioridades relativas para cada componente do modelo.

Para a realização dos julgamentos no método AHP utiliza-se a escala proposta por Thomas L. Saaty (1990), composta por valores de 1 a 9. Esses valores representam o grau de importância de um critério em relação a outro, sendo associados a descrições qualitativas que auxiliam na atribuição dos pesos.

Com base nessa escala, elabora-se uma matriz de comparação par a par entre as variáveis analisadas, definindo suas importâncias relativas. Essa matriz possui forma quadrada e valores recíprocos, enquanto os elementos da diagonal principal são iguais a 1, pois cada critério comparado consigo mesmo apresenta igual importância (SOARES REZENDE et al., 2017). A partir dessa estrutura, são calculados os pesos normalizados e a consistência dos julgamentos.

Inicialmente, será realizada a coleta de dados por meio de questionários estruturados aplicados a especialistas das áreas de hidrogeologia, geoprocessamento e gestão de recursos hídricos. Os participantes serão selecionados com base em sua experiência técnica e atuação acadêmica e profissional, de modo a garantir a qualidade e a consistência dos julgamentos. Os questionários serão elaborados com base na escala fundamental proposta por Saaty (1990), conforme a Tabela 2, permitindo a comparação pareada entre os critérios considerados na análise, a saber: geologia, pedologia, hidrogeologia, declividade, precipitação, uso e cobertura do solo e CN.

Tabela 2 – Escala fundamental de Saaty para comparações pareadas em AHP.

Valores	Importância Mútua	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra, sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Saaty (1990).

Posterior a comparação pareada dos critérios, faz-se o cálculo da matriz normalizada, pelo somatório dos elementos de cada coluna e divisão de cada elemento da coluna pela respectiva somatória. Dessa forma, são calculados os pesos relativos para cada critério, os quais correspondem às médias das linhas da matriz normalizada (SAATY, 1990; CARVALHO, 2017).

Tabela 3 - Exemplo de matriz de comparação pareada.

Critérios	C1	C2	C3	C4
C1	1	3	5	7
C2	1/3	1	3	1/3
C3	1/5	1/3	1	1/5
C4	1/7	3	5	1

Fonte: Soares Rezende et al. (2017).

Dessa forma, realizam-se a determinação da importância relativa de cada critério e a validação da consistência destas operações. Se o índice de consistência for igual ou inferior a 0,1, dependendo do número de critérios utilizados, significa que existe coerência na comparação par a par, porém, se for maior, recomenda-se que os julgamentos sejam refeitos até que a consistência aumente (SAATY, 1980; MEDEIROS, 2022). O Índice de Consistência (*IC*) é definido a partir de:

$$IC = \frac{\lambda max - n}{n-1} \qquad (01)$$

Onde: λmax é o autovalor, n é a dimensão da matriz.

Saaty (1990), conclui-se o AHP com a avaliação da razão de consistência (RC), que relaciona o Índice de Consistência em relação ao Índice Randômico, que varia com o tamanho "n" da amostra, conforme a razão:

$$RC = \frac{IC}{IR} \qquad (02)$$

Onde: IC é o índice de consistência;

Os valores de IR foram determinados em laboratório, para matrizes de ordem 1° a 15° ordem, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Índice randômico AHP.

Nº Ordens	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º	13º	14º	15º
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1990).

As matrizes de comparação pareada obtidas a partir das respostas dos especialistas serão submetidas à verificação da Razão de Consistência (RC), sendo consideradas válidas aquelas com valores inferiores ou iguais a 0,10. As matrizes que não atenderem a esse critério serão revisadas ou descartadas, assegurando a coerência dos julgamentos.

Posteriormente, as matrizes individuais consistentes serão agregadas por meio da média geométrica, resultando em uma matriz de consenso. A partir dessa matriz, será calculado o autovetor principal, responsável por determinar os pesos finais de cada critério no modelo multicritério.

Com os pesos definidos, será realizada a integração das camadas temáticas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, por meio da técnica de combinação linear ponderada. Cada mapa temático será previamente reclassificado em classes de favorabilidade à recarga aquífera, com valores normalizados em uma escala comum, permitindo sua integração no modelo.

O resultado dessa etapa será a geração de um mapa contínuo de favorabilidade à recarga de aquíferos no Distrito Federal, posteriormente classificado em categorias qualitativas, como muito baixa, baixa, média, alta e muito alta favorabilidade. Esse produto permitirá a análise espacial das áreas prioritárias para recarga e servirá como base para a interpretação dos processos hidrológicos e para a proposição de diretrizes de planejamento territorial.

Adicionalmente, será realizada uma análise de sensibilidade dos pesos atribuídos, com o objetivo de avaliar a influência relativa de cada critério no resultado final e identificar possíveis fontes de incerteza associadas ao modelo.

O método AHP tem sido amplamente utilizado em pesquisas desenvolvidas no Brasil e no exterior, especialmente em estudos que envolvem análises espaciais semelhantes às propostas neste trabalho, razão pela qual também foi adotado nesta pesquisa. Em ambiente SIG essa metodologia pode ser aplicada de forma integrada à lógica Booleana, na qual os critérios são convertidos para valores binários (0 ou 1). Essa abordagem é mais frequente em situações de caráter restritivo ou eliminatório, como na definição de áreas sujeitas a impedimentos legais, uso com restrição ambiental e o uso e cobertura do solo (GONÇALVES, 2007; AQUINO, 2018).

Resultados e discussões

O mapa de declividade evidencia o predomínio de relevo plano a suavemente ondulado no Distrito Federal, representado pelas classes de 0 a 8%, que ocupam extensas porções centrais e setores associados aos interflúvios mais amplos. Essas áreas tendem a apresentar maior estabilidade geomorfológica, menor velocidade de escoamento superficial e melhores condições para infiltração hídrica. Em contrapartida, as classes onduladas a fortemente onduladas (8 a 45%) concentram-se em zonas de transição topográfica, bordas de chapadas e vales encaixados, enquanto as maiores declividades, superiores a 45%, aparecem de forma pontual em escarpas e rupturas de relevo, configurando áreas com maior potencial de escoamento superficial e suscetibilidade a processos erosivos.

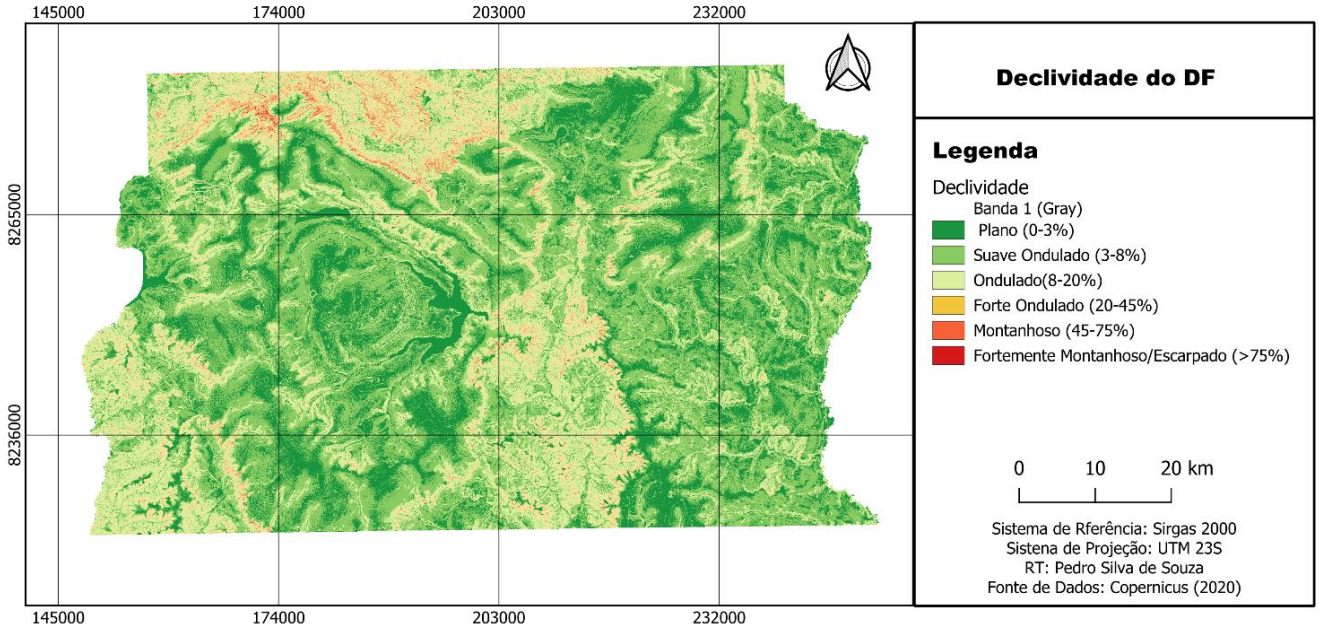


Figura 2 - Mapa de declividade do DF reclassificado.
Fonte: Elaborado pelos autores.

A classificação hidrológica dos solos demonstra a predominância dos grupos B e C no território do Distrito Federal, indicando condições intermediárias de infiltração e resposta hidrológica variável conforme o uso e a cobertura do solo. As áreas classificadas como grupo A, associadas a maior capacidade de infiltração, apresentam distribuição mais restrita, enquanto os solos do grupo D, com menor capacidade de infiltração e maior tendência à geração de escoamento superficial, ocorrem de forma localizada. Essa distribuição evidencia a heterogeneidade do comportamento hidrológico dos solos na região, constituindo um fator relevante para a análise da recarga aquífera.

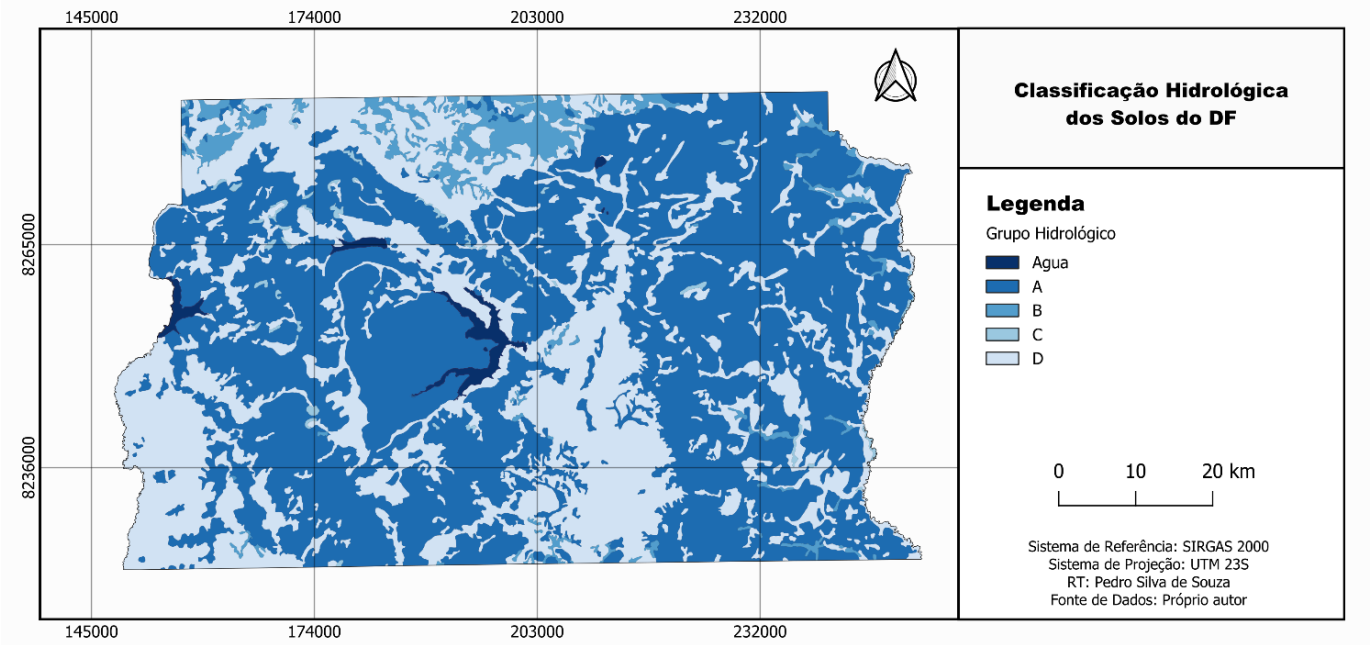


Figura 3 - Classificação hidrológica dos solos (HSG).
Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores de CN obtidos sintetizam a interação entre uso e cobertura do solo e os grupos hidrológicos, permitindo identificar padrões espaciais associados ao potencial de escoamento superficial. As menores classes de CN estão relacionadas a áreas com cobertura vegetal natural, onde predominam melhores condições de infiltração. Já os maiores valores concentram-se em áreas urbanizadas e superfícies impermeabilizadas, indicando maior propensão ao escoamento superficial e menor potencial de recarga. As classes intermediárias refletem áreas com uso antrópico moderado, onde o comportamento hidrológico é condicionado pela combinação entre cobertura do solo e características pedológicas.

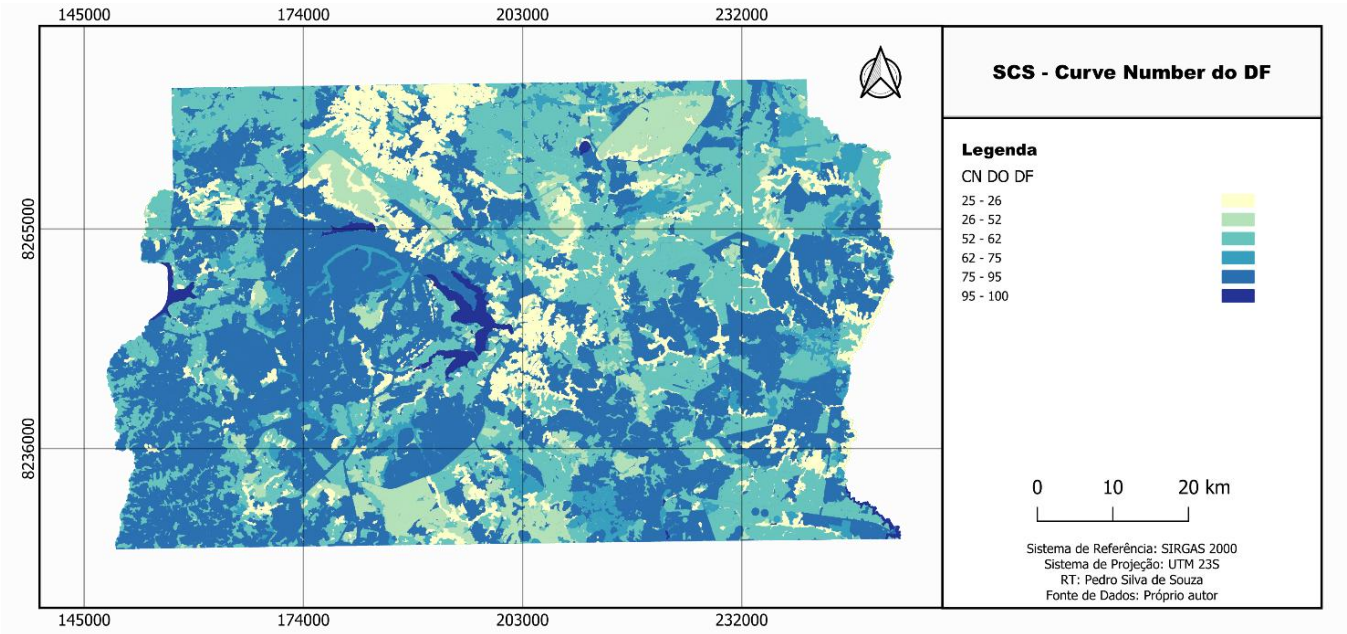


Figura 4 - Mapa de Curve Number do DF.
Fonte: Elaborado pelos autores.

De forma integrada, os produtos intermediários analisados demonstram coerência entre si, evidenciando que áreas com menores declividades, solos mais permeáveis e menor interferência antrópica tendem a apresentar condições mais favoráveis à infiltração, enquanto regiões com maior impermeabilização e relevo mais acentuado indicam maior geração de escoamento superficial. Esses resultados preliminares reforçam a consistência das variáveis selecionadas para compor o modelo multicritério.

Entretanto, até o presente estágio da pesquisa, o método AHP ainda não foi aplicado, uma vez que a etapa de coleta de dados junto a especialistas, necessária para a definição dos pesos dos critérios, encontra-se em desenvolvimento. Dessa forma,

o mapa de favorabilidade à recarga aquífera ainda não foi gerado, sendo os resultados apresentados restritos à análise individual e integrada dos fatores temáticos.

A atribuição dos pesos dos critérios será realizada por meio de questionários estruturados aplicados a especialistas nas áreas de hidrogeologia, geoprocessamento e gestão de recursos hídricos, selecionados com base em sua experiência técnica e atuação acadêmica e profissional. As respostas serão organizadas em matrizes individuais de comparação, as quais serão submetidas à verificação da razão de consistência, sendo aceitas aquelas com valores iguais ou inferiores a 0,10. As matrizes consistentes serão posteriormente agregadas por meio da média geométrica, resultando em uma matriz de consenso representativa do grupo de especialistas. A partir dessa matriz, será calculado o autovetor principal, responsável pela definição dos pesos finais dos critérios, que serão utilizados na etapa de integração multicritério em ambiente SIG.

Considerações Finais

O presente estudo permitiu estruturar e integrar um conjunto de variáveis físicas, hidrológicas e antrópicas relevantes para a análise da recarga aquífera no Distrito Federal, utilizando ferramentas de geoprocessamento em ambiente SIG. A elaboração dos mapas temáticos e dos produtos derivados, como declividade e CN, evidenciou padrões espaciais coerentes com a dinâmica hidrológica regional, demonstrando a adequação dos critérios selecionados para a modelagem proposta.

Os resultados obtidos até o momento indicam que a combinação entre características do relevo, propriedades dos solos e uso e cobertura do solo exerce influência direta sobre os processos de infiltração e escoamento superficial, constituindo base consistente para a aplicação futura do método AHP. A etapa seguinte da pesquisa, correspondente à aplicação de questionários a especialistas e à definição dos pesos dos critérios, será fundamental para a construção do modelo multicritério e para a geração do mapa de favorabilidade à recarga aquífera.

A expectativa é que, com a aplicação do método AHP, seja possível identificar e hierarquizar espacialmente áreas com diferentes níveis de potencial de recarga, contribuindo para o planejamento territorial e para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. Além disso, a metodologia proposta apresenta potencial de replicação em outras regiões do bioma Cerrado, podendo servir como ferramenta de apoio à tomada de decisão em contextos de crescente pressão sobre os recursos hídricos.

Agradecimentos

Os Autores agradecem a Universidade de Brasília pelo apoio recebido na realização do trabalho.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos. Acesso em: 28 abr. 2026.

AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL (ADASA). Relatório de situação dos recursos hídricos no Distrito Federal. Brasília: ADASA, 2023. Disponível em: https://www.adasa.df.gov.br. Acesso em: 28 abr. 2026.

AQUINO, J. N. Uso de técnicas de modelagem e análise espacial na seleção de áreas ideais para construção de aterros sanitários em regiões metropolitanas densamente povoadas. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

BRASIL. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos. Acesso em: 28 abr. 2026.

CARVALHO, R. R. de. Aplicação de análise multicritério em ambiente de geoprocessamento no estudo de áreas para implantação de aterros sanitários – área sul da RIDE/DF e entorno. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Sistema de informações hidrogeológicas do Brasil. Brasília: CPRM, 2021. Disponível em: https://www.cprm.gov.br. Acesso em: 28 abr. 2026.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL (CODEPLAN). Atlas do Distrito Federal. Brasília: CODEPLAN, 2020. Disponível em: http://www.codeplan.df.gov.br. Acesso em: 28 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Classificação de relevo e aptidão agrícola das terras. Brasília: EMBRAPA, 2018. Disponível em: https://www.embrapa.br. Acesso em: 28 abr. 2026.

GONÇALVES, A. B. Modelação geográfica de problemas de localização. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

HO, Y.; HENGL, T. et al. Global ensemble digital terrain model (GEDTM30) and derived terrain variables. PeerJ, 2025. Disponível em: https://peerj.com/articles/19673/. Acesso em: 28 abr. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Projeções climáticas para o Brasil. Brasília: INMET, 2022. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br. Acesso em: 28 abr. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL (IPE-DF). Base cartográfica e ambiental do Distrito Federal. Brasília: IPE-DF, 2020. Disponível em: https://www.ipe.df.gov.br. Acesso em: 28 abr. 2026.

MEDEIROS, R. S. Métodos multicritério aplicados à análise ambiental. 2022. (Completar: tipo de trabalho, instituição, local).
OPENLANDMAP. GEDTM30 – Global Ensemble Digital Terrain Model 30 m. Disponível em: https://stac.openlandmap.org/gedtm-30m/collection.json. Acesso em: 28 abr. 2026.

REZENDE, A. J.; et al. Nota Técnica nº 46/2018/SPR: Produção de base vetorial com o Curve Number (CN) para BHO 2014. Agência Nacional de Águas (ANA), Brasília, 2018.

SANTOS, A. R.; LOLLO, J. A. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão do Meio, Leme (SP). Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, n. 4, p. 641-653, 2016.

SANTOS, R. M. dos. Recarga de águas subterrâneas em ambiente de cerrado: estudo com base em modelagem numérica e simulação hidrológica em uma bacia experimental (Distrito Federal). 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SAATY, T. L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I. Acesso em: 28 abr. 2026.

SERAPHIM, A. P. A. C. C. Relações entre as áreas de recarga dos aquíferos e áreas destinadas à urbanização: estudo dos padrões de ocupação do solo da unidade hidrográfica do Lago Paranoá-DF. Companhia de Planejamento do Distrito Federal-Codeplan, 2018.

SERAPHIM, A. P; DE BEZERRA, M. D. C. L. Cidade e Água: Relações entre Tipologias de Ocupação Urbana e Recarga de Aquíferos. CI (UR)-Cuadernos de Investigación Urbanística, Madrid, Ano XI, n. 126, 2019.

SOARES, M. R. G. J.; LOLLO, J. A.; SANTOS, A. R. Eficiência do método Curve Number de retenção de águas pluviais. Mercator (Fortaleza), v. 16, e16001, 2017.

SOARES REZENDE, P.; VIEIRA MARQUES, D.; OLIVEIRA, L. A. Construção de modelo e utilização do método de processo analítico hierárquico (AHP) para mapeamento de risco a inundação em área urbana. Caminhos de Geografia, v. 18, n. 61, p. 1–18, 2017.

TAYLOR, R. G. et al. Groundwater and climate change. Nature Climate Change, v. 3, p. 322–329, 2013. Disponível em: https://www.nature.com/articles/nclimate1744. Acesso em: 28 abr. 2026.

CONSERVAÇÃO DE NASCENTES NO SEMIÁRIDO CEARENSE: DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA NASCENTE DO RIO JAGUARAPI E PROPOSTA DE REVITALIZAÇÃO

1Maria Clara de Melo Barros, 2 Agenildo Alves de Vasconcelos, 3 Izabela Cristiane de Lima Silva.
1 IFCE - Camocim, e-mail: maria.clara.melo10@aluno.ifce.edu.br; 2 CEJA JSR, e-mail: agenildo.vasconcelos@prof.ce.gov.br; 3 IFCE - Camocim, e-mail: izabela.lima@ifce.edu.br

Resumo

As nascentes desempenham papel estratégico na manutenção da disponibilidade hídrica, especialmente em regiões semiáridas, onde a escassez de água e a variabilidade climática ampliam a vulnerabilidade socioambiental das comunidades locais. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo diagnosticar a situação ambiental da nascente do rio Jaguarapi, localizada no município de Martinópole, Ceará, e propor estratégias de conservação compatíveis com a realidade local. A pesquisa caracterizou-se como aplicada, descritiva e exploratória, com abordagem qualitativa, utilizando levantamento bibliográfico, observação direta em campo, registros fotográficos e coleta de informações comunitárias agregadas. Os resultados evidenciaram a presença de resíduos sólidos, sinais de pisoteio animal, redução da cobertura vegetal e alterações visuais da água, indicando processos de degradação ambiental e fragilização do sistema hídrico. Também foi constatada a relevância social da nascente para abastecimento sazonal de famílias da comunidade durante períodos de estiagem. Com base no diagnóstico, propôs-se a adoção do modelo Caxambu, associada ao isolamento controlado da área, recuperação da vegetação nativa, educação ambiental e monitoramento periódico. Conclui-se que a integração entre tecnologias sociais de baixo custo, restauração ecológica e participação comunitária constitui estratégia promissora para conservação de nascentes no semiárido e fortalecimento da segurança hídrica local.

Palavras-chave: Nascentes; Semiárido; Modelo Caxambu; Conservação hídrica; Sustentabilidade ambiental.

Introdução

A disponibilidade hídrica constitui um dos principais condicionantes da sustentabilidade ambiental, da produção econômica e da segurança humana, especialmente em regiões marcadas por elevada variabilidade climática e limitações hidrogeológicas. No Brasil, as águas subterrâneas possuem grande importância para o abastecimento público, sendo utilizadas, total ou parcialmente, por cerca de 57% dos municípios, dos quais aproximadamente 40% dependem exclusivamente desse recurso, enquanto os demais combinam seu uso com águas superficiais (ANA, 2021; HIRATA et al., 2019). Nesse contexto, as nascentes assumem elevada relevância ecológica e hidrológica ao promoverem a conexão entre fluxos subterrâneos e sistemas superficiais, contribuindo para a regulação da vazão, manutenção da qualidade hídrica e suporte aos serviços ecossistêmicos.

Em áreas semiáridas do Nordeste brasileiro, a conservação de nascentes apresenta desafios adicionais decorrentes da irregularidade pluviométrica, da elevada evapotranspiração e da predominância de embasamento cristalino, geralmente caracterizado por baixa porosidade primária e limitada capacidade de armazenamento hídrico. No sertão cearense, essas condições tendem a restringir a ocorrência de fontes naturais perenes, aumentando a relevância ambiental e social das nascentes remanescentes (FRANÇA, 2019). Além disso, a legislação brasileira reconhece essas áreas como Áreas de Preservação Permanente, estabelecendo proteção legal para seu entorno em razão de sua função ecológica e hídrica (BRASIL, 2012).

Apesar de sua importância estratégica, muitas nascentes localizadas em comunidades rurais permanecem submetidas a pressões antrópicas recorrentes, como supressão da vegetação ciliar, pisoteio animal, deposição de resíduos e uso inadequado do solo, fatores associados à redução da qualidade ambiental e à vulnerabilização do recurso hídrico (FRANÇA, 2019). Entretanto, ainda são escassos estudos aplicados que integrem diagnóstico ambiental local e proposição de medidas de recuperação para nascentes inseridas em áreas semiáridas do Ceará, especialmente em sistemas de pequena escala e forte dependência social. Essa lacuna limita a formulação de estratégias territorialmente adequadas de conservação e gestão hídrica.

A nascente do rio Jaguarapi, localizada na comunidade Jaguarapi, município de Martinópole, insere-se nesse contexto, desempenhando função relevante para moradores locais, sobretudo em períodos de estiagem. A compreensão de suas condições ambientais atuais pode subsidiar intervenções de baixo custo e elevada aplicabilidade voltadas à proteção do recurso.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo diagnosticar a situação ambiental da nascente do rio Jaguarapi e propor estratégias de conservação compatíveis com as condições socioambientais locais, contribuindo para a sustentabilidade hídrica em contexto semiárido.

Material e Métodos

O estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada, de natureza descritiva e exploratória, com abordagem qualitativa. A opção metodológica justifica-se pelo objetivo de diagnosticar as condições ambientais de uma nascente utilizada por comunidade local e, com base nesse diagnóstico, propor medidas tecnicamente viáveis de conservação. Estudos dessa natureza são adequados quando se busca compreender fenômenos socioambientais em contexto específico e subsidiar intervenções práticas.

Adotou-se a estratégia de estudo de caso único, tendo como unidade de análise a nascente do rio Jaguarapi, localizada na comunidade Jaguarapi, município de Martinópole, Ceará, Brasil, situada a aproximadamente 18 km da sede municipal (Figura 01). O recorte espacial concentrou-se na área de afloramento da nascente, seu entorno imediato e no trecho adjacente do relevo local conhecido pela comunidade como Serrote (Figura 02). O estudo foi desenvolvido em duas etapas complementares: levantamento bibliográfico e documental; investigação de campo com diagnóstico ambiental.

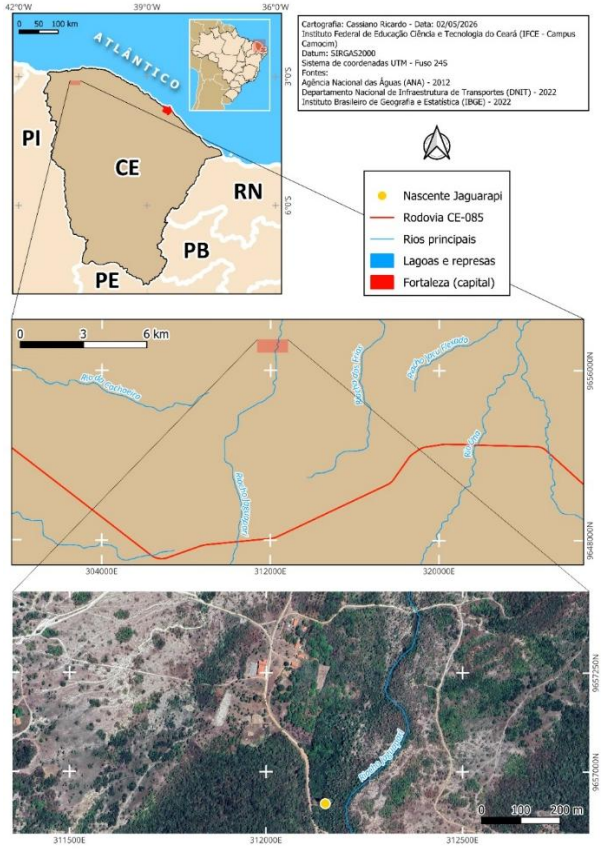


Figura 1 - Mapa de localização da Nascente Jaguarapi.
Fonte: IFCE, 2026.



Figura 2 – Nascente Jaguarapi.
Fonte: Autoria própria (2025).

A escolha da área justifica-se por sua relevância socioambiental e pelo uso hídrico local, especialmente durante os períodos de estiagem, quando parte das famílias da comunidade ainda utiliza a água da nascente para abastecimento doméstico. Informações obtidas em campo, com o agente de saúde da comunidade, indicaram a existência de aproximadamente 39 famílias assentadas e 22 agregadas, com uso sazonal da nascente por cerca de 20 famílias. Além de sua função hídrica, a nascente apresenta valor histórico e simbólico para a população local, reforçando sua importância para análises integradas entre conservação ambiental e uso comunitário.

O desenvolvimento da pesquisa ocorreu em duas etapas complementares. Inicialmente, realizou-se levantamento bibliográfico e documental em artigos científicos, livros, documentos técnicos e legislações ambientais relacionados aos temas nascentes, recursos hídricos, conservação ambiental, modelo Caxambu e proteção legal de Áreas de Preservação Permanente. Essa etapa forneceu suporte teórico para interpretação dos dados empíricos e para elaboração das propostas de intervenção.

Na segunda etapa, realizou-se visita técnica de campo à nascente, durante a qual foram conduzidas observação direta sistemática, produção de registros fotográficos e anotações em diário de campo, além do reconhecimento do uso e ocupação do solo no entorno imediato. Durante as observações, foram considerados como indicadores ambientais a presença de resíduos sólidos, sinais de circulação ou pisoteio animal, estado da cobertura vegetal, evidências de erosão ou assoreamento, condições visuais da água e formas locais de utilização do recurso hídrico.

A caracterização socioespacial da comunidade foi complementada por informações institucionais não individualizadas fornecidas por agente comunitário local, restritas a estimativas agregadas de domicílios e uso geral da nascente. Não foram coletados relatos pessoais, opiniões individuais ou quaisquer dados identificáveis.

Os dados qualitativos foram organizados em categorias temáticas previamente definidas (condições ambientais, pressões antrópicas, importância sociohídrica e estratégias de recuperação), sendo posteriormente analisados por meio de interpretação comparativa e triangulação entre evidências observacionais, registros fotográficos e literatura técnica.

Com base no diagnóstico obtido, elaborou-se proposta de revitalização fundamentada na aplicação do modelo Caxambu, tecnologia social de proteção de nascentes reconhecida por seu baixo custo operacional e simplicidade construtiva, associada a medidas complementares como isolamento controlado da área, restrição ao acesso animal, proteção do ponto de afloramento, recuperação da vegetação nativa, ações de educação ambiental comunitária e monitoramento periódico das condições ambientais da nascente.

Como limitação metodológica, destaca-se que o estudo se baseou em observações pontuais de campo e percepções locais, não contemplando, nesta etapa, análises laboratoriais de qualidade da água ou monitoramento hidrológico de longa duração.

Resultados e Discussão

As observações de campo evidenciaram que a nascente do rio Jaguarapi se encontra submetida a pressões antrópicas compatíveis com processos recorrentes de degradação em fontes hídricas rurais de pequena escala (Figura 2). Foram identificados resíduos sólidos no entorno imediato, sinais de circulação animal, alteração visual da água e redução da cobertura vegetal adjacente, indicando fragilização da função protetiva do ecossistema de nascente, especialmente no que se refere à capacidade de retenção de sedimentos, infiltração hídrica e proteção contra contaminação difusa. Tais condições são amplamente descritas na literatura como fatores que comprometem a estabilidade ecológica e a qualidade hídrica em áreas de surgência (PINTO et al., 2004; CALHEIROS et al., 2009).



Figura 3 – Afloramento e entorno da nascente Jaguarapi.
Fonte: Autoria própria (2026).

A presença de animais no entorno da nascente merece destaque, uma vez que o pisoteio contínuo pode promover compactação superficial do solo, redução da infiltração hídrica e intensificação de processos erosivos. Em áreas de afloramento freático, tais alterações favorecem o carreamento de partículas e sedimentos para o ponto de surgência. Resultados semelhantes foram descritos por Trimble e Mendel (1995), ao demonstrarem o papel do gado como agente geomorfológico em ambientes rurais, e por Line et al. (2000), que verificaram melhoria da qualidade da água após exclusão de animais em áreas ripárias.

A supressão da vegetação nativa observada no entorno (Figura 2) também representa aspecto crítico. A cobertura vegetal exerce papel essencial na proteção física do solo, retenção de umidade, interceptação de escoamento superficial e filtragem natural de contaminantes difusos. Sua supressão aumenta a suscetibilidade à erosão e ao assoreamento, além de reduzir a resiliência hídrica local. Em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água já é naturalmente limitada, a conservação da vegetação em áreas de nascente torna-se ainda mais estratégica (FRANÇA, 2019).

Os registros comunitários indicaram que a nascente mantém relevância social para a população local, especialmente durante períodos de estiagem, quando parte das famílias recorre ao recurso para abastecimento doméstico. Esse resultado reforça que a vulnerabilidade observada transcende a dimensão ecológica e assume caráter socioambiental. Em áreas rurais do semiárido, pequenas fontes hídricas frequentemente funcionam como suporte complementar à segurança hídrica comunitária, sobretudo em cenários de irregularidade pluviométrica (FRANÇA, 2019; CALHEIROS et al., 2009).

Outro aspecto relevante refere-se às práticas locais de limpeza manual da nascente com enxadas e baldes. Embora essas ações revelem vínculo comunitário e intenção de cuidado, intervenções empíricas sem orientação técnica podem alterar a estrutura natural do ponto de afloramento, remover sedimentos estabilizados e ampliar a turvação da água. Esse achado sugere que estratégias de conservação devem articular conhecimento técnico e participação social, evitando abordagens exclusivamente normativas. Experiências em gestão participativa de recursos hídricos indicam que a efetividade das ações aumenta quando o saber local é incorporado ao processo decisório (JACOBI; BARBI, 2007).

Diante desse cenário, a aplicação do modelo Caxambu apresenta-se como alternativa tecnicamente consistente, sendo amplamente reconhecida em estudos aplicados como solução de baixo custo para proteção de nascentes, com potencial de melhoria das condições físicas da água e redução da exposição a contaminantes externos (CALHEIROS, 2009; WEBER et al., 2022). Essa tecnologia social baseia-se na proteção física do ponto de afloramento por meio da construção de uma estrutura filtrante composta por camadas de material granular (pedras e brita), associada à instalação de um sistema de captação e condução da água que reduz a exposição a contaminantes externos (CALHEIROS, 2009; WEBER et al., 2022).

A implantação do modelo envolve etapas sequenciais que incluem: (i) limpeza controlada da área, evitando remoção excessiva de sedimentos estabilizados; (ii) escavação criteriosa ao redor do ponto de surgência para acomodação do sistema filtrante; (iii) instalação de camadas de pedra e brita que atuam como meio de filtração física; (iv) posicionamento de tubo de captação para condução da água; (v) construção de estrutura de proteção (geralmente com tubo de concreto) que isola a nascente do contato direto com o ambiente externo; e (vi) cercamento da área para impedir o acesso de animais. Essas etapas são amplamente descritas em manuais técnicos de proteção de nascentes e refletem práticas consolidadas em contextos rurais brasileiros (CALHEIROS, 2009; WEBER et al., 2022).

No contexto específico da nascente do rio Jaguarapi, a adoção desse modelo apresenta múltiplos benefícios. Do ponto de vista ambiental, contribui para a redução da entrada de sedimentos e contaminantes, estabilização do solo no entorno imediato e proteção do fluxo hídrico. Do ponto de vista sanitário, favorece a melhoria da qualidade física da água, reduzindo turbidez e exposição a fontes externas de contaminação. Do ponto de vista social, mantém o acesso comunitário ao recurso hídrico, ao mesmo tempo em que introduz práticas mais seguras de uso e manejo.

Entretanto, é fundamental destacar que a aplicação do modelo Caxambu não substitui a necessidade de tratamento da água para fins potáveis (DALLAZEM; SUNTTI, 2016). De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece os padrões de potabilidade da água para consumo humano no Brasil, a água deve atender a critérios físico-químicos e microbiológicos específicos, incluindo ausência de *Escherichia coli*, controle de turbidez e presença de desinfetante residual (BRASIL, 2021). Dessa forma, mesmo após a proteção da nascente, recomenda-se a adoção de etapas adicionais de tratamento, como filtração complementar e desinfecção (por cloração ou outros métodos apropriados), especialmente quando a água for destinada ao consumo direto (DALLAZEM; SUNTTI, 2016).

Adicionalmente, a efetividade do modelo depende da integração com ações ecossistêmicas complementares, incluindo a recuperação da vegetação nativa, controle do uso do solo e implementação de programas contínuos de educação ambiental. Esse entendimento está alinhado com abordagens contemporâneas de restauração ecológica, que enfatizam a necessidade de intervenções integradas entre infraestrutura, processos naturais e participação social (PALMER et al., 2005).

A principal contribuição deste estudo reside em demonstrar que tecnologias sociais consolidadas em outras regiões brasileiras podem ser adaptadas a nascentes inseridas no semiárido cearense, desde que ajustadas às especificidades hidroambientais e socioterritoriais locais. O trabalho também evidencia a relevância de diagnósticos de pequena escala, frequentemente negligenciados na literatura, mas fundamentais para a gestão descentralizada da água em comunidades rurais.

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que intervenções de baixo custo e elevada participação comunitária podem representar alternativa viável para proteção de nascentes utilizadas sazonalmente. Tal aspecto possui especial relevância para comunidades afastadas, com restrições orçamentárias e dependência de soluções locais de abastecimento, que possuam em suas proximidades acesso à nascentes perenes, como é o caso da comunidade estudada.

Como limitação, destaca-se que o estudo se baseou em observações pontuais de campo e diagnóstico qualitativo, não contemplando análises laboratoriais de qualidade da água ou monitoramento hidrológico de longo prazo. Pesquisas futuras devem incorporar medições físico-químicas, microbiológicas e avaliação comparativa da efetividade do modelo Caxambu após implantação.

Em síntese, os achados demonstram que a nascente do rio Jaguarapi apresenta elevada importância socioambiental, embora submetida a processos de degradação reversíveis mediante manejo integrado. A articulação entre proteção física da nascente, restauração ecológica do entorno e participação comunitária configura a estratégia mais consistente para promoção da sustentabilidade hídrica local.

Considerações Finais

O estudo demonstrou que a nascente do rio Jaguarapi apresenta elevada relevância socioambiental para a comunidade local, especialmente em períodos de estiagem, quando atua como fonte complementar de abastecimento hídrico. Entretanto, o diagnóstico ambiental evidenciou pressões antrópicas que comprometem sua integridade ecológica, destacando-se presença de resíduos sólidos, acesso animal descontrolado, redução da cobertura vegetal e sinais de alteração física do entorno.

Esses achados indicam que a vulnerabilidade da nascente resulta não apenas de fatores biofísicos, mas também da ausência de manejo técnico continuado e de estratégias estruturadas de proteção ambiental. Nesse sentido, a aplicação do modelo Caxambu, articulada à recuperação da vegetação nativa, ao controle de impactos locais e à educação ambiental comunitária, mostrou-se alternativa tecnicamente viável e socialmente adequada ao contexto estudado.

Como contribuição principal, o trabalho evidencia que tecnologias sociais consolidadas em outras regiões brasileiras podem ser adaptadas a nascentes inseridas no semiárido cearense, desde que consideradas as especificidades ecológicas e territoriais locais. Além disso, reforça a importância de diagnósticos em pequena escala como instrumento de apoio à gestão descentralizada dos recursos hídricos rurais.

Recomenda-se, em estudos futuros, a realização de monitoramento sazonal da vazão, análises físico-químicas e microbiológicas da água, bem como avaliação longitudinal da efetividade das medidas propostas. A conservação de pequenas nascentes rurais configura estratégia relevante para ampliação da resiliência hídrica em regiões semiáridas, especialmente quando associada a intervenções de baixo custo e forte participação comunitária.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

De modo especial, agradecem à orientadora, professora Izabela Lima, ao coorientador, professor Agenildo Alves, e a Cassiano Ricardo, pelas orientações, sugestões, incentivo e apoio concedidos ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, os quais foram fundamentais para a construção e o aprimoramento deste estudo.

Agradecem, ainda, à comunidade Jaguarapi, pela receptividade, colaboração e pelas informações compartilhadas durante a realização da pesquisa de campo, bem como ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará — IFCE, Campus Camocim, pelo apoio institucional. Por fim, agradecem à organização do congresso pela oportunidade de apresentação e divulgação deste trabalho, contribuindo para a socialização do conhecimento científico e para o fortalecimento das discussões acerca da preservação dos recursos hídricos.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc21730. Acesso em: 13 abr. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 13 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 de maio de 2021. Disponível em https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562. Acesso em: 13 abr. 2026.

CALHEIROS, Rinaldo de Oliveira et al. **Preservação e recuperação das nascentes de água e vida**. Cadernos da Mata Ciliar / Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Departamento de Proteção da Biodiversidade. - N 1 (2009)--São Paulo : SMA, 2009. Disponível em: https://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/Repositorio/222/Documentos/Cadernos_Mata_Ciliar_1_Preservacao_Nascentes.pdf. Acesso em: 13 abr. 2026.

DALLAZEM, Mayara; SUNTTI, Carla. **Análise da qualidade de fontes naturais do interior do município de Rio das Antas – SC – protegidas ou não por sistema Caxambu**. *Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Videira*, Joaçaba, v. 1, 2016. Disponível em: https://periodicos.unoesc.edu.br/apeuv/issue/view/238. Acesso em: 13 abr. 2026.

FRANÇA, Francisco Mavignier Cavalcante. **Nascentes hídricas do Ceará: importância, proteção e uso sustentável**. Fortaleza: Instituto Centro de Ensino Tecnológico do Ceará, 2019. Disponível em: https://www.centec.org.br/wp-content/uploads/2025/07/publicacao-nascentes-hidricas-do-ceara-importancia-protecao-uso-sustentavel.pdf. Acesso em: 13 abr. 2026.

HIRATA, Ricardo et al. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/e7d9e125-7b22-4706-915b-a397f8a91784/2928658.pdf. Acesso em: 13 abr. 2026.

JACOBI, P. R.; BARBI, F. **Democracia e participação na gestão dos recursos hídricos no Brasil.** Lua Nova, n. 70, p. 27-55, 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ln/. Acesso em: 13 abr. 2026.

LINE, D. E. et al. **Nonpoint-source pollutant load reductions associated with livestock exclusion.** *Journal of Environmental Quality*, v. 29, p. 1882-1890, 2000. Disponível em: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2000.00472425002900060022x. Acesso em: 13 abr. 2026.

PALMER, M. A. et al. **Standards for ecologically successful river restoration**. Journal of Applied Ecology, v. 42, p. 208-217, 2005. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x. Acesso em: 13 abr. 2026.

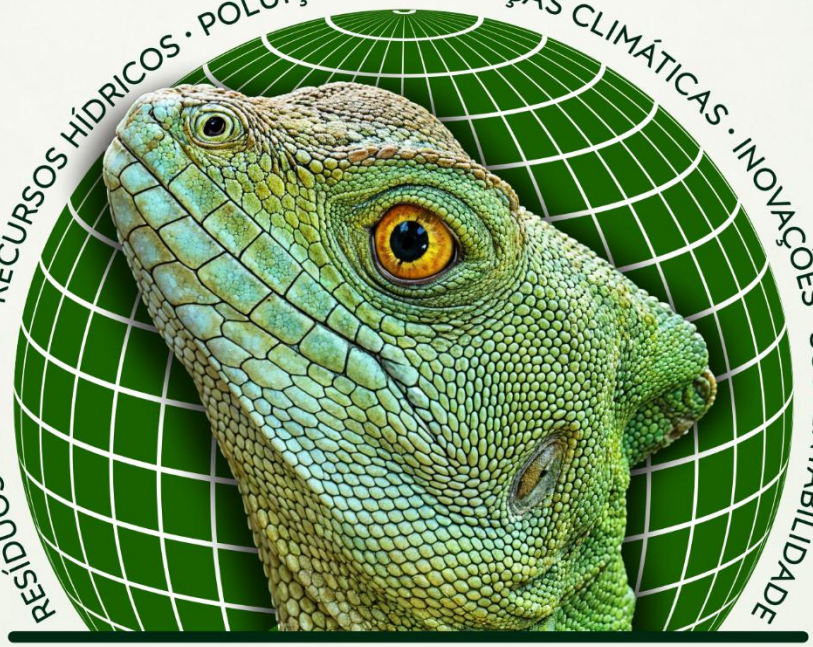
PINTO, L. V. A. et al. **Estudo das nascentes da bacia do Ribeirão Santa Cruz**. *Scientia Forestalis*, n. 65, p. 197-206, 2004. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr65/cap19.pdf. Acesso em: 13 abr. 2026.

TRIMBLE, S. W.; MENDEL, A. C. **The cow as a geomorphic agent. *Geomorphology***, v. 13, p. 233-253, 1995. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0169555X95000284?via%3Dihub. Acesso em: 13 abr. 2026.

WEBER, S.B. et al. **Proteções de nascentes**. Epagri, Boletim Didático, 164, 35p. Florianópolis: Epagri, 2022. Disponível em: https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/BD/article/view/1585/1456. Acesso em: 13 abr. 2026.

ÁREA TEMÁTICA 3

CULTURA, ARTE E COMUNICAÇÃO AMBIENTAL



5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
ENGENHARIA AMBIENTAL

UMA PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DA ANTIGA CAPTAÇÃO CURRAIS E PEDRAS

Antonio Luís Harada
Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB,
harada.harada8@gmail.com

Palavras Chave: Captação; Parque; Parceria

Resumo

A captação Currais e Pedras encontra-se desativada, localizando-se próxima a área urbana, em local de crescente ocupação irregular de terras, sendo assim uma questão crítica para vigilância. Apesar de desativada, a posse dessa captação é de grande importância para a CAESB por ser uma alternativa emergencial, caso haja problemas na operação do Sistema Produtor de Água do Descoberto. Propõe-se para o local a transformação em um parque de acesso público, aproveitando as belezas naturais do local e criando várias atrações. Um modelo de parceria com entes privados pode reduzir os encargos de operação e conservação dessa área. O parque poderá ser um forte instrumento de divulgação de conceitos ambientais e de melhoria da imagem da empresa junto à população.

Introdução

A captação de Currais e Pedras servia para abastecer às cidades de Taguatinga e Ceilândia antes da entrada em operação do Sistema Produtor Descoberto, no final da década de 70. Mesmo sendo uma unidade operacional desativada, essa captação figura nos planos de contingência da CAESB como uma importante alternativa emergencial no eventual caso de paralização do Sistema Descoberto, para a região oeste do Distrito Federal. Por isso, uma outorga de exploração desses mananciais tem sido mantida, assim como a vigilância dessa área, como forma de manter utilizável esse recurso hídrico.

A área dessa captação situa-se ao Norte de Ceilândia, em área próxima à zona urbana (**Figura 1**), e com forte tendência à ocupação irregular, mostrando-se um desafio para equipes de vigilância da CAESB manter essa área livre da ocupação de grileiros. A área é de grande beleza natural, com corredeiras e a queda d'agua característica da antiga captação, além de campina natural de cerrado extremamente preservada, como pode ser observado na **Figura 2**.



Figura 1: Localização da Captação Currais e Pedras



Figura 2: Notável beleza da paisagem na Captação Currais e Pedras

Dessa forma, propõe-se através de pequenas obras de urbanização, mantendo-se as características rústicas do local, aproveitar as belezas da região para transformar a área em um parque de acesso público, com abordagem fortemente ambiental. Um sistema de gestão através de concessão para exploração comercial pode permitir à CAESB transferir a vigilância e preservação dessa área para uma entidade privada, sendo que tal empreitada ternada viável com a exploração comercial de certas potencialidades. O empreendimento pode trazer grande benefício à imagem da CAESB, que terá reforçada sua ação ambiental de preservação, assim como também como órgão divulgador de conceitos ambientais, podendo assim ser chamado de "Parque Memorial CAESB".

Metodologia

Para a mudança dos usos da Captação Currais e Pedras, adotou-se como metodologia a criação de uma série de intervenções que enriquecerão a experiência de quem visita o local, que são apresentadas na **Figura 3**:

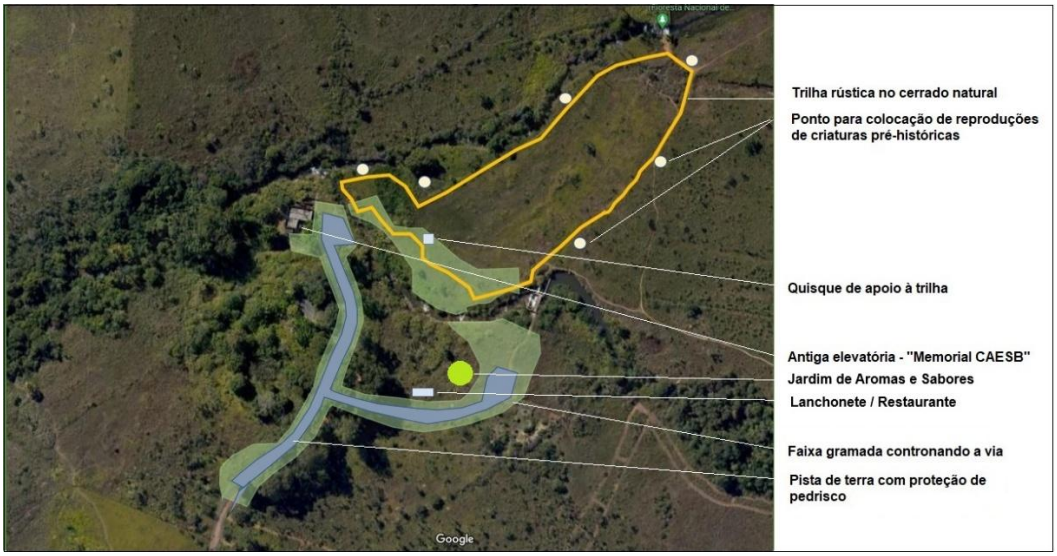


Figura 3: Componentes da proposta de transformação da Captação Currais e Pedras em parque

Seguindo a proposta de rusticidade e de intervenções mínimas na área, a entrada do parque deverá receber uma pequena faixa gramada margeando a pista de acesso, e uma cobertura de pedrisco na via, de forma a facilitar a entrada de veículos, mesmo em período chuvoso. Toda a área restante deverá se manter nas condições atuais, apenas com a melhoria nas condições das trilhas já existentes.

Uma trilha em terra compactada pela área de cerrado natural entre os dois mananciais servirá como base para uma trilha de caminhada com atrações inesperadas.

Aproveitando o fascínio natural que as criaturas pré-históricas exercem nas crianças e o desconhecimento da população da fauna existente no cerrado em um passado não muito distante, propõe-se implantar uma interessante trilha para caminhadas em uma área de cerrado natural com várias tipologias de vegetação. Nesse caminho, seriam inseridas no meio da paisagem natural reproduções em tamanho natural de criaturas existentes no cerrado desta região no período Pleistoceno (entre 1 milhão e 11.000 anos atrás). Essas representações exóticas permitirão visualizar o processo de evolução da fauna típica do cerrado, mostrando aves e mamíferos típicos da região central do Brasil inseridos na vegetação. É possível apresenta reproduções de criaturas como a Megatério (preguiça gigante), o Titanis (ave predadora, também conhecida como "Ave do Terror"), o Gliptodonte (antepassado do tatu canastra), o Macrauquênia (herbívoro extinto próximo ao camelo), o Toxodonte e o Mastodonte (mamíferos de grande porte). A trilha terá o potencial para ser a principal atração do parque, fazendo com que este se caracterize como museu aberto de história natural, algo bastante raro no contexto brasileiro.

Essas figuras deverão ser estruturadas de forma a permitir o toque e a interação dos animais com as pessoas da trilha (principalmente crianças), que terão noção de suas dimensões e formas, podendo interagir com as figuras, montando em algumas criaturas e tirando fotos, sendo executadas em concreto armado ou em fibra de vidro.

A **Figura 4** apresenta uma composição de ilustrações de animais desse período da história, interessantes de ser representados nessa trilha. **A Figura 5** ilustra a forma esquemática como que tais estátuas poderão se apresentar dentro da trilha rústica.



Figura 4: Criaturas do pleistoceno que habitaram o cerrado do Planalto Central

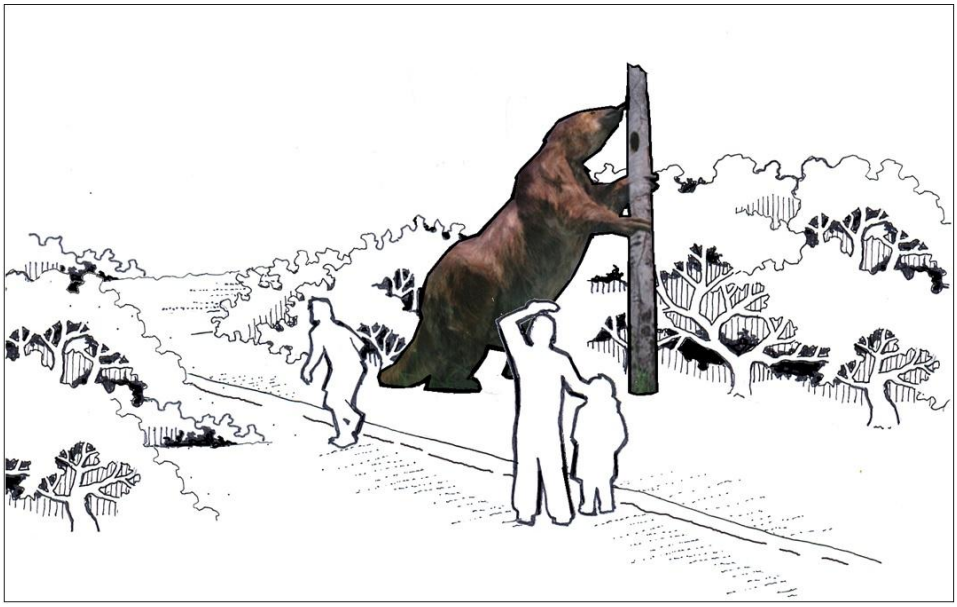


Figura 5: Como reproduções das criaturas do pleistoceno poderão equipar a trilha

A entrada da trilha poderá abrigar m pequeno quiosque que terá banners com explicações sobre a vegetação e fauna natural do cerrado, e será um ponto adequado para início de visitas guiadas, onde monitores poderão falar sobre características da flora e fauna reais que os visitantes poderão presenciar. Um modelo pode ser visto na **Figura 6.**

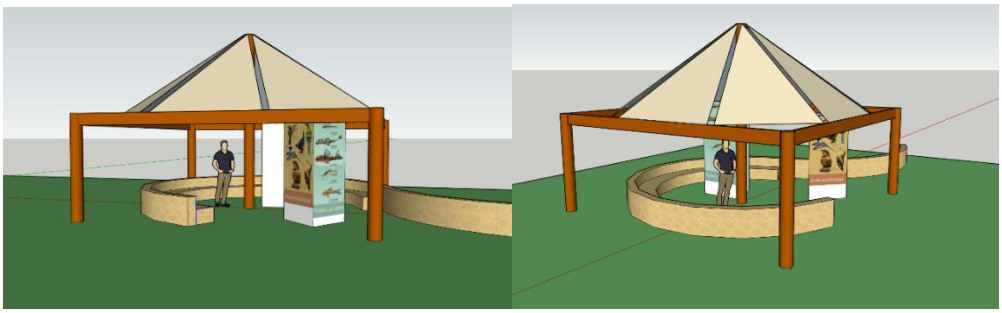


Figura 6: Quiosque de apoio à trilha, com informações da flora e fauna

O antigo abrigo da Estação Elevatória de Água Bruta da Captação Currais e Pedras, que atualmente se encontra bastante vandalizada, poderia ser recuperada, mantendo-se sua estrutura e configuração simples, tornando-se o "Memorial CAESB". Nesse local poderão ser expostas fotografias e imagens ilustrativas do funcionamento do antigo sistema que abastecia a cidade de Taguatinga. Outros painéis poderão mostrar o funcionamento dos atuais sistemas de abastecimento, como o Sistema Corumbá e a ETA Lago Norte.

Na antiga sala de máquinas, que possui piso rebaixado, um grande mapa do Distrito Federal com os sistemas CAESB poderá dar uma noção de sobrevoo sobre toda a região. A **Figura 7** dá uma idéia de como pode ser configurar essa pequena edificação.

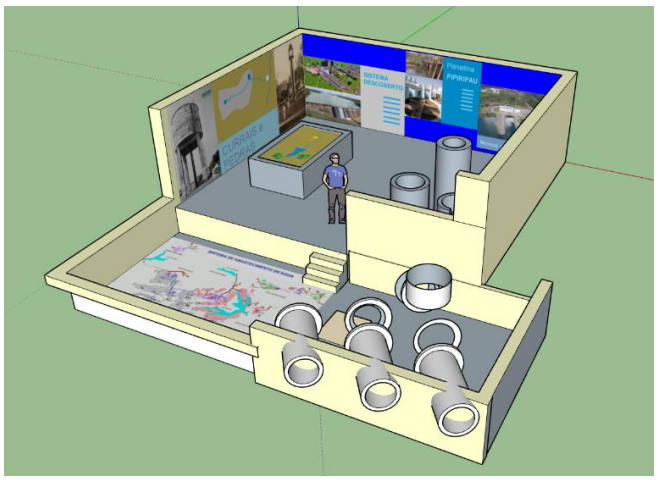


Figura 7: Memoral CAESB com painéis apresentado a história de antigo sistemas e os atuais

Um galpão coberto com uma lanchonete poderá atender aos visitantes e também dar sustentabilidade à operação de toda a estrutura do parque, podendo atrair entidades privadas para participar do empreendimento. A **Figura 8** mostra um exemplo de como pode se configurar essa estrutura.

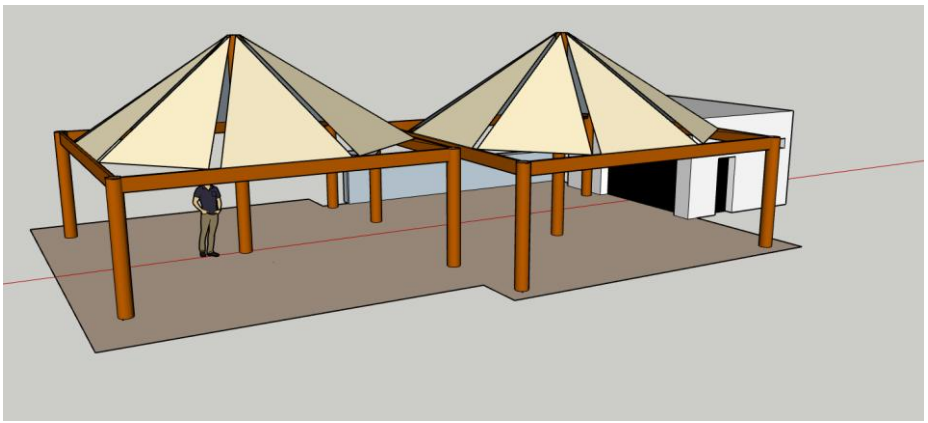


Figura 5: Proposta para lanchonete / restaurante de apoio

A sequência de eucaliptos na entrada da área de preservação pode dar suporte a uma atividade de arvorismo, com cabos suspensos entre os troncos. Esse conjunto poderá ter uma versão situada logo a um metro acima do solo, que poderá ser utilizada por crianças menores maiores riscos. Esse "arvorismo-mirim" poderá ser um grande fator de atração de famílias e poderá dispensar acompanhamento de guias.

Junto à lanchonete será feita uma área de jardins voltada ao herborismo, isto é, à apreciação de ervas e suas propriedades aromáticas, culinárias e medicinais. Grande parte da área verde deverá possuir canteiros suspensos, colocados a aproximadamente 1 metro de altura, o que permite que os visitantes possam sentir os cheiros e, eventualmente, levar folhas à boca. Os canteiros poderão utilizar aduelas e tubos pré-moldados de grande diâmetro, aproveitados dos estoques sem uso da CAESB, pintados em diversos tons de cores. Nesses tubos serão plantadas ervas utilizadas para chás, temperos diversos, plantas da medicina popular e ervas utilizadas na antiga perfumaria. Essa área é uma experiência particularmente interessante para deficientes visuais, podendo ainda ser um espaço para práticas relacionadas à medicina alternativa e atividades de relaxamento (ioga, tai-chi-chuan).

Os administradores da lanchonete poderão aproveitar o espaço para o comércio de temperos em conserva e desidratados, chás diversos, infusões e pastas medicinais. A **Figura 9** ilustra como poderá ser essa experiência.

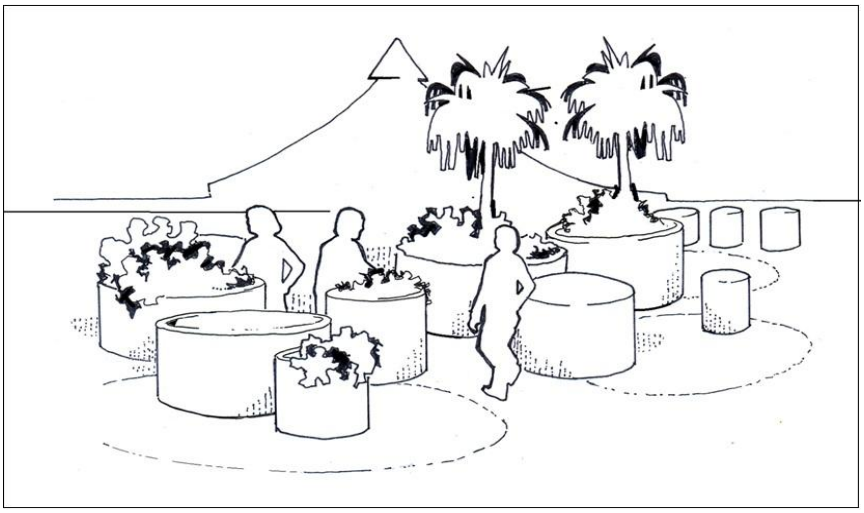


Figura 9: Jardim de Aromas e Sabores

Para conseguir a sustentabilidade desse empreendimento, uma das características especiais das ações propostas para esse Parque é a sua operação em parceria com uma entidade privada, que participará ativamente na manutenção e conservação de sua estrutura. Prevê-se no parque a operação de pelo menos uma entidade comercial que terá possibilidade de ganhos: na comercialização de lanches e refeições; operação de máquinas de venda de refrigerantes, doces e salgados; organização de eventos públicos de natureza ambiental; operação de atividades guiadas dentro da área preservada do parque.

A entidade privada, por sua vez, terá como atribuições: limpeza e conservação de toda a estrutura implantada; vigilância de toda a poligonal definida como área preservada; controle de acessos e atividades internas.

Essa organização institucional dará sustentabilidade ao parque, assim como possibilitará à CAESB diminuir seus encargos de vigilância de toda área, além de reduzir as chances de perda da área devido à grilagem e ocupação irregular de terras. Tais características constituem-se no aspecto mais inovador dessa proposta.

Dada a natureza rústica das benfeitorias previstas para o parque, os custos de implantação dessas intervenções são bastante modestos, sendo facilmente financiáveis por programas internacionais de cooperação, dada a natureza ambiental e social do empreendimento. Os custos de conservação do empreendimento, como descrito acima, podem ser diluídos através da participação de entes privados, como destaca esta proposta.

Resultados

Apesar das obras do "Parque Memorial CAESB" não terem conseguido se transformar em realidade, as intervenções propostas podem gerar uma área atraente para a população, conseguindo atingir seus objetivos de manter essa área livre da ocupação de grileiros e preservar as características dessa antiga captação, mantendo seus recursos naturais ainda disponíveis para eventuais necessidades.

Considerações Finais

Dados aspectos da proposta apresentados, consideramos que a transformação da Captação Currais e Pedras no "Parque Memorial CAESB" poderá trazer como benefícios institucionais:

- Melhorará a imagem da CAESB junto à população do Distrito Federal, mostrando que é uma empresa que abre seu patrimônio para servir a população em diversas formas;

- Reduzirá os encargos de vigilância dessa área, evitando de uma forma bastante efetiva que venha a sucumbir em um processo de ocupação irregular de terras;
- Será um fator de disseminação de conceitos de preservação ambiental, conservação de recursos hídricos e conhecimento da flora e fauna da região;
- Compartilhando a gestão da área com um ente privado, será um exemplo para todo o GDF de um modelo de gestão sustentável de um patrimônio público;
- Possibilitará à população travar conhecimento de formas de vida de m passado longínquo, mostrando a efemeridade do meio ambiente e a continuidade do processo evolutivo.

Referências Bibliográficas

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (2024) - RELATÓRIO DE INDICADORES DE DESEMPENHO (2024).

HARADA, A. L. (1999). Metodologias para a seleção de soluções de coleta, tratamento e disposição de esgotos em condomínios do Distrito Federal, ENC/FT/UnB, M.Sc., Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Brasília, Brasil.

SOUZA, R. C. E SALVADOR, N. N. B. (1997). Proposta para Avaliação dos Impactos Sociais nos Processos de Implantação e Operação dos Serviços de Tratamento de Esgotos Sanitários. Nota técnica, Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 2 no. 3 – Jul/Set, Brasil.

MAQUETE COMO MEIO DE COMUNICAÇÃO PARA APRESENTAÇÃO DE PROJETOS DE ENGENHARIA JUNTO A COMUNIDADE DA LAGOA DO JACARÉ

1Julia Macedo Curvo Caldas, 2Isabella Walecheski Toledo, 3Estella Síntique Fernandes Matos, 4Juliana Toledo Correa, 5Marcos Winicyos Paranhos De Moraes, 6Mariana Tainá Nogueira De Brito, 7 Maria Eduarda Marques Do Nascimento, 8Rafael Pedrollo De Paes

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso; 1 e-mail: julia.caldas@sou.ufmt.br; 2 e-mail: isabella.toledo@sou.ufmt.br; 3 e-mail: estellamatos2001@gmail.com 4 e-mail: juliana.correa@sou.ufmt.br; 5 e-mail: marcos.moraes3@sou.ufmt.br; 6 e-mail: mariana.brito@sou.ufmt.br; 7 e-mail: maria.nascimento10@sou.ufmt.br; 8 e-mail: rafael.paes@sou.ufmt.br

Palavras-chave: Comunicação dialógica; Saneamento Ambiental; População vulnerável

Resumo

O presente artigo analisa o uso de maquetes como instrumento de comunicação na apresentação de projetos de engenharia de saneamento ambiental junto à comunidade da Lagoa do Jacaré, localizada em Várzea Grande – MT. O estudo parte da experiência em traduzir a linguagem técnica da engenharia para uma forma acessível à população, majoritariamente vulnerável e com baixo nível de escolaridade. Metodologicamente, foram elaboradas duas maquetes representando a condição atual (assoreada) e a proposta de desassoreamento da lagoa. Os dados topográficos da condição da lagoa assoreada e da desassoreada foram representados na maquete e avaliados diferentes materiais, com testes de impermeabilização, para as superfícies molhadas. As maquetes foram apresentadas à comunidade em um evento no Dia Mundial da Água de 2025, promovendo interação entre moradores e equipe técnica. Como resultados, verificou-se que o uso de recursos visuais tridimensionais facilitou a compreensão dos projetos, estimulou o diálogo e possibilitou a participação ativa da população, que contribuiu com informações relevantes sobre a dinâmica local. Conclui-se que as maquetes são ferramentas eficazes para a mediação entre conhecimento técnico e saber popular, favorecendo o engajamento comunitário e contribuindo para a elaboração de soluções mais adequadas às necessidades socioambientais locais.

Introdução

Estudos indicam que a união entre teoria e prática, especialmente ao abordar temas locais pontuais, promove condições propícias de educação, ao aliar o aprendizado com a vivência prática das partes envolvidas (Medeiros et al., 2021; Freire, 2024). É nesse escopo que se insere a necessidade de aproximar a população da linguagem técnica da engenharia, visando a melhor compreensão dos conceitos teóricos e transformá-los em experiências visuais sobre as propostas apresentadas junto à comunidade que receberá as intervenções em saneamento ambiental. Esse cuidado gera melhor proveito da própria comunidade e de profissionais da área de engenharia.

O trabalho explora o papel da maquete como um instrumento de comunicação e engajamento no que se refere à linguagem complexa (que é um projeto de engenharia) para que uma comunidade composta majoritariamente por população semianalfabeta possa participar e compreender as principais decisão em seu ambiente de moradia. No geral, maquetes são ferramentas didáticas de múltiplas aplicações, para demonstração tridimensional de determinados objetos ou estruturas, que utilizam os sentidos humanos para a abstração e compreensão dos elementos que são foco (Silva et al., 2017).

Neste contexto, o projeto de extensão universitária Lagoa do Jacaré: conhecer para transformar (Lagoa do Jacaré, 2025), evidencia uma problemática recorrente no cenário urbano brasileiro: a insuficiência de infraestrutura de saneamento básico, associada a impactos sociais e ambientais. Inserida nesse cenário, a universidade buscou contribuir tecnicamente para a compreensão e enfrentamento dessas problemáticas, desenvolvendo como produtos projetos executivos de engenharia voltados à área de saneamento, com foco na melhoria das condições ambientais e da qualidade de vida da população residente no entorno da lagoa, localizada no município de Várzea Grande.

Os projetos elaborados contemplam diferentes frentes de intervenção, sendo eles: rede de esgoto sanitário, incluindo estação elevatória de esgoto sanitário; sistema de drenagem pluvial urbana; e o desassoreamento da Lagoa do Jacaré (Matos et al., 2026). Entre essas propostas, destaca-se o projeto de desassoreamento da lagoa, que constitui o foco da exposição por meio de maquetes junto à comunidade e que será explorado neste artigo.

A interferência urbanística dos projetos melhora as condições socioambientais locais e econômicas da comunidade da Lagoa do Jacaré, evidenciando os direitos básicos ao saneamento, além de fortalecer vínculos interinstitucionais, pela parceria com o Ministério Público e a Prefeitura Municipal de Várzea Grande.

Em grande medida, fica explícita a necessidade de compreensão da comunidade junto à proposta dos projetos executivos, com apelo a ações de educação ambiental. Entende-se que essas medidas instrumentalizam a comunidade para buscar apoios para implementação e execução dos projetos, que dependem da tomada de decisão de órgãos públicos. Pelas razões expostas, o objetivo deste trabalho é expor e avaliar a abordagem empregada com maquetes como linguagem simples de exposição de projetos de engenharia junto a uma comunidade carente (Lagoa do Jacaré), em Várzea Grande, Mato Grosso.

Material e Métodos

A seção de materiais e métodos inicia-se com a caracterização da comunidade da Lagoa do Jacaré. Em seguida, haverá explicação das principais fases que envolvem a elaboração da maquete, sua exposição e avaliação do engajamento da população junto a essa linguagem.

Área de estudo

O projeto de desassoreamento foi desenvolvido na microbacia do córrego do Jacaré, bairro Cristo Rei, em Várzea Grande, município que integra a Região Metropolitana do Vale do Rio Cuiabá, em Mato Grosso. A microbacia, apresentada na Figura 1, possui duas áreas principais de nascente: uma localizada na comunidade da Lagoa do Jacaré, onde se forma a lagoa homônima e se concentra a maior parte das ações do projeto; e outra situada na área verde do Aeroporto Internacional Marechal Cândido Rondon (Matos et al., 2026)

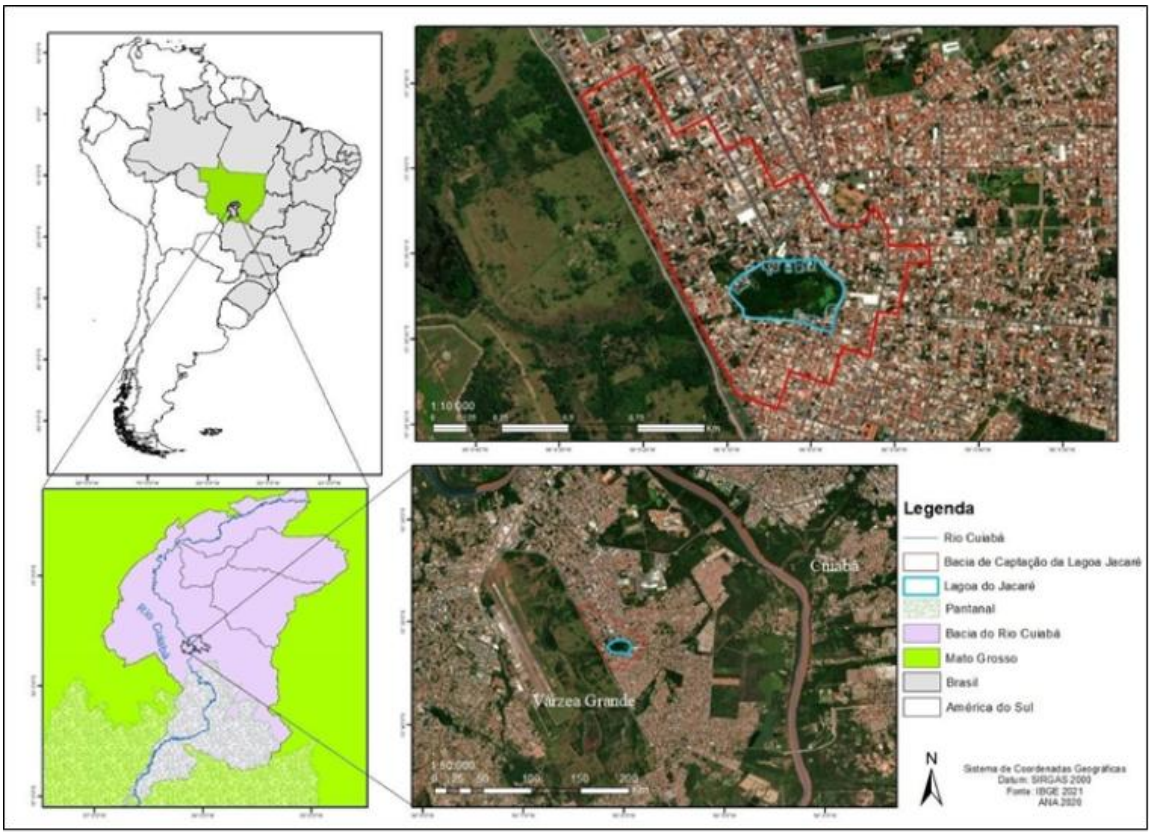


Figura 1 – Mapa da área estudada.
Fonte: Lagoa do Jacaré, 2025

Etapas metodológicas

Elaboração do mapa para auxílio da construção da maquete

Foram elaboradas duas maquetes, uma para mostrar a condição atual da lagoa do Jacaré; e a outra com a proposta do projeto de desassoreamento da lagoa.

Para sua realização, utilizou-se o levantamento topográfico e batimétrico da lagoa e seu entorno, considerando o atual estado de assoreamento. Os dados topobatimétricos foram realizados ao longo de 2023 e podem ser melhor compreendidos nos produtos expostos em Lagoa do Jacaré (2025). Ambos os dados (estado atual de assoreamento e proposta de desassoreamento) foram digitalizados e processados, por meio do software CivilCAD 3D[1]. Isso permitiu a impressão de prancha em folha A1 da condição atual da lagoa do Jacaré e seu entorno; e da prancha do projeto executivo de desassoreamento da lagoa, contendo aprofundamentos em determinadas regiões da lagoa, conforme objetivos de atendimento de demanda da flora, fauna e social. Para os dois casos, as elevações foram representadas por curvas de nível. Após a impressão, o próximo passo foi recortar as pranchas, seguindo o contorno das curvas de nível, que serviram de gabarito para o recorte das folhas do isopor.

Elaboração da maquete

A partir do recorte do levantamento das pranchas, as informações de cada curva de nível foram desenhadas sobre folhas de isopor (2cm de espessura), conforme apresentado na Figura 2. Os recortes dos níveis de elevação no isopor foram empilhados e fixados com cola de isopor para a representação do entorno da lagoa. Em seguida, realizou-se o corte das rebarbas (pequenas sobras) com estilete para modelar o centro da lagoa e refinar o exterior da maquete. Posteriormente, foram feitos pequenos testes

para saber qual seria a melhor forma para dar acabamento e como seria realizada a parte molhada da maquete, quais tipos de material seriam usados para fazer a água da lagoa, quais materiais seriam usados para fazer o entorno da lagoa para simular o terreno da lagoa (grama, arvores, edificações), entre outros.

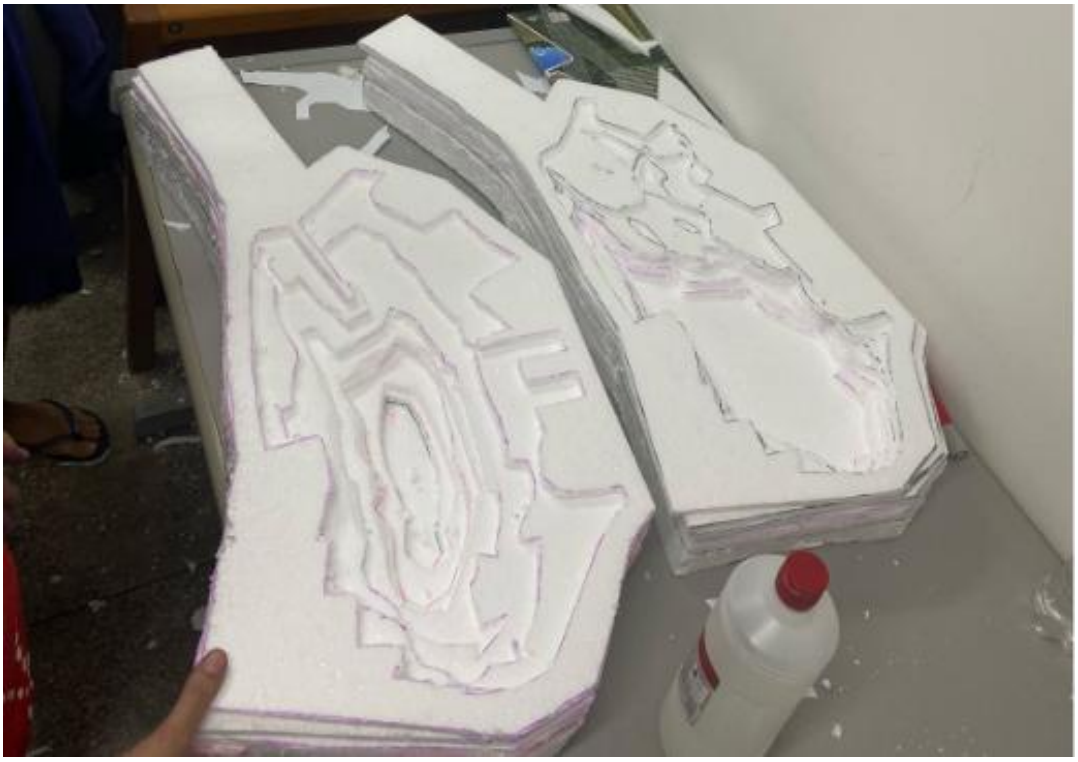


Figura 2 – Modelo recortado da Lagoa do Jacaré (assoreado e desassoreado)
Fonte: Autoria própria.

Para a realização do experimento, foram utilizados diferentes materiais com o objetivo de avaliar a eficiência na impermeabilização de superfícies de isopor. Os materiais empregados incluíram cola branca, goma laca e verniz, aplicados separadamente sobre diferentes amostras de isopor, a fim de verificar sua capacidade de impedir a infiltração de líquidos. Inicialmente, no primeiro teste a goma laca foi aplicada sobre a superfície do isopor, formando uma camada uniforme após o processo de secagem. Em seguida, realizou-se o segundo teste com verniz, que também foi distribuído de maneira homogênea sobre o material. Por fim, no terceiro teste utilizou-se a cola branca, aplicada em camada contínua, cobrindo toda a superfície exposta do isopor. Após a secagem completa de cada material, foram realizados testes de impermeabilização por meio da aplicação de líquido sobre as superfícies tratadas, observando-se a ocorrência de infiltração ou vazamento. Com o fim dos testes foi escolhida a melhor opção: revestimento com cola branca com tinta azul e verde, e com isso seguiu-se para aplicá-lo nas maquetes principais. Com a maquete já montada, colada e feito o recorte das rebarbas aplicou-se uma camada de massa corrida por toda a maquete, tanto a parte exterior quanto o interior do lago, a fim de proporcionar melhor acabamento, esse processo levou em média dois dias, tendo em vista que foram necessárias duas demãos de massa corrida. Vale ressaltar que estava chuvoso em um desses dias. Acredita-se que a umidade tenha interferido no resultado da secagem. Após o período de secagem das maquetes, elas foram polidas com lixa de polimento para melhorar o acabamento. Esse processo foi realizado tanto para a Maquete 1 (assoreada) quanto para a maquete 2 (desassoreada).

Acabamento e interação com os diferentes materiais

Realizada a etapa da representação topográfica da lagoa do Jacaré e seu entorno, procedeu-se para o acabamento e revestimento das superfícies. Iniciou-se com a demarcação das ruas em torno do lago, foi realizada com marcador hidrográfico colorido, sinalizando onde seria pintado o chão de verde e onde seriam colados os recortes das estradas em papel cartolina cinza que estaria representando as ruas. Para esse processo, foi utilizado o levantamento topográfico do papel em A1 para fazer o recorte das vias. O papel em A1 foi recortado deixando apenas as ruas, que foram colocados sobre a cartolina para fazer o recorte das estradas e colar com cola de isopor na maquete, com a tintura verde.

Após alguns testes em moldes paralelos para a representação de grama convencional como cobertura vegetal, foi empregada a erva de tereré (Figura 3). Para isso, elas foram peneiradas e distribuídas uniformemente sobre a área experimental, respeitando espaçamentos regulares.




Figura 3 e 4 – Maquete com acabamento em erva de tereré e tinta verde para revestimento
Fonte: Autoria própria.

A próxima etapa consistiu no processo de colagem das minicasas que representava as habitações locais dos moradores. Essas casas foram feitas com retalhos do isopor, o mesmo material empregado para a topografia da lagoa. Elas foram cortadas e pintadas com canetinha, conforme Figura 4. As casas também foram coladas com cola de isopor em lugares localizações que representassem aproximadamente sua disposição real no mapa.

Foram feitas cerca de 130 mini árvores com palito de dente partido ao meio, e papel crepom, que foram cortados em pequenos pedaços, enrolados e colocados no topo do palito, e fixados na maquete. Essas peças foram distribuídas em locais adequados para compor a vegetação e infraestrutura da paisagem, com o objetivo de provocar reconhecimento dos moradores da comunidade frente à sua realidade (Figura 5).



Figura 5 – Confecção das casas em isopor para a representação na maquete. Fonte: Autoria própria.



Figura 6 – Colagem e fixação das árvores e moradias
Fonte: Autoria própria.

Por fim, a exposição das maquetes à comunidade foi realizada no contexto da apresentação formal dos projetos executivos de engenharia em saneamento, junto a representantes da comunidade, Prefeitura de Várzea Grande, da Promotoria Pública e da imprensa local. Porque os projetos executivos são extremamente formais para o entendimento desse público, a tridimensionalidade por maquetes foi compreendida como alternativa.

Resultados

Elaboração da maquete

Para o modelo final da maquete, foram realizadas as seguintes etapas; recorte de 8 a 7 folha de isopor para cada maquete de acordo com sua topografia, sobrepostos e colados com cola de isopor, breve corte de rebarbas para estilizar o exterior e aplicação de duas demãos de massa corrida por volta de toda a maquete para melhorar seu acabamento. Posteriormente, passados

dois dias de secagem, ambas as maquetes foram polidas com auxílio de uma lixa. O cuidado na fase de acabamento, especialmente na aplicação da massa corrida e no lixamento, mostrou-se decisivo para a qualidade estética final.

Com uma caneta foram feitas as demarcações de ruas em volta da lagoa para sinalizar onde seriam colocadas às árvores, casas e estradas, e efetuada a pintura da vegetação. Para as árvores, foi utilizado um pequeno pedaço de papel crepom verde limão amassado para dar o aspecto da copa da árvore, em seguida foi colado com cola branca metade de um palito de dente representando o seu tronco. Para retratar as casas dos moradores, utilizou-se isopor cortado em retângulos de aproximadamente 1 cm x 2 cm, pintados com canetinhas de cores aleatórias. E para as estradas foi usado como molde o levantamento topográfico do papel em A1 para recortar as vias em papel de cartolina preto. Todos os adereços foram colados na maquete com cola para isopor, com exceção das árvores que foram cravadas na superfície da maquete, seguindo a configuração do local.

No interior da maquete, após a pintura, aplicou-se cola de isopor para fixação da erva de tereré para reproduzir o aspecto natural do interior e nas margens da lagoa.

Exposição da maquete

Em 23 de março de 2025 (Dia Mundial da Água), o grupo do projeto de extensão se reuniu aos moradores da comunidade da Lagoa do Jacaré. A exposição das maquetes serviu como base para apresentação da diferença entre a área assoreada e proposta de desassoreamento. Assim, a maquete serviu como material didático que possibilitou à comunidade compreender a proposta do projeto, convertendo conceitos técnicos e complexos da engenharia em uma linguagem visual mais simples (Figuras 6 e 7).

Essa simplicidade permitiu aos moradores entenderem um projeto técnico que antes parecia distante de suas realidades, possibilitando o reconhecimento dos moradores no espaço demonstrado. Essa identificação abriu espaço para um diálogo entre acadêmicos e moradores, de forma que estes fizessem questionamentos e expressassem suas dúvidas, interagindo com a apresentação. Dessa forma, a exposição da maquete se revelou uma chance de troca de saberes, aproximando o conhecimento técnico e o conhecimento popular, fortalecendo a importância da participação social nas decisões sobre o local.





Figura 7 e 8 – Exposição da maquete na comunidade.
Fonte: Autoria própria.



Figura 9 – Exposição da maquete assoreada e desassoreada.
Fonte: Autoria própria.

Avaliação do engajamento da população junto a essa linguagem

A avaliação do engajamento da população está diretamente relacionada à forma de apresentação do projeto. Durante o encontro, foi disponibilizado um microfone para registrar perguntas, dúvidas e sugestões dos moradores, permitindo a coleta de informações relevantes, como a identificação de pontos de alagamento e os caminhos percorridos pela água da chuva. Esse momento evidenciou não apenas as principais preocupações da comunidade, mas também contribuiu para a análise de possíveis soluções. Além disso, observou-se uma participação ativa dos moradores logo após a apresentação do projeto, com questionamentos direcionados ao seu funcionamento e aplicação. Alguns participantes manifestaram percepções positivas, destacando que a iniciativa era "positiva" e demonstrando interesse pelas propostas apresentadas. Houve também comparações com experiências anteriores, nas quais moradores relataram que, em outros locais onde viveram, não havia esse tipo de abordagem ou planejamento, ressaltando, assim, a relevância da proposta atual. Outros ainda expressaram satisfação e elogiaram o projeto, afirmando ter gostado das soluções apresentadas. Verificou-se que o uso de linguagem acessível, aliado a recursos visuais como maquetes, mapas e materiais didáticos, facilitou a compreensão das informações técnicas pela comunidade. Essas estratégias permitiram traduzir conteúdos complexos para uma forma mais simples, favorecendo a aproximação entre projetistas e moradores. Adicionalmente, a comunicação frequente, por meio de reuniões, visitas de campo e canais digitais, contribuiu para a manutenção de uma interação contínua com a população. Esse processo possibilitou a participação ativa dos moradores e a troca de conhecimentos, resultando em maior envolvimento com as ações propostas. Dessa forma, constatou-se que a adequação da linguagem, associada à escuta ativa da comunidade, foi fundamental para promover o engajamento no desenvolvimento do projeto.

Considerações Finais

Neste trabalho, analisou-se a utilização de maquetes como instrumento de comunicação na apresentação de um projeto executivo de desassoreamento de uma lagoa urbana, junto à comunidade da Lagoa do Jacaré. Para isso, foram elaboradas duas maquetes representativas da área de estudo, evidenciando as condições antes e após as intervenções propostas, com o objetivo de facilitar a compreensão das transformações previstas no território.

Considerando os desafios inerentes à compreensão de projetos técnicos, verificou-se que a apresentação didática, por meio de recursos visuais tridimensionais, proporcionou à população maior clareza quanto aos objetivos e às intervenções do projeto. Conforme destacado por Matos et al. (2026), o diálogo associado à utilização de materiais didáticos favorece a compreensão e amplia a adesão da comunidade às propostas de intervenção urbanística em seus espaços de vivência.

Além disso, a utilização da maquete possibilitou maior interação entre a equipe técnica e os moradores, contribuindo para a identificação de aspectos relevantes da realidade local, como pontos críticos de alagamento, formas de uso da população no entorno da lagoa e dinâmicas do escoamento superficial. Tais contribuições evidenciam que a participação comunitária pode auxiliar no aprimoramento técnico de projetos de engenharia, especialmente no que se refere às soluções de drenagem urbana e manejo de corpos hídricos.

Dessa forma, conclui-se que o uso de maquetes constitui uma ferramenta eficaz na mediação entre o conhecimento técnico e a população, contribuindo para a democratização da informação e para o desenvolvimento de soluções alinhadas às necessidades locais. Por fim, destaca-se que a incorporação de estratégias comunicativas acessíveis em projetos de engenharia pode ampliar a efetividade das intervenções urbanas, sobretudo em contextos de vulnerabilidade socioambiental.

Referências Bibliográficas

CARDOSO, Max Pereira; DE CARVALHO, Elisângela Martins. Uso da maquete como recurso didático para o ensino de geografia. 2024.

CASSEMIRO, Rodrigo Rosa. A maquete como recurso didático para o ensino-aprendizagem de conceitos geográficos no ambiente escolar. *Terræ Didatica*, v. 19, p. e023008-e023008, 2023.

CRUZ, Maria Lúcia Brito; GOMES, Thiago Queiroz; SOUSA, Denise Mota; ARAÚJO, Bruna Gabriele Oliveira; FERNANDES, Taynah Garcia. A construção de maquetes como recurso didático no ensino de geografia. *Revista Equador*, Teresina-PI, v. 7, n. 2, p. 96–109, 2025. Disponível em: https://periodicos.ufpi.br/index.php/revistaequador/article/view/7883. Acesso em: 10 mar. 2026.

DURIGAN DA LUZ, Rose Mari; BRISKI, Sandro José. Aplicação didática para o ensino da geografia através da construção e utilização de maquetes. *Revista Geográfica de América Central*, 2011. Disponível em: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451744820069. Acesso em: 10 mar. 2026.

DOS SANTOS, Mariana; DA ROCHA, Josefa Eleusa. Material didático complementar para o ensino básico e superior: construção de maquete através de biscuit. *REVEXT - Revista de Extensão da Universidade Estadual de Alagoas*, v. 6, n. 2, p. 40-48, 2021.

FREIRE, Paulo. *Educação como prática da liberdade*. 57. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2024.

LAGOA DO JACARÉ. Lagoa do Jacaré: conhecer para transformar. 2025. Disponível em: http://www.lagoadojacare.com.br. Acesso em: 13 jan. 2026.

LOPES, Y. C. Metodologias ativas: a construção de maquetes como recurso didático para o ensino de ciências. 2024. Disponível em: https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/handle/123456789/7176. Acesso em: 10 mar. 2026.

MATOS, E. S. F.; DE PAES, R. P.; SARTORI, G. D. Engenharia e comunidade: a comunicação dialógica no desenvolvimento de projetos de saneamento ambiental na Lagoa do Jacaré. In: FIGUEIREDO, D. M. (org.). *Água e bacia hidrográfica como temas de educação ambiental em escolas e comunidades*. Guará: Ed., [s.d.].

PEREIRA CASTRO, Silvia Leticia. Cartografia escolar: a utilização de maquetes como recurso didático no ensino de geografia. *Revista Amazônica sobre Ensino de Geografia*, v. 3, n. 1, 2021. Disponível em: https://raseng.com/index.php/raseng/article/view/64. Acesso em: 10 mar. 2026.

SILVA, Ivanna Nunes Monterazo; DE ALBUQUERQUE ALVES, Jully Viviane; BARRETO, Carla Joana Santos. Maquetes e jogos educativos como recursos didáticos para o ensino da vulcanologia no ambiente escolar. *Terræ Didatica*, v. 19, 2023.

SOUZA, Manuela Cristina Oliveira. Aproximações entre Freire e Ausubel sobre aprendizagem significativa: implicações para a formação docente. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Pedagogia) – Universidade Federal de Alagoas, Campus do Sertão, Delmiro Gouveia, 2021.

A SEMIÓTICA COMO FERRAMENTA NA ENGENHARIA AMBIENTAL: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E IMPACTO SOCIOPOLÍTICO DE "PRIMAVERA SILENCIOSA".

Autores: 1 Bruna Sacchetto Altran, 2 Gláucia Cordeiro, 3 Gisely Oliveira da Silva, 4 Leonardo Mendes Rios.

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: bruna.altran@sou.ufmt.br; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e- mail: glaucia.cordeiro@sou.ufmt.br; 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e- mail: gisely.silva@sou.ufmt.br; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: luzpropriadeodin@gmail.com

Palavras-chave: Comunicação Científica; Engenharia Ambiental; Semiótica Social.

Resumo

A crise ambiental contemporânea exige abordagens que transcendam a tecnicidade pura e integrem dimensões comunicacionais e sociais. Este artigo analisa a obra *Primavera Silenciosa* (1962), de Rachel Carson, como um marco epistemológico e semiótico para a Engenharia Ambiental. Sob a égide do Materialismo Histórico-Dialético, o estudo investiga como a articulação entre evidências científicas e estratégias discursivas contribuiu para a sensibilização ambiental moderna. A metodologia adotou uma abordagem quali-quantitativa, incluindo análise bibliométrica no Portal de Periódicos da CAPES (n = 304 artigos entre 1964 e 2026) e análise semiótica fundamentada na Gramática do design visual. Os resultados indicam uma expansão exponencial da produção científica sobre o tema nas últimas duas décadas, o que corresponde a 68% do total mapeado. A discussão demonstra que o uso de metáforas e enquadramentos narrativos atua como mediador entre o interesse técnico e o interesse emancipatório (Habermas), mitigando o hiato entre o valor e a ação. Conclui-se que a semiótica social emerge como ferramenta estratégica indispensável para o engenheiro ambiental, permitindo a tradução de indicadores biofísicos em narrativas capazes de promover a transição do paradigma social dominante para o novo paradigma ecológico.

Introdução

A obra Primavera Silenciosa (1962), de Rachel Carson, é um marco na história da consciência ambiental moderna. Ao denunciar os efeitos toxicológicos do DDT e de outros pesticidas em seres humanos e animais, Carson transcendeu a mera produção científica, impulsionando profundas transformações sociais e institucionais. Diferentemente de abordagens estritamente técnicas, Carson utilizou estratégias discursivas que aproximam sua obra da semiótica social, articulando linguagem, simbolismo e evidências científicas. Nesse sentido, o presente estudo busca analisar como a construção discursiva da obra contribuiu para sua ampla repercussão, tanto no meio acadêmico quanto nas esferas política e social.

A compreensão dessa difusão exige uma análise das bases epistemológicas que sustentam o conhecimento ambiental. Sob a perspectiva de Immanuel Kant (2001), o conhecimento é resultado da interação entre sujeito e objeto, mediada por estruturas a priori do entendimento, o que fundamenta uma racionalidade técnico-formal centrada na objetividade. Essa perspectiva sustenta, em grande medida, a prática da Engenharia Ambiental, orientada pela mensuração e pela previsibilidade. Todavia, a recepção da obra de Carson sugere que o conhecimento ambiental não se limita a dados brutos; sua eficácia depende da forma de comunicação e da interação com o contexto social. Nesse sentido, Jürgen Habermas (1987) argumenta que o conhecimento é movido por interesses constitutivos — técnicos, práticos e emancipatórios. Primavera Silenciosa exemplifica uma produção que transcende o interesse técnico ao mobilizar uma dimensão emancipatória, evidenciando relações de poder e riscos invisibilizados. A obra atua como mediadora entre ciência e sociedade, ampliando o alcance do debate ambiental e respondendo ao que Latour (2020) define como a crise contemporânea: um desafio que não é apenas biológico, mas também de sensibilidade e de interpretação da informação científica.

A eficácia da obra está associada ao uso de estratégias semióticas. A metáfora "primavera silenciosa" constitui um elemento central na construção de significado, permitindo a tradução de um problema técnico em uma representação simbólica acessível. A psicologia cognitiva corrobora essa estratégia ao demonstrar que a tomada de decisão humana é influenciada por enquadramentos narrativos e heurísticas, o que reforça a importância da linguagem na comunicação científica (VAN DER LINDEN, 2023; KAHNEMAN, 2021). Adicionalmente, teorias da persuasão indicam que elementos como a narrativa e o apelo emocional aumentam a eficácia da comunicação, contribuindo para um maior engajamento social (DAHLSTROM, 2021; MORRIS *et al*., 2020). A crescente complexidade das questões ambientais exige abordagens que integrem as dimensões técnicas, sociais e comunicacionais. Nesse contexto, a Engenharia Ambiental, tradicionalmente orientada por uma racionalidade técnico-instrumental, passa a demandar estratégias capazes de ampliar o alcance e a efetividade de suas intervenções (LIMA *et al*., 2022; WOODS, 2023). A efetividade dessa comunicação reside na transição entre paradigmas conflitantes. Enquanto o Paradigma Social Dominante (DSP) sustenta o crescimento intensivo dos recursos, o Novo Paradigma Ecológico (NEP) propõe uma visão de mundo em que a sustentabilidade é o eixo central. A semiótica atua como uma atividade subversiva nesse embate, auxiliando no 'desacoplamento' (decoupling) entre o conceito de progresso e a exploração material desenfreada (SULPHEY et al., 2023; CHANDLER, 2022). Trata-se de uma aplicação ética de influência: entender a perspectiva do público para guiá-lo a escolhas conscientes e sustentáveis, minimizando a coerção e priorizando a justiça e a suficiência (CAWOOD, 2021).

Este artigo busca analisar como esses mecanismos semióticos de sensibilização serviram de precursores no estudo de caso de Primavera Silenciosa, de Rachel Carson. Ao investigar como a obra transformou dados ecotoxicológicos em uma narrativa de impacto global, este estudo discute o papel do engenheiro ambiental não apenas como gestor de recursos, mas também como mediador de significados essenciais à transição ecológica justa e necessária.

Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo qualitativo-exploratório, sustentado pelos métodos de análise documental e bibliográfica, sob a égide do materialismo histórico-dialético. Essa base metodológica possibilita a compreensão da crise ambiental não apenas como um colapso biofísico, mas como resultado das tensões dialéticas entre o modo de produção industrial e as condições materiais de manutenção da vida. O percurso investigativo foi operacionalizado em três etapas procedimentais integradas.

A primeira caracteriza-se pelo diagnóstico bibliométrico e pelo mapeamento de hotspots. O objetivo desta fase foi contextualizar a evolução do conhecimento e a base material da crise. Realizou-se um levantamento bibliométrico no portal de periódicos da CAPES (termo “silent spring”, tipo “artigo”), que resultou em 304 registros analisados em séries decenais (1964–2026) para identificar tendências na produção acadêmica. Paralelamente, coletaram-se indicadores brutos do relatório Global Resources Outlook 2024 (UNEP), delimitando os hotspots de extração de recursos e de perda de biodiversidade que constituem a base denotativa da análise.

Na segunda etapa, foram realizadas as modelagens semiótica e cognitiva, e os dados técnicos foram submetidos à análise sob a ótica da Gramática do Design Visual (KRESS; VAN LEEUWEN, 2021) e da neurosemiótica, com o objetivo de compreender a transmutação do dado bruto em signo social. A análise estruturou-se em duas dimensões: a primeira sendo a metafunção ideacional, que investiga como os sistemas de provisão (energia, alimentos, mobilidade) são representados para mitigar o distanciamento cognitivo entre a causa técnica e o efeito ecológico no imaginário do (CHANDLER, 2022). A segunda a metafunção interpessoal na qual se avaliou a construção de relações de demanda entre a mensagem e o observador, utilizando o conceito de influência estratégica (CAWOOD, 2021) para observar o engajamento do córtex pré-frontal em prol de mudanças comportamentais.

A terceira etapa pressupôs a validação paradigmática por meio do estudo de caso (O Paradigma Carson). A obra serviu de paradigma histórico para validar o modelo de sensibilização proposto. A análise documental focou na ressignificação semântica. A transmutação de termos como inseticida (técnico) em biocida (signo de perigo). Transição de Paradigmas. A transição do Paradigma Social Dominante (DSP) para o Novo Paradigma Ecológico (NEP) por meio de narrativas multimodais (SULPHEY *et al*., 2023). Análise comparativa entre as táticas de Carson e ferramentas contemporâneas da engenharia ambiental, como o *Carbon Labelling* e as estratégias de Transição Justa, para avaliar a persistência e a eficácia do método.

Resultados e discussões

A análise quantitativa da primeira etapa realizada no portal de periódicos da CAPES identificou 304 publicações relacionadas ao termo "*Silent Spring*" entre 1964 e 2026. A distribuição temporal revela uma trajetória de interesse crescente, desafiando a obsolescência comum observada em obras científicas de caráter técnico.

O Gráfico 1 apresenta a evolução decenal da produção, permitindo identificar três fases distintas, sendo elas a fase inicial (1964–1984), produção incipiente (24 publicações), refletindo o período de embate institucional e a resistência das indústrias químicas à recepção da obra. A fase dois de consolidação (1984–2004), crescimento gradual (71 publicações), acompanhando a institucionalização do direito ambiental e das agências reguladoras. E a fase três de expansão (2004–2026) que apresenta uma inflexão expressiva, com 209 publicações, o que corresponde a mais de 68% do total analisado.

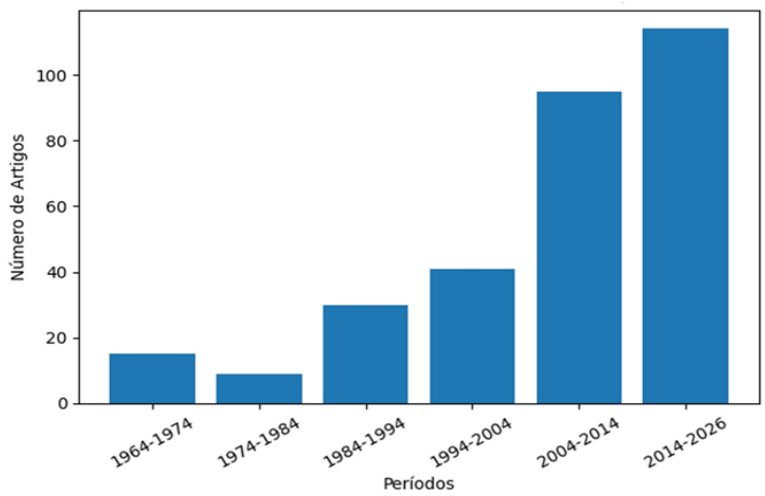


Gráfico 01: Produção bibliográfica por década.
Fonte: Autoria Própria (2026).

Nos Gráficos 2 e 3, pode-se observar, por sua vez, a concentração percentual nos anos mais recentes, o que indica que a obra de Carson não é apenas um registro histórico, mas também um referencial ativo para o que Sulphey *et al.* (2023) descrevem como a transição para o Novo Paradigma Ecológico (NEP). O crescimento da produção reflete a ampliação da consciência coletiva, catalisada por uma estratégia discursiva que articulou rigor científico e persuasão narrativa (DAHLSTROM, 2021).

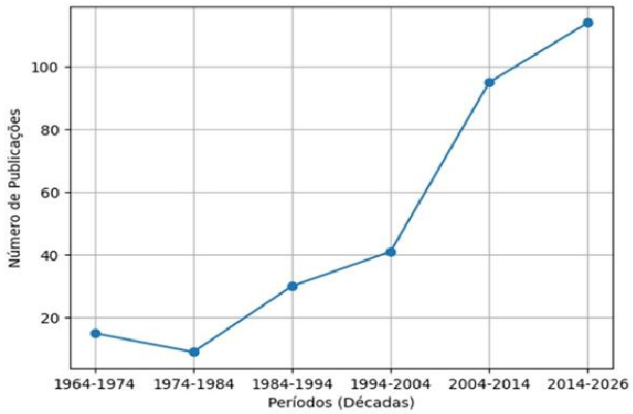


Gráfico 01:Tendência de crescimento ao longo do tempo
Fonte: Autoria Própria (2026).

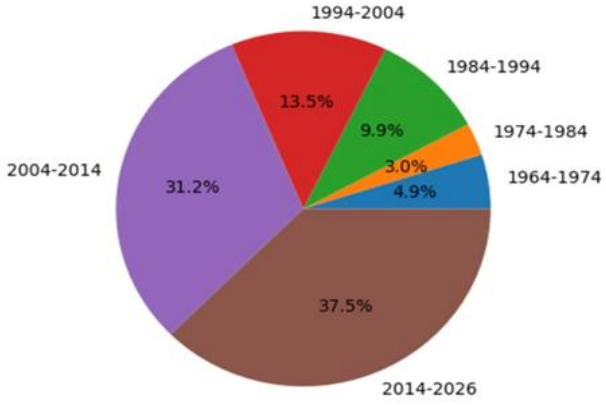


Gráfico 02: Concentração percentual da produção científica nos períodos mais recentes.
Fonte: Autoria Própria (2026).

A compreensão deste fenômeno exige uma reflexão que transcenda a métrica quantitativa. Sob a ótica de Immanuel Kant (2001), a engenharia ambiental clássicas opera em uma racionalidade técnica, na qual o conhecimento é mediado por categorias de objetividade e de mensuração. No entanto, os resultados sugerem que a "neutralidade técnica" é insuficiente para gerar o impacto social observado.

Na segunda etapa deste trabalho evidencia-se que a obra de Carson rompe com essa lógica ao alinhar-se ao conceito de conhecimento emancipatório de Jürgen Habermas (1987). Para Habermas, o conhecimento não é neutro, mas orientado por interesses. Ao estruturar seu discurso para evidenciar as relações de poder por trás do uso do DDT, Carson transforma a ciência em uma ferramenta de interesse prático e emancipatório, promovendo não apenas a compreensão técnica, mas também o engajamento político.

> "Vivemos numa era de especialistas, cada um dos quais olha para o seu próprio problema e não é capaz de perceber, tampouco é sensível, ao quadro maior no qual o problema está inserido. Vivemos, também, numa era em que a indústria, em seu aspecto de lucro, é que decide o que deve ser feito. [...] Quem tomou a decisão que põe em perigo milhões de pessoas? Quem tem o direito de decidir, para as inúmeras pessoas que não foram consultadas, que o valor supremo é um mundo sem insetos, mesmo que também seja um mundo estéril?" (CARSON, 2010, p. 13).

A eficácia da obra reside na sua capacidade de "traduzir" dados ecotoxicológicos em signos de alto impacto. A metáfora central, "Uma Fábula para o Amanhã", no primeiro capítulo da obra, atua como um dispositivo semiótico que simplifica a complexidade sistêmica e gera uma resposta emocional imediata ao representar, em uma única cidade, os problemas de toxicidade de várias comunidades e localidades em diversos seres vivos, inclusive no ser humano, como simplificação dos infortúnios reais. Do ponto de vista da psicologia cognitiva, essa estratégia encontra respaldo nos estudos de Kahneman (2021) sobre heurísticas e enquadramentos. A forma como a informação é apresentada como uma ameaça à vida cotidiana e à beleza natural influencia a tomada de decisão humana de maneira mais profunda do que o dado bruto, como se observa na Figura 1. Complementarmente, os princípios de influência descritos por Cialdini (2021) e Cawood (2021) explicam como a narrativa de Carson gera identificação e senso de urgência, fundamentais para a mobilização social.



Figura 5: Lixão sendo queimado ao lado de um pulmão representando as consequências da toxicidade aos pulmões. Fonte: Autoria própria, gerada com auxílio de Inteligência Artificial (2026).

Tal trajetória reforça a necessidade da engenharia ambiental moderna adotar a semiótica social como ferramenta auxiliar. O profissional contemporâneo, diante de dados robustos sobre a exaustão planetária (UNEP, 2024), deve atuar como mediador de significados. Como na Figura 1, utilizou-se um cenário crítico aliado a uma imagem impactante, humanizada, das consequências das queimadas. Ao aplicar a "gramática visual" (KRESS; VAN LEEUWEN, 2021) para representar impactos ambientais, o engenheiro pode superar o "hiato valor-ação" (NIELSEN *et al*., 2021) e fomentar uma transição ecológica justa.

Na terceira etapa, analisando diretamente a obra e citando-a, pressupõe que a crise ambiental atual reflete um hiato entre a robustez dos dados e a inércia social. Conforme o Global Resources Outlook 2024 (UNEP), o uso de recursos triplicou em 50 anos, e a extração de materiais responde por 90% da perda de biodiversidade. Esse 'hiato valor-ação' (Value-Action Gap) revela que o dado técnico, por si só, não gera mudança sistêmica (NIELSEN *et al*., 2021). Portanto, é preciso compreender o ser humano como Homo significans: um ser que não reage a indicadores isolados, mas aos sentidos construídos sobre eles (CHANDLER, 2022). A semiótica atua como ferramenta estratégica para a Engenharia Ambiental ao converter indicadores técnicos de impacto em signos multimodais que facilitam a comunicação. Por meio da 'gramática do design visual', o profissional pode representar sistemas de provisão (como energia e alimentação) de modo a evidenciar a pressão desses sistemas sobre as fronteiras planetárias (metafunção ideacional). Além disso, essa abordagem estabelece um diálogo mais próximo com o observador (metafunção interpessoal), reduzindo o distanciamento técnico e promovendo o engajamento da sociedade com as causas ambientais. Ressignificação semântica por meio da transmutação de termos como inseticida (técnico) para biocida (signo de perigo), como destacado no trecho a seguir.

> “Esses sprays, pós e aerossóis são agora aplicados quase universalmente em fazendas, jardins, florestas e residências – produtos químicos não seletivos, com o poder de matar todos os insetos, os “bons” e os “maus”, de silenciar o canto dos pássaros e deter o pulo dos peixes nos rios, de cobrir as folhas com uma película letal e de permanecer no solo – tudo isso mesmo que o alvo em mira possa ser apenas umas poucas ervas daninhas ou insetos. Será que alguém acredita que é possível lançar tal bombardeio de venenos sobre a superfície da Terra sem torná-la imprópria para toda a vida? Eles não deviam ser chamados de “inseticidas”, e sim de “biocidas”. CARSON, 1962, p. 24.

A semiótica atua como ferramenta estratégica para a Engenharia Ambiental ao converter indicadores técnicos de impacto em signos multimodais que facilitam a comunicação. Por meio da 'gramática do design visual', o profissional pode representar sistemas de provisão (como energia e alimentação) de modo a evidenciar a pressão desses sistemas sobre as fronteiras planetárias (metafunção ideacional). Além disso, essa abordagem estabelece um diálogo mais próximo com o observador (metafunção interpessoal), reduzindo o distanciamento técnico e promovendo o engajamento da sociedade com as causas ambientais. A Transição de Paradigma Social Dominante (DSP) para o Novo Paradigma Ecológico (NEP) por meio de narrativas multimodais (SULPHEY *et al*., 2023).

> "O 'controle da natureza' é uma frase concebida na arrogância, nascida da idade da biologia e da filosofia de Neanderthal, quando se supunha que a natureza existia para a conveniência do homem. [...] É nossa desgraça que uma ciência tão primitiva tenha se armado das mais modernas e terríveis armas e que, ao voltá-las contra os insetos, as tenha voltado também contra a própria Terra." (CARSON, 1962, p. 257).

A autora cita a arrogância e a ideia de que a "natureza existia para a conveniência do homem", ela descreve exatamente o núcleo do DSP. Esse paradigma vê a natureza como um recurso infinito a serviço do progresso humano. Ao criticar essa visão

como "primitiva" e alertar que as armas voltadas contra os insetos atingem "a própria Terra", ela introduz a visão do NEP: a de que somos parte de um sistema fechado e frágil, e que a destruição do meio é a nossa própria destruição. A visualização de dados e a semiótica multimodal tornam-se, portanto, competências transversais indispensáveis para o engenheiro do século XXI, permitindo que a complexidade dos sistemas biofísicos seja traduzida em narrativas de urgência e de possibilidade (TUFTE, 2020; RODRÍGUEZ ESTRADA; DAVIS, 2024). Análise Comparativa do confronto entre as táticas de Carson e ferramentas contemporâneas da Engenharia Ambiental, como o *Carbon Labelling* e as estratégias de transição justa, para avaliar a persistência e a eficácia do método.

> "Se o público deve alimentar esses venenos, se deve ser submetido ao consumo de alimentos que os contenham, ele tem o direito de saber. [...] A decisão foi tomada por tecnocratas que acreditam que o público não é suficientemente inteligente para ser consultado. Mas o público deve decidir se quer continuar no caminho atual e só pode fazê-lo se estiver em posse de todos os fatos." (CARSON, 1962, p. 12-13).

A persistência do método de Carson é observada na engenharia ambiental contemporânea por meio de instrumentos de transparência informativa, como o *Carbon Labelling*. A necessidade de empoderar o consumidor através do dado técnico ressignificado reflete a denúncia da autora contra a exclusão do público nas decisões ambientais críticas

Considerações finais

O impacto discursivo de *Primavera Silenciosa* resultou em transformações materiais concretas, confirmando que a mudança na superestrutura (linguagem/consciência) precede a mudança na base institucional. Entre os marcos resultantes, destaca-se a criação da Environmental Protection Agency (EPA) em 1970, a proibição do DDT e o fortalecimento da regulação ambiental, a consolidação do movimento ambientalista moderno.

A análise da obra à luz da semiótica social e das bases epistemológicas da ciência revela que a eficácia da Engenharia Ambiental não reside exclusivamente na robustez de seus dados técnicos, mas na capacidade de traduzi-los em significados socialmente partilhados. Ao longo deste estudo, demonstrou-se que a obra de Rachel Carson não foi apenas um tratado ecotoxicológico, mas um exercício de "engenharia de significados" que logrou romper a neutralidade técnica e mobilizar o interesse emancipatório da sociedade, à luz da perspectiva habermasiana.

Os resultados bibliométricos confirmam que o impacto de Carson não é um fenômeno datado, mas uma tendência em expansão, com mais de dois terços da produção científica concentrada nas últimas duas décadas. Esse crescimento atesta a urgência de superar o Paradigma Social Dominante (DSP) em direção ao Novo Paradigma Ecológico (NEP). A transição entre esses paradigmas, como evidenciado, é mediada pela linguagem: a ressignificação de conceitos técnicos em signos de impacto existencial — como a metáfora da "Primavera Silenciosa" — mostrou-se capaz de mitigar o hiato entre valor e ação, transformando a percepção de risco em mudanças institucionais e legislativas.

Conclui-se, portanto, que a Engenharia Ambiental contemporânea deve evoluir de uma racionalidade estritamente técnico-instrumental para uma abordagem integrativa e dialética. A incorporação da semiótica e da compreensão do *Homo significans* permite que o engenheiro atue como mediador estratégico na crise ambiental. Diante dos dados alarmantes do *Global Resources Outlook 2024*, a neutralidade revela-se uma insuficiência ética; a eficácia da transição ecológica justa e necessária depende, fundamentalmente, da nossa capacidade de reescrever a narrativa do progresso humano em harmonia com os limites planetários.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Mato Grosso e ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental pelo apoio.

Referências Bibliográficas

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.

CARSON, Rachel. **Silent Spring**. Boston: Houghton Mifflin, 1962.

CARSON, Rachel. **Primavera silenciosa**. 1. ed. São Paulo: Gaia, 2010. (Incluso para justificar as citações de 2010 no seu texto).

CAWOOD, James S. **Strategic Influence**: the art and science of change. [S. l.]: Routledge, 2021.

CHANDLER, Daniel. **Semiotics**: the basics. 4. ed. London: Routledge, 2022.

DAHLSTROM, M. F. The Narrative Truth of Science Communication. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, [s. l.], 2021.

HABERMAS, Jürgen. **Conhecimento e interesse**. Tradução de Guilherme de Almeida e Leonel Vallandro. Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.

KAHNEMAN, Daniel. **Ruído**: uma falha no julgamento humano. Rio de Janeiro: Objetiva, 2021.

KANT, Immanuel. **Crítica da razão pura**. Tradução de Manuela Pinto dos Santos e Alexandre Fradique Morujão. 5. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.

KRESS, Gunther; VAN LEEUWEN, Theo. **Reading images**: the grammar of visual design. 3. ed. London: Routledge, 2021.

LATOUR, Bruno. **Onde aterrar?** Como se orientar na política no Antropoceno. Rio de Janeiro: Bazar do Tempo, 2020.

LIMA, M. G. *et al*. Engineering Education for Sustainable Development: A Review of International Perspectives. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 340, 2022.

MORRIS, B. S. *et al*. Stories vs. facts: triggering emotion and action-taking on climate change. **Climatic Change**, [s. l.], v. 154, p. 19-36, 2020.

NIELSEN, K. S. *et al*. The role of high-impact lifestyles in water and energy consumption. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 4, n. 8, p. 730-739, 2021.

RODRÍGUEZ ESTRADA, F. C.; DAVIS, L. S. Visualizing Science: The Role of Graphics in Science Communication. **Science Communication**, [s. l.], 2024.

SULPHEY, M. M. *et al*. The transition from Dominant Social Paradigm to New Environmental Paradigm: a study among professional students. **Journal of Education for Sustainable Development**, [s. l.], 2023.

TUFTE, Edward R. **The visual display of quantitative information**. 2. ed. Cheshire: Graphics Press, 2020.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Global Resources Outlook 2024**: Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes. Nairobi: UNEP, 2024.

VAN DER LINDEN, Sander. The Science of Messaging: common pitfalls and best practices. *In*: **Psychology and Climate Change**. [S. l.]: Academic Press, 2023.

WOODS, R. Socially Responsible Engineering: Justice in Risk Management. **Engineering Studies**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2023.

ESTRATÉGIAS DE DIVULGAÇÃO E COMUNICAÇÃO CIENTÍFICA SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA EM AMBIENTES URBANOS: ANÁLISE DE PLATAFORMAS DE MÍDIAS DIGITAIS

1 Maria Eduarda Scarabelot Cortez, 2 Kátia Valéria Marques Cardoso Prates.
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: mariacortez@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: kprates@utfpr.edu.br.

Palavras-chave: Corpos hídricos, multiplataformas, análise bibliográfica.

Resumo

O aumento da demanda por água nas últimas décadas, em conjunto com o avanço desordenado da urbanização, tem intensificado os problemas relacionados à qualidade dos corpos hídricos, especialmente no que se refere a poluição e a contaminação. Nesse contexto, a divulgação e comunicação científica assume papéis essenciais na aproximação entre a sociedade e as questões ambientais, ao ampliar o acesso à informação e estimular a conscientização sobre a importância da preservação dos recursos hídricos em áreas urbanas. Este estudo teve como objetivo avaliar e a implementar estratégias de divulgação e comunicação científica, voltadas à temática da pressão urbana sobre corpos d'água, com foco na identificação das ferramentas mais adequadas para os diferentes público-alvos. Para isso, foi realizado um levantamento qualitativo, de caráter bibliográfico e analítico, contemplando as diversas plataformas digitais atualmente utilizadas, como: o Instagram, Facebook, TikTok, YouTube, Reddit, LinkedIn, além do desenvolvimento de Sites Institucionais. Foram analisados aspectos como o formato do conteúdo publicado, frequência de publicação recomendada, perfil predominante de usuários e potencial de engajamento. Os resultados indicaram que nenhuma plataforma, de forma isolada, é capaz de atender plenamente às demandas de comunicação e divulgação científica, evidenciando a necessidade de estratégias integradas e multiplataforma. A partir dos resultados da pesquisa, como produto final, foram desenvolvidos canais digitais articulados sob a identidade visual "Vozes das Águas: Quando a Água Encontra a Cidade" com o objetivo de ampliar a visibilidade das informações, promover sua disseminação ética e contribuir para o engajamento social e a conscientização ambiental acerca dos impactos da urbanização sobre os recursos hídricos.

Introdução

O consumo de água tem apresentado crescimento significativo nas últimas décadas, acompanhando a expansão populacional em escala global. Entretanto, esse aumento da demanda não é acompanhado pela ampliação da disponibilidade hídrica, uma vez que o volume total de água no planeta permanece praticamente constante. Nesse cenário, observa-se uma pressão crescente sobre os recursos hídricos, que vêm sendo explorados em níveis superiores à sua capacidade de renovação no ciclo hidrológico, comprometendo o atendimento adequado às demandas da população. Assim, a exploração hídrica frequentemente ultrapassa a capacidade de reposição natural, configurando um cenário de uso insustentável (Cortez, 2004; Quaresma et al., 2024).

Além das limitações quantitativas, destaca-se também a degradação da qualidade da água, associada à presença de poluentes e contaminantes. Esse quadro é agravado pela intensificação das pressões antrópicas sobre os corpos hídricos e pela crescente dependência de processos industrializados. Nesse sentido, sobressai-se a geração e o descarte inadequado de resíduos sólidos, efluentes líquidos e substâncias químicas no ambiente. Conforme apontam Santana e Freitas (2012), o aumento da poluição hídrica está, em grande parte, relacionado às atividades antrópicas impulsionadas por padrões de consumo intensivos, evidenciando a estreita relação entre a dinâmica socioeconômica e os impactos ambientais.

No Brasil, a disponibilidade de água, sob a perspectiva sanitária, encontra-se comprometida, especialmente em regiões onde o desenvolvimento urbano ocorreu de forma desordenada. Nessas áreas, é recorrente o lançamento inadequado de esgotos domésticos, efluentes industriais, agrotóxicos e outros poluentes, contribuindo significativamente para a deterioração da qualidade da água (Lira, 2005; Campos et al., 2025).

Diante dessa realidade, torna-se fundamental promover a conscientização por meio da educação ambiental, bem como desenvolver estudos e análises capazes de evidenciar as condições dos sistemas hídricos. Paralelamente, destaca-se a necessidade de estratégias eficazes de compartilhamento de informações, reforçando o papel da divulgação e comunicação científica na mediação entre o conhecimento técnico e a sociedade.

A comunicação científica tem como o objetivo a disseminação de conhecimentos especializados entre os pares da comunidade acadêmica, permitindo desse modo, a divulgação de resultados de pesquisas, relatos de experiências e aos avanços teóricos em áreas específicas. Já a divulgação científica, busca a democratização e o acesso ao conhecimento, promovendo a alfabetização científica e a possibilidade da participação da sociedade em debates sobre temas que vem impactando diretamente a vida e o seu cotidiano (Bueno, 2010; Valério, Takata, 2025).

Dessa forma, este trabalho tem como o objetivo analisar os métodos de divulgação e comunicação científica, por meio de uma abordagem qualitativa baseada na análise de estudos já publicados, além de propor estratégias de compartilhamento de informações que sejam eficazes tanto para o público em geral quanto para a comunidade científica.

Metodologia

O estudo foi desenvolvido a partir de uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, fundamentada em levantamento bibliográfico de dados e na análise das plataformas digitais voltadas para à divulgação e comunicação científica, com destaque para os conteúdos relacionados à qualidade da água em ambientes urbanos.

Inicialmente foi realizada uma revisão da literatura com o objetivo de identificar iniciativas, estratégias e as ferramentas aplicadas à popularização da ciência, bem como compreender as dinâmicas de produção e a disseminação de conteúdos em diferentes plataformas de mídias digitais.

A partir dessa etapa, foi conduzido um mapeamento das principais plataformas com o potencial de aplicação na divulgação e comunicação científica, abrangendo as redes sociais e os ambientes institucionais. Desse modo, foram considerados, as informações provenientes de trabalhos publicados, experiências descritas na literatura, bem como as práticas adotadas por diferentes equipes e projetos nas áreas. Esse levantamento permitiu a identificação de padrões de uso, formatos de conteúdos e estratégias de engajamentos adotadas em contexto de disseminação do conhecimento científico.

Para a caracterização das plataformas analisadas, foram definidos critérios específicos, incluindo: tipos e formatos de conteúdo suportados (vídeos, imagens e textos), frequência recomendada de publicações, perfil do público-alvo e o seu potencial de engajamento. Com base nesses critérios, foi elaborada uma classificação das plataformas digitais

, visando distinguir aquelas com maior vocação para a divulgação científica — direcionadas ao público em geral, com linguagem acessível e conteúdos mais visuais ou autoexplicativos — daquelas mais alinhadas à comunicação científica, voltadas a públicos especializados ou institucionais, com foco na apresentação de dados técnicos, resultados de pesquisa e produção acadêmica,

Por fim, realizou-se uma análise comparativa das estratégias identificadas, com o objetivo de subsidiar a elaboração de recomendações práticas para a implementação de ações de divulgação e comunicação científica adaptáveis a diferentes públicos e contextos.

Adicionalmente, as estratégias serão aplicadas em ações práticas, por meio da criação de conteúdos digitais autorais e da implementação de canais em plataformas de mídias sociais, como LinkedIn, Facebook e Instagram, além de um site institucional. Essas iniciativas permitirão avaliar, em contexto aplicado, o alcance e o potencial de engajamento das estratégias propostas, contribuindo para a ampliação da visibilidade e do impacto de projetos ambientais voltados ao monitoramento da qualidade da água em áreas urbanas.

Resultado e Discussão

O levantamento realizado possibilitou a identificação das plataformas de mídias digitais empregadas em ações de divulgação e comunicação científica, voltadas para os projetos ambientais urbanos, especialmente nas áreas de monitoramento da qualidade da água de corpos hídricos (Figura 1).

A análise evidencia uma diferenciação funcional entre as estratégias adotadas, associada ao perfil dos públicos-alvo e ao nível de aprofundamento das informações. Observa-se que as ações voltadas à divulgação científica tendem a priorizar conteúdos mais acessíveis e com maior potencial de engajamento, favorecendo a sensibilização e a aproximação do público com a temática ambiental. Em contraste, as estratégias de comunicação científica apresentam caráter mais técnico e estruturado, voltadas à sistematização e ao compartilhamento de informações especializadas. Essa distinção indica que as plataformas digitais não apenas diferem em termos de formato, mas desempenham papéis complementares no processo de disseminação do conhecimento. Nesse sentido, os resultados reforçam a necessidade de integração entre abordagens, de modo a ampliar simultaneamente o alcance, a compreensão e a profundidade das informações relacionadas à qualidade da água em ambientes urbanos.

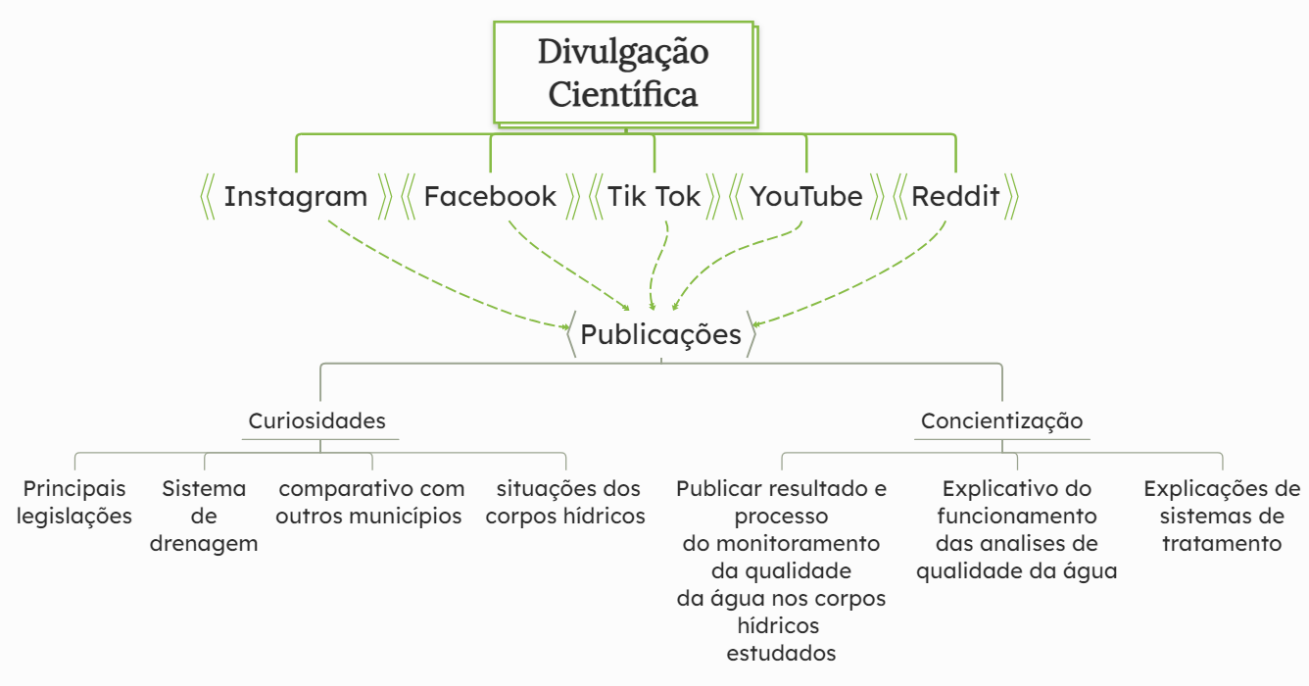




Figura 1 – Mapeamento das principais plataformas utilizadas e suas destinações em relação a comunicação e divulgação científica.
Fonte: Autoria Própria, (2026

No Quadro 1 é apresentada a caracterização comparativa dos aspectos de cada uma das plataformas analisadas, como a descrição geral, o potencial de engajamento e a frequência recomendada de publicações.

A análise evidencia que plataformas como Instagram, Facebook e TikTok apresentam maior adequação para ações de divulgação científica, em função de seu amplo alcance, diversidade de públicos e predominância de conteúdos audiovisuais dinâmicos e interativos. Essas características favorecem a simplificação de conteúdos mais complexos e ampliam o potencial de engajamento junto ao público em geral.

Por outro lado, plataformas como YouTube, Reddit e LinkedIn demonstram potencial para atuação tanto na divulgação quanto na comunicação científica, ao permitirem abordagens mais aprofundadas, maior tempo de exposição dos conteúdos e interações mais qualificadas com públicos específicos.

Os sites institucionais, por sua vez, destacam-se como ferramentas mais adequadas à comunicação científica, sobretudo pela possibilidade de disponibilização de dados técnicos, relatórios completos e produção acadêmica, além de favorecerem a interlocução entre pesquisadores e instituições.

Quadro 1 – Caracterização das principais plataformas de mídias sociais quanto à descrição geral, potencial de engajamento e frequência recomendada de publicações.

Plataforma	Descrição geral	Potencial	Frequência de Publicação (Semanal)
	Amplo alcance, utilizada para postagens de imagens, vídeos curtos (Reels), enquetes, perguntas e stories com atualizações rápidas.	Alto, com público diversificado	3 ~ 5
	Publicações amplas com textos, imagens, vídeos, elaborações de grupos e eventos, permitindo o compartilhamento e comentários para a interação com o público.	Médio para alto, com público diversificado	2 ~ 4
	Produção de vídeos curtos em formatos virais, voltado para o alcance do público jovem.	Muito alto, principalmente público jovem	4 ~ 7
	Compartilhamento de vídeos curtos ou longos, tutoriais, documentários, entre outros.	Médio para alto, varia dependendo da divulgação	1 ~ 2
	Comunidades temáticas com longas oportunidades de debates e interações com o público em questão	Variável, depende de acordo com o engajamento e as comunidades criadas	2 ~ 5
	Utilizada para a publicação de relatórios, parcerias, chamadas de projetos e articulação institucional	Rede profissional, focada em públicos diversificados e técnicos.	1 ~ 3
	Portais criados com o interesse de compartilhamento de informações, imagens, dados e relatórios.	Baixo à médio, vai variar dependendo da divulgação externa	Atualizada conforme novas informações obtidas

Fonte: Autoria Própria, (2026).

De modo geral, os resultados apresentados no Quadro 1 reforçam que cada plataforma possui lógica de funcionamento própria, associada a diferentes formatos e dinâmicas de produção de conteúdo. Essa diversidade, embora amplie as possibilidades de atuação, também evidencia limitações quando as plataformas são utilizadas de forma isolada. Assim, a adoção de estratégias integradas, baseadas no uso combinado das mídias digitais, mostra-se essencial para otimizar o alcance e o engajamento dos diferentes públicos-alvo.

Nesse sentido, a estratégia multiplataforma configura-se como elemento central para a ampliação do alcance e a qualificação da disseminação das informações, permitindo a adequação da linguagem e do formato dos conteúdos às especificidades de cada público.

Destaca-se a relevância de práticas como o reaproveitamento e a adaptação de conteúdos entre plataformas de mídias sociais, estratégias amplamente utilizadas no contexto digital contemporâneo. Essas abordagens contribuem para a otimização de tempo e recursos, além de favorecerem a manutenção da frequência de publicações, fator essencial para o engajamento contínuo dos públicos. Nesse sentido, mais do que a escolha de uma plataforma isolada, evidencia-se a necessidade de construção de ecossistemas de comunicação integrados, nos quais diferentes ferramentas atuem de forma complementar (Figura 2).



Figura 2 – Fluxograma do reaproveitamento de conteúdo para maior engajamento e otimização de tempo.
Fonte: Elaborado com auxílio da inteligência artificial NotebookLM (2026).

Com base nessas informações, evidencia-se a pertinência da implementação integrada de múltiplos canais digitais voltados à divulgação e comunicação científica. Nesse sentido, o projeto adotou, em sua fase inicial, o uso de plataformas de mídias sociais como Instagram e LinkedIn, além do desenvolvimento de um site institucional (Figura 3). A seleção dessas ferramentas fundamenta-se em seus potenciais complementares, buscando equilibrar alcance, acessibilidade e profundidade na disseminação das informações.

Os canais encontram-se em processo de estruturação, orientados por uma identidade visual unificada, composta por título e logomarca (Figura 4), com o objetivo de garantir coesão entre as diferentes mídias e fortalecer o reconhecimento do projeto, evitando sobreposições com iniciativas semelhantes.

O projeto foi intitulado “Vozes das Águas: Quando a Água Encontra a Cidade”, tendo sua identidade visual e logotipo desenvolvidos com o apoio de ferramentas de inteligência artificial.



Figura 3 – Identidade visual utilizada no site institucional do projeto.
Fonte: A logomarca foi gerada por inteligência artificial no Chat GPT (OpenAI, 2025) a partir da descrição das autoras.



Figura 4 – Logomarca desenvolvida para as plataformas digitais do projeto de divulgação e comunicação científica
Fonte: A logomarca foi gerada por inteligência artificial no Chat GPT (OpenAI, 2025) a partir da descrição das autoras.

Por fim, ressaltando que as estratégias de divulgação e comunicação científica estão diretamente ligadas às práticas de ética no processo de curadoria e à disseminação de informações. Destacando a importância de assegurar a confiabilidade dos conteúdos compartilhados, evitando a divulgação de dados ainda não validados e consolidados, bem como respeitando os princípios de integridade científica. Um cuidado fundamental para garantir a credibilidade das iniciativas e o fortalecimento da relação de confiança entre a ciência e a sociedade.

Conclusão

A análise das plataformas digitais evidenciou que a efetividade das ações de divulgação e comunicação científica está diretamente associada à adoção de estratégias de multiplataformas. Tal abordagem mostra-se necessária, uma vez que nenhuma ferramenta, de forma isolada, é capaz de atender de maneira abrangente aos diferentes perfis de público e às múltiplas demandas de disseminação do conhecimento

Observa-se que cada plataforma apresenta especificidades que determinam seu papel no ecossistema comunicacional: Instagram, Facebook e TikTok destacam-se pelo elevado potencial de engajamento e pela capacidade de traduzir conteúdos científicos em formatos mais acessíveis e atrativos; YouTube, Reddit e LinkedIn apresentam características intermediárias, permitindo tanto a ampliação do alcance quanto o aprofundamento das discussões; enquanto os sites institucionais se consolidam como espaços voltados à comunicação científica, direcionados a públicos mais especializados e acadêmicos.

Nesse contexto, a integração entre plataformas amplia significativamente o alcance das ações e o engajamento dos públicos, ao mesmo tempo em que favorece a diversificação das audiências e a adaptação das linguagens comunicacionais. Destaca-se, ainda, o reaproveitamento estratégico de conteúdos entre diferentes mídias como prática eficiente para otimização de recursos e manutenção da frequência de publicações. Dessa forma, a construção de um sistema comunicacional integrado potencializa a disseminação do conhecimento científico e contribui para o fortalecimento do engajamento social e da sensibilização ambiental.

A implementação prática das estratégias propostas, por meio de canais digitais interativos e de uma identidade visual unificada, encontra-se em desenvolvimento. Essa etapa permitirá a aplicação dos resultados obtidos na análise bibliográfica, bem como o aprimoramento contínuo das estratégias ao longo do tempo. Ressalta-se, ainda, a importância da adoção de princípios éticos na curadoria e no compartilhamento de informações, especialmente quanto à confiabilidade dos dados e à transparência das fontes, aspectos fundamentais para a credibilidade das iniciativas científicas.

Por fim, este estudo contribui para o avanço das discussões sobre estratégias de divulgação e comunicação científica no contexto do monitoramento ambiental, com ênfase na qualidade da água em áreas urbanas. Como perspectiva futura, destaca-se a realização de análises quantitativas do desempenho das plataformas, com base em métricas de alcance, engajamento e impacto, de modo a ampliar a compreensão sobre a efetividade das estratégias adotadas e subsidiar seu aprimoramento contínuo.

Comentários finais

As autoras destacam que o processo de implementação prática das estratégias analisadas, por meio da criação das plataformas de mídias sociais, encontra-se em fase de desenvolvimento. Dessa forma, os canais digitais ainda não estão abertos para o público, e em processo de estruturação e consolidação, não estando plenamente disponibilizados até o momento.

Ressaltando que a continuidade dessa etapa demandará mais tempo para ajustes, validações e aprimoramentos, configurando como uma oportunidade para estudos futuros voltados à avaliação do desempenho e do impacto dessas iniciativas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e a CNPq pela concessão da bolsa de estudos e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA).

Referências Bibliográficas

BUENO, W. C. **Comunicação científica e divulgação científica: aproximações e rupturas conceituais**. Informação & Informação, [S. l.], v. 15, n. 1esp, p. 1–12, 2010. Disponível em: https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/informacao/article/view/6585. Acesso em: 7 set. 2025.

CAMPOS, Roger F. F. *et al.* **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E DO SANEAMENTO AMBIENTAL NO CONTEXTO DO ODS 6:** UM ESTUDO DE UM CÓRREGO URBANO EM CAÇADOR (SC), BRASIL. Revista De Geopolítica, 16(5), e1022. https://doi.org/10.56238/revgeov16n5-187. Acesso em: 30 de abr. de 2026.

CORTEZ, H. **Aquecimento Global e Água**. 1. ed., [S. 1.], 2004. Disponível em: http://www.ipcp.org.br/References/Agua/aguaCiclo/AquecimentoGlobal.pdf. Acesso em: 7 set. 2025.

DALZOTTO, Edilaine. **Avaliação dos projetos de educação ambiental: estudo de caso em escola do noroeste do Paraná.** 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática) – Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Maringá, 2011. Disponível em: http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/4419/1/000184608.pdf. Acesso em: 7 set. 2025.

GIACOMETT, Julia et al. **Pesca em foco: divulgação e extensão em tempos de pandemia.** Revista Brasileira de Extensão Universitária, v. 12, n. 3, p. 433-444, 2021. Disponível em: https://periodicos.uffs.edu.br/index.php/RBEU/article/view/12480. Acesso em: 7 set. 2025.

LIRA, O. de O. **Curso de Fluoretação para operadores de Estação de Tratamento de Água**. Itabirito, 2005. 91 p.

OLIVEIRA, Janaina da Silva. **Divulgação científica:** análise do perfil do Instagram @bioinvertifpb. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Princesa Isabel, 2024. Disponível em: https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/4550. Acesso em: 7 set. 2025.

QUARESMA, Thiago J. C. et al. **Impactos do Processo de Urbanização na Qualidade de Água no Brasil:** uma revisão sistemática. Revista DELOS, Curitiba, v. 17, n. 60, p. 01-06. 2024. DOI: 10.55905/rdelosv17.n60-003. Acesso em: 30 de abr. de 2026.

RODRIGUES, Letícia Freitas. **"O Lago tá pra Peixe":** proposta de educação ambiental e divulgação científica utilizando a rede social Instagram. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Biociências, Porto Alegre, 2021. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/243227. Acesso em: 07 set. 2025.

SANTANA, C. A.; FREITAS, F. A. D. **Educação Ambiental para a Conscientização Quanto ao Uso da Água**. Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental, Programa de Pós-graduação em educação ambiental, 2012.

STATISTA. **Most popular websites worldwide as of November** 2024, by total visits. 2024. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/1201880/most-visitedwebsites-worldwide/. Acesso em: 07 set. 2025.

TELLES, Eugênio. **Comunicação científica vs divulgação científica:** descubra diferenças e semelhanças. Periódico Eletrônico, 20 mar. 2024. Atualizado em: 18 fev. 2025. Disponível em: https://periodicoeletronico.com.br/comunicacao-cientifica-vs-divulgacao-cientifica-descubra-diferencas-e-semelhancas. Acesso em: 11 ago. 2025.

VALÉRIO, Marcelo; TAKATA, Roberto. Afinal, o que é Divulgação Científica? Explanação e Proposição de uma Definição Plural. Pro-Posições. V.36. Campinas, SP. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1980-6248-2024-0047BR. Acesso em: 30 de abr. de 2026.

A ARTE COMO ARQUIVAMENTO SENSÍVEL DAS RELAÇÕES: BLOCOS DE SENSAÇÕES E MODELAGEM 3D

1 Luiz Carlos de Oliveira Ferreira, 2 Maria Luiza Almeida Cunha de Castro, 3 Cynara Fiedler Bremer
Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: lcdeoliveiraferreira@ufmg.br; Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: luizadecastro2000@gmail.com; Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: cyfiedler@gmail.com

Palavras-chave: bloco de sensações; Serra do Curral; modelagem 3D

Resumo

Este artigo analisa uma experiência pedagógica desenvolvida com estudantes do curso de Design da Universidade Federal de Minas Gerais na disciplina de Biônica e Biomimética, a partir do contato com plantas ameaçadas de extinção da Serra do Curral. Fundamentado teoricamente em Gilles Deleuze e Félix Guattari, o estudo adota uma abordagem qualitativa de base teórico-prática, voltada à compreensão dos sentidos, vínculos e deslocamentos produzidos ao longo da experiência. O corpus reúne registros do processo, modelos tridimensionais, esculturas impressas, exposição pública e respostas a questionário on-line. A atividade articulou observação, fotogrametria, modelagem tridimensional, impressão e criação visual tridimensional, resultando em modelos de *Vellozia barbacenia* e *Arthrocereus glaziovii*, bem como em esculturas híbridas expostas no hall da Escola de Arquitetura da UFMG. A análise evidenciou que, quando atravessadas pela prática artística e pela reflexão teórica, tais técnicas atuam além de decalque da vida vegetal passando, assim, a constituir dispositivos de produção relacional, capazes de gerar deslocamentos perceptivos, reconfigurações da produção de sentidos e novas formas de vínculo com o vegetal e com o território. Os resultados também indicam que a repetição das operações técnicas, longe de reconduzir ao mesmo, produziu diferença, variação e novas camadas de elaboração sensível. Conclui-se que a arte pode, portanto, atuar como forma de arquivamento sensível das relações, preservando também perceptos, afetos, memórias e territórios.

Introdução

A Serra do Curral constitui uma paisagem cultural simbólica para Belo Horizonte e vem sendo submetida a pressões persistentes em consequência da mineração. Nesse contexto, a ameaça às espécies vegetais não se restringe à dimensão ecológica, mas alcança o conjunto de relações que articulam vegetação, paisagem, memória e cultura. Na área do Complexo Minerário Serra do Taquaril, foram identificadas 121 espécies ameaçadas, conforme Crespo (2015) e o relatório da Golder Associates Brasil Consultoria e Projetos Ltda (2019), o que evidencia a amplitude ecológica e simbólica do problema. É nesse cenário que se insere a experiência pedagógica analisada neste artigo, desenvolvida com cinco estudantes do curso de Design da Universidade Federal de Minas Gerais, na disciplina de Biônica e Biomimética. Durante a disciplina, procedimentos de fotogrametria, modelagem tridimensional, criação visual e impressão foram articulados em um mesmo processo. Mais do que tomar as plantas ameaçadas como objetos isolados, a experiência buscou explorar as possibilidades abertas pela arte para a preservação das espécies e para a reflexão sobre a gestão do patrimônio natural e cultural, situando o trabalho no campo das mediações entre conhecimento científico, imaginação e sensibilização pública.

Destarte, o artigo não se dedica à descrição técnica do conjunto de práticas, mas à análise de como essas práticas articulam sentidos ao aproximar plantas ameaçadas, cotidiano e processos criativos. Este percurso resultou não apenas em modelos tridimensionais das espécies vegetais, mas, também, em três esculturas híbridas impressas e expostas em conjunto: uma *Vellozia barbacenia* convertida em abajur, um modelo derivado de *Arthrocereus Glaziovii* articulado a um regador e outro associado a um sapato. Ao articular as plantas com objetos do cotidiano, essas produções evidenciam um processo de aproximação entre vegetal, cotidiano, imaginação e sociedade. Assim, o que será observado não são apenas os resultados materiais, mas as relações e sentidos produzidos no percurso, os momentos de diferença e repetição, bem como os movimentos de territorialização, desterritorialização e reterritorialização nos quais os elementos inicialmente vinculados ao campo científico e ambiental passam a ser reinscritos no domínio da experiência sensível e cultural. As produções, nesse contexto, não constituem fins em si mesmas, mas emergem como materialização dessas articulações de sentido.

É nesse contexto que os conceitos de bloco de sensações, percepto e afeto ganham relevância. Interessa aqui pensar a arte como conservação de blocos de sensações, isto é, como prática capaz de sustentar perceptos e afetos para além da experiência imediata (Deleuze; Guattari, 1997b; Machado, 2009; Rolnik, 2018). Conforme Deleuze e Guattari "o que se conserva, a coisa ou a obra de arte, é um bloco de sensações, isto é, um composto de perceptos e afectos. Os perceptos não mais são percepções, são independentes do estado daqueles que os experimentam; os afectos não são mais sentimentos ou afecções, transbordam a força daqueles que são atravessados por eles."(Deleuze; Guattari, 1997b, p.213)

Na atual pesquisa, parte-se da compreensão de que a experiência com o mundo envolve encontros que geram deslocamentos nas formas de ver, sentir e compreender a realidade por meio de "mudanças no diagrama de vetores de forças e das relações entre eles, produzindo novos e distintos efeitos" (Rolnik, 2018, p. 53). Esses encontros - com pessoas, objetos, paisagens, ideias ou obras - mobilizam os conceitos de percepto e afeto, formulados por Gilles Deleuze e Félix Guattari, para designar modos de experiência que excedem a percepção ordinária e as emoções psicológicas. O percepto - distinto de percepção - refere-se a atmosferas sensíveis que ultrapassam a representação imediata das situações vividas, enquanto o afeto - distinto de afeição, mais relacionado ao verbo afetar - diz respeito a intensidades vitais capazes de afetar e transformar o corpo e a

experiência (Rolnik, 2018). Esses conceitos permitem pensar a arte como campo de produção de sensibilidades que não se esgotam em formas ou significados explícitos, mas operam na constituição de novos modos de sentir e de se relacionar com o mundo, perspectiva que orienta a análise desenvolvida neste artigo

Sob essa perspectiva os conceitos nos interessam, aqui, por permitirem sustentar as análises sobre a experiência pedagógica realizada, que atua nas produções de sentido e objetos artísticos. Assim, as materialidades desenvolvidas foram capazes de articular relações e deslocamentos produzidos ao longo do processo. Podemos, então, entender que os modelos 3D e as esculturas impressas não carregam, por si sós, e isoladamente, os perceptos e afetos; eles só se tornam potentes quando reinseridos no conjunto de relações que os produziu. É a articulação entre ciência, arte, tecnologia e educação que lhes permite a passagem como operadores de um bloco de sensações. O que se conserva, então, é um campo relacional que inclui encontros, deslocamentos perceptivos, operações técnicas, fabulações e modos de atenção.

A experiência não se orientou de maneira única, mas por um gesto reiterado de operações técnicas e teóricas. E, se o conceito de bloco de sensações permite compreender o que se conserva na obra de arte, a noção de diferença e repetição permite compreender como esse campo sensível se produz ao longo do desenvolvimento da disciplina. A questão, portanto, é analisar como as esculturas, elaboradas em um processo repetitivo, abriram variações e deslocamentos de sentido.

Na filosofia de Deleuze, a diferença é constituída pela potência primária de criação, e não um derivado da identidade (Deleuze, 2006). A repetição, nesse sentido, não é o retorno do idêntico, mas o ato que permite à diferença se manifestar. Como sintetiza Ádamo da Veiga (2020, p. 250), “repetir, para Deleuze, é sempre repetir uma diferença”. Esse conceito permite compreender o processo desenvolvido sobre um mesmo objeto como um conjunto de reiterações que deslocam o vegetal para novas possibilidades de sentido e experimentação. A repetição técnica ao incidir sobre o mesmo objeto produz diferença; os objetos impressos revelam esse movimento em que a planta não permanece intacta, variando seu material e relações simbólicas que reconfiguram seus sentidos e territórios.

O conceito de território é entendido, neste artigo, não como suporte físico estável, mas como consistência expressiva produzida por ritmos, marcas, vínculos e mobilidades. Como afirmam Deleuze e Guattari (1997a, p. 132), “o território é, ele próprio, lugar de passagem”; um espaço que se movimenta continuamente, ainda que fisicamente estagnado; um espaço construído nas relações simbólicas, no qual “a geograficidade se revela como imanência de agenciamentos territoriais e fortemente aberta à imaginação” (Amparo, 2019, p. 84). Podemos, então, compreender a experiência pedagógica como composição entre materialidade, imaginação e relação territorial. Nesse processo pedagógico a desterritorialização, por sua vez, se refere aos movimentos pelos quais a experiência pedagógica desfaz enquadramentos prévios e desloca a planta de sua posição estabilizada. A reterritorialização nomeará as novas consistências produzidas em que a experiência e práticas da disciplina - os modelos digitais, esculturas híbridas, exposição e questionário - reconfiguram as relações entre vegetal, técnica, cotidiano e imaginação. Isso significa que a experiência pedagógica reinsere as plantas em processos de territorialização, desterritorialização e reterritorialização. Assim, o território se reconfigura no próprio movimento da experiência.

A partir desse levantamento conceitual é importante também pensar na distinção entre mapa e decalque. Quando a modelagem tridimensional é tomada como reprodução da forma vegetal, aproxima-se do decalque; quando passa a construir percursos através das experimentações, aproxima-se do mapa. Amparo (2019) argumenta que o decalque tende a obscurecer as relações de poder inerentes ao espaço ao tratar o socius como unidade homogênea, reduzindo sua complexidade e suas assimetrias. Essa operação produz uma representação parcial da realidade, ao apresentar um recorte como totalidade coerente. Nessa perspectiva, o espaço não deve ser compreendido apenas como coexistência de sujeitos, mas como resultado de agenciamentos múltiplos, atravessados por diferentes ordens e estratégias em permanente disputa e negociação com a ordem hegemônica. Enquanto o decalque se limita a reproduzir, o mapa constitui, segundo Amparo (2019), uma “cartografia da existência”, isto é, um conjunto de ações que participam da própria construção da realidade.

Essa distinção está explícita na formulação de Gilles Deleuze e Félix Guattari, para quem o mapa se opõe ao decalque por não reproduzir uma estrutura prévia, mas por se constituir em experimentação com o real. O mapa permanece aberto, conectável e passível de transformações contínuas, articulando elementos heterogêneos e permitindo novas relações. Dessa forma, o espaço deixa de ser entendido como configuração estável e passa a ser concebido como processo, produzido por conexões, deslocamentos e recomposições.

Essa formulação permite deslocar a noção de território de uma compreensão exclusivamente física para uma perspectiva relacional. No caso da experiência pedagógica analisada, o território se constitui no próprio agenciamento entre vegetais, estudantes, técnicas de registro, modelagem, impressão, exposição e reflexão posterior. Falar em desterritorialização, nesse contexto, significa deslocar a planta de um enquadramento estabilizado para novas relações de sentido, nas quais o vegetal passa a integrar um campo ampliado de experimentação estética, técnica e cultural. Essa formulação é importante para o artigo porque permite deslocar a noção de território de uma compreensão apenas material para uma compreensão relacional.

Destarte, a modelagem tridimensional deixa de ser compreendida como procedimento neutro e inerte. O que está sendo articulado é a capacidade de um processo técnico se abrir a novas conexões, produções de sentido, desvios e recomposições, em um movimento aberto. O mapa, assim, não substitui o decalque por inteiro, mas tensiona seus limites ao introduzir mobilidade e abertura de sentidos na experimentação artística. A contribuição dessa distinção para o artigo é fundamental, pois permite compreender que o problema não está na modelagem tridimensional em si, mas na forma em que ela opera; interrogando-se se ela constitui uma cartografia aberta a relações.

Por fim, os conceitos levantados no presente artigo não são empregados de forma isolada, mas articulados e, em conjunto, compõem o arcabouço conceitual que permite compreender a experiência analisada. Essa articulação estrategicamente

permite observar a modelagem tridimensional, a impressão e a criação visual compreendidas como práticas capazes de produzir deslocamentos e revelar, reabrir, vínculos com o vegetal. A hipótese do artigo é que, ao articular arte, tecnologia e reflexão crítica, a prática pedagógica permitiu analisar a arte como operador de arquivamento sensível das relações entre plantas e sociedade. Assim, a arte pode contribuir para a preservação por produzir mapas capazes de captar forças relacionais, sustentar blocos de sensações e fazer da repetição um operador de diferença.

Material e Métodos

O presente artigo caracteriza-se como um estudo qualitativo de base teórico-prática, tendo base teórica referencial centrada em Gilles Deleuze e Félix Guattari e, fundamentação metodológica, orientada pelas formulações de Bauer e Gaskell sobre pesquisa qualitativa. Assim o qualitativo é compreendido como uma escolha que atua, principalmente, sobre o desenvolvimento de dados e métodos de análise, privilegiando procedimentos interpretativos. O interesse do estudo não recai, portanto, sobre a mensuração estatística de respostas e produtos, mas sobre a compreensão dos sentidos, das percepções e das relações produzidas na experiência pedagógica (Bauer; Gaskell; Allum, 2002).

Essa orientação também se justifica porque, para Bauer e Gaskell, o espectro dos dados acessíveis à pesquisa social "vai além das palavras pronunciadas nas entrevistas" (Bauer; Gaskell, 2002, p. 15), abrangendo outras formas de texto, imagem e materiais comunicacionais. Tal formulação é especialmente pertinente a este artigo, pois o material empírico da pesquisa inclui também registros visuais, modelos tridimensionais, objetos impressos, além das respostas discursivas produzidas pelos estudantes ao longo da disciplina

O material de pesquisa é constituído por uma experiência pedagógica - desenvolvida com cinco estudantes durante o segundo semestre 2025 na disciplina de Biônica e Biomimética - a partir do contato com plantas ameaçadas da Serra do Curral, envolvendo procedimentos de observação, registro fotográfico, fotogrametria, modelagem tridimensional, impressão 3D, criação visual e aplicação de questionário qualitativo on-line. A experiência desdobrou-se, ao final, na realização de três esculturas impressas e expostas em conjunto no hall do prédio da escola de arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais: uma *Vellozia barbacenia* híbrida em abajur, um *Arthrocereus glaziovii* articulado a um sapato e um cacto, inspirado na Arthrocereus, colado a um regador. Tais elementos são tratados como resultados e materialidades articuladas de um mesmo processo de pesquisa e criação.

Tecnicamente a experiência desenvolveu-se a partir do registro fotográfico de exemplares de *Arthrocereus glaziovii* e *Vellozia barbacenia* localizados no Museu de História Natural e Jardim Botânico de Belo Horizonte, em articulação com os coordenadores da instituição e de seu setor de pesquisa. As imagens foram produzidas com câmera de celular Redmi 13 pro e processadas por fotogrametria tridimensional no software Kiri Engine, com prioridade para a geração de malhas poligonais voltadas à impressão 3D. Testou-se também o procedimento de *gaussian splatting*; contudo, considerando o objetivo de materialização das peças, optou-se pela malha poligonal padrão. Posteriormente, os modelos foram tratados e transformados poeticamente nos softwares Rhino 3D e Blender, articulados com modelos 3D oriundos de bancos de dados gratuitos. A impressão das peças foi realizada em parceria com o Laboratório de Experimentação Tridimensional (LabExp3D).

O questionário qualitativo *on-line* integrou a pesquisa como instrumento de produção de dados escritos pelos próprios participantes e foi composto por questões abertas e fechadas. As questões fechadas foram utilizadas de modo descritivo sem pretensão de levantamento quantitativo. As questões abertas, por sua vez, permitiram acompanhar as percepções e dificuldades dos estudantes acerca da disciplina, da relação com os vegetais, dos procedimentos técnicos e de seus desdobramentos. Assim, o questionário atua, neste artigo, como dispositivo complementar de elaboração discursiva da experiência. Sua adoção também se justifica por vantagens operacionais, como rapidez, economia e organização do material obtido (Castro et al., 2016). Ainda assim, é necessário reconhecer seus limites: nem todos os estudantes responderam ao instrumento, e a profundidade das respostas foi desigual, aspecto já apontado na literatura sobre questionários *on-line* (Salvador et al., 2020). O instrumento de coleta e o banco de respostas utilizados na pesquisa permanecem arquivados pelo autor e poderão ser disponibilizados para consulta acadêmica mediante solicitação, resguardados os aspectos éticos e a confidencialidade dos participantes.

Nessa chave, a análise buscou identificar transformações nas relações estabelecidas entre estudantes, plantas, imagens, objetos e território. As noções de território, desterritorialização e reterritorialização foram mobilizadas como operadores analíticos, assim como os conceitos de bloco de sensações, percepto e afeto. Os procedimentos técnicos foram compreendidos para além de sua dimensão instrumental: quando atravessados pela prática artística, deixaram de operar apenas como recursos de registro para constituírem dispositivos de produção relacional. A repetição de operações como observar, fotografar, modelar, imprimir, compor e responder ao questionário não foi tratada como redundância, mas como reiteração produtora de variação, deslocamento perceptivo e reformulação do próprio problema da preservação.

Desse modo a metodologia da pesquisa se define por uma abordagem qualitativa que reúne, em um mesmo *corpus*, diferentes materialidades relacionadas a um único problema. O objetivo foi compreender como uma experiência pedagógica, mediada por procedimentos técnico-artísticos e por registros discursivos dos participantes, foi capaz de produzir novas formas de atenção ao vegetal ameaçado e de elaborar, no campo da arte, um arquivo sensível das relações. O que orienta a análise é a hipótese de que a devastação minerária ameaça um campo relacional mais amplo, constituído por perceptos, afetos, memórias, ritmos territoriais e modos de coexistência.

Resultados e Discussão

Os resultados da experiência pedagógica foram analisados como expressão de um processo relacional, um processo que se movimenta. Os modelos tridimensionais originais de *Vellozia barbacenia* e *Arthrocereus glaziovii* (Figura 1) não operaram apenas como captura neutra da morfologia vegetal: vinculados ao vaso, ao substrato e ao contexto das plantas, esses modelos conservam algo de sua condição relacional, material e imaterial. Quando atravessada pela experiência artística e pedagógica, a técnica passa a funcionar como dispositivo de aproximação, reinscrição e deslocamento da construção de sentidos; deixam de operar apenas como decalque da forma e passam a constituir mapas relacionais e móveis.

A repetição atua como operador metodológico. A repetição não é entendida como retorno do mesmo, mas como processo capaz de produzir variação e diferença. Para se realizar a fotogrametria de uma planta tivemos que fotografar exaustivamente a mesma, de diversos ângulos. Essas repetições foram coladas, incorporadas, e repetidas em um modelo digital que passou a compor uma unidade formada por repetidas fotos. Desse modo, o procedimento técnico não se reduz à forma, mas se configura com prática que, ao reiterar o encontro com o vegetal, produz novas camadas de percepção e de sentidos.

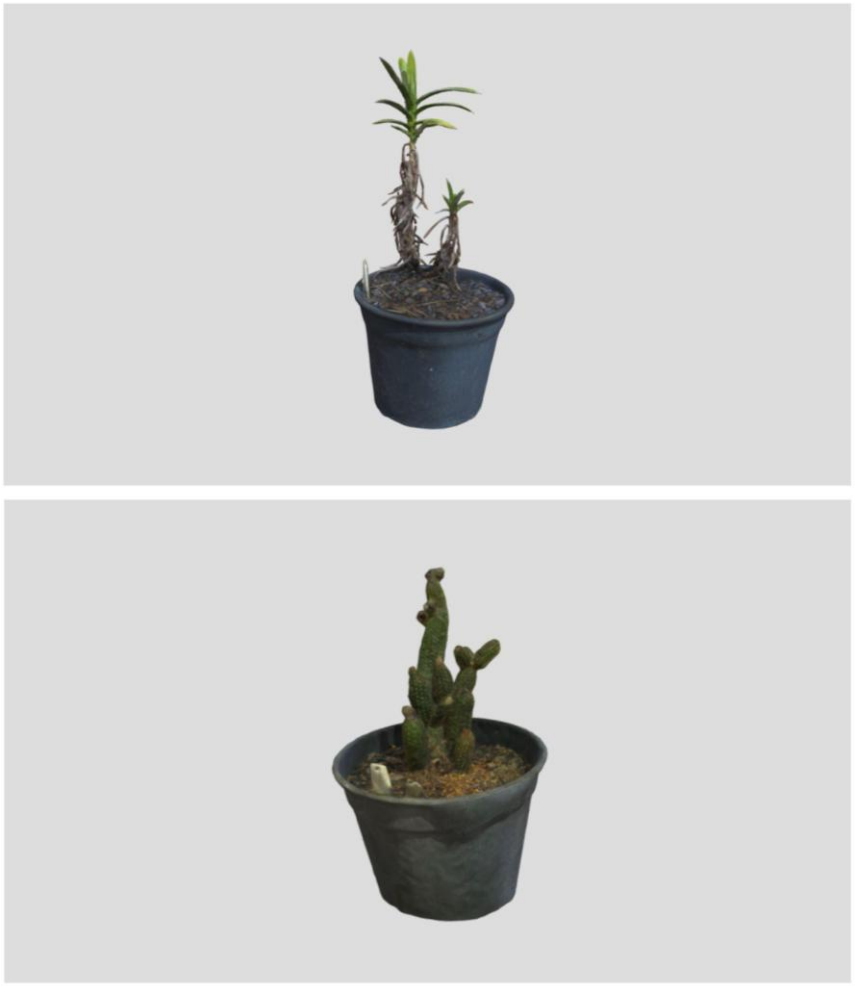


Figura 1: Modelo tridimensional da *Vellozia barbacenia* e *Arthrocereus glaziovii* .
Fonte: Acervo da pesquisa (2025).

Essas diversas fotos que compõem a unidade do modelo digital são a somatória das relações, dos afectos e perceptos que orientaram a produção e criação. Como diversos *frames* de filmes em um só instante, constituem um processo que tensiona sua condição de decalque da planta, emergindo a cartografia da planta, como um mapa, ainda que de fato, em sua imagem, talvez não o revele. Essa análise também é clarificada quando se observa a passagem dos modelos digitais às esculturas híbridas impressas e expostas no hall do prédio (Figura 2). O conjunto formado por uma *Vellozia barbacenia* integrada a um abajur, um *Arthrocereus glaziovii* associado a um sapato e outro cactos articulado a um regador demonstram que o processo avançou para uma etapa de criação visual em que o vegetal entra em composição com objetos do cotidiano. Trata-se de um dado relevante para as análises pois mostra que a planta e sua modelagem não se encerraram em si, mas se desdobraram em aspectos relacionais, próprios dos encontros entre os alunos e as plantas, estabelecendo novas relações e produzindo sentido.



Figura 2: Esculturas impressas e expostas no Hall.
Fonte: Acervo da pesquisa (2025).

Ao extrapolar o ambiente estritamente didático e ocupar um espaço de circulação e também de exposição, os trabalhos deixaram de se relacionar apenas com os participantes da disciplina e passaram a instaurar situações de interação com um público mais amplo. Nesse deslocamento, o hall do prédio funciona problematizando reconfigurando o território no qual se inserem as plantas em estudo. Aquilo que havia começado como aproximação técnica e pedagógica torna-se presença partilhável, tensionando os processos de desterritorialização e reterritorialização dos vegetais observados. As esculturas interrompem o cotidiano e produzem interpretações diante do estranhamento. Muda-se o percepto, dentro de uma nova atmosfera sensível, trazendo uma nova forma de ser; produz-se afeto, causando impacto, chamando atenção. Com isso o processo produz situações que atravessam simbolicamente nossas relações com os vegetais e com o patrimônio cultural, a Serra do Curral.

Nesse contexto, as esculturas podem ser compreendidas como blocos de sensações, pois não operam somente como representação botânica, porém tensionam os sentidos como arquivadores sensíveis de perceptos e afetos. A peça que converte a planta em abajur desloca o vegetal para um novo espaço, aberto e móvel, de intimidade doméstica, de relação com a luz, com abrigo e indústria, provocando uma abertura em seus sentidos, em seu decalque, que antes estava fechado em si mesmo.

Em todos os três casos de produção escultórica, o que se retém ao observador e produtor vai além da forma, levando a uma experiência de uma atmosfera sensível que excede a unidade do objeto, revelando as condições móveis das produções de sentido e das relações. As esculturas tensionam e revelam, por fissuras, os perceptos e afetos que não se reduzem ao objeto, mas na experiência artística (Deleuze; Guattari, 1997b; Machado, 2009; Rolnik, 2018). As esculturas desenvolvidas se configuram, assim, como variações produzidas a partir de um mesmo campo experimental.

Contudo, o deslocamento operado não ~~o~~ desvincula do território de sua origem e de sua função; ao contrário, abre uma nova reterritorialização de sua própria origem e funcionalidade, agora contextualizada pela articulação entre paisagem ameaçada, prática artística, memória e espaço expositivo. Desse modo, o território/as plantas deixam de ser entendidos como suporte físico isolado e passam a ser reconhecidos como produtos expressivos desenvolvidos por vínculos, ritmos, marcas e passagens.

Assim, se o decalque tenderia reproduzir a forma vegetal em uma transferência a um suporte, as esculturas operam adicionalmente como mapas, pois registram e revelam percursos, conexões e desvios produzidos ao longo da experiência. Elas potencialmente arquivam uma cartografia das relações entre vegetal, design e cotidiano. O que se condensa, e pode ser revelado em uma observação, é um campo relacional mais amplo, no qual a Serra do Curral, suas plantas e sua relação com sociedade se dá em campo mútuo, em forças simultâneas, produtora de sentidos em seus vínculos. As esculturas explicitam, assim, a relação do decalque com o mapa: um diálogo dentro do qual a arte pode atuar como forma de arquivamento cartográfico, tensionando mapa e decalque.

O questionário operou na pesquisa como uma das camadas de aporte de subsídios para a análise interpretativa. O número reduzido de alunos e respostas impede generalizações e enfraquece quantificações. Ainda assim, as respostas nos permitem observar que a experiência não foi homogênea. Elas mostram, portanto, que os deslocamentos produzidos pelo processo não refletiram uma unicidade, mas se desenvolveram de formas distintas, conforme repertórios próprios e modos de elaboração de cada participante. Elas demonstraram assim a flexibilidade desenvolvida durante o percurso, o que é coerente com a pesquisa: a repetição do processo não reconduziu todos os participantes ao mesmo lugar, mas produziu diferenças de elaboração na criação visual e de sentidos. Um dos alunos afirma que “foi interessante perceber como um processo simples pode se transformar em um conceito complexo”, destacando que “o uso de novas ferramentas, principalmente da fotogrametria, abriu a possibilidade para projetos mais criativos, com resultados disruptivos” (aluno 1, questionário on-line, 2025). Também observamos que os dados revelam um deslocamento da planta para um campo mais amplo de relações sociais e poéticas. Um dos participantes afirma que, “em relação às plantas em si”, não houve grande mudança, “mas em relação ao ambiente, consegui entender os aspectos formais que ajudam a obter um melhor resultado na fotogrametria”. Outro observa que “de certa forma”, houve mudança com relação às plantas , pois “as explicações sobre elas me deram novas perspectivas sobre elas” (aluno 3, questionário on-line, 2025). Em conjunto, as respostas indicaram que

a experiência foi vivida como campo de experimentação, no qual a técnica não encerrou o processo, mas sim abriu linhas de fuga para novos modos de pensar e produzir. As respostas sobre a passagem do modelo digital ao objeto impresso revelam que a técnica não foi percebida como meio transparente, inerte ao ambiente. Um respondente escreve que a impressão foi "um pouco frustrante devido às dificuldades de execução de certos formatos e ideias na impressora 3D: algumas partes quebraram com facilidade. Pensar na sustentação foi um desafio" (aluno 2, questionário on-line, 2025). Um terceiro pontuou que "o fato de ter feito a fotometria e as observado de perto já ajudou a entender algo sobre elas" (aluno 3, questionário on-line, 2025) Foi possível verificar que a impressão 3D participa ativamente da conformação do trabalho. A técnica oferece possibilidades, impõe resistências e exige reconfigurações. A modelagem não aparece como reprodução fiel de um referente, como um decalque isolado, mas, também, como cartografia de relações que se tornam sensíveis no próprio processo.

Por fim, os questionários ajudaram a esclarecer um dos pontos centrais da discussão: os blocos de sensações não residem nas esculturas em si, isoladamente. As respostas indicam que a potência do processo se constituiu nas relações oriundas das próprias experiências e experimentações. Essas dimensões não se encontram nos objetos em si, mas nos deslocamentos gerados durante o percurso. Como descrito por outro aluno, "o que aprendi pode ser aplicado aos projetos desenvolvidos na faculdade, deixando-os mais ricos tanto conceitualmente quanto processualmente" (aluno 1, questionário on-line, 2025), enquanto outro escreve que a experiência "me ajudou a me aprimorar como designer em área que não havia explorado antes" (aluno 3, questionário on-line, 2025). Essa área, à qual o aluno se refere - que é situada além da modelagem e técnica em si - pode ser compreendida como uma área que está nas relações entre plantas, em um processo que tensiona as hierarquias entre as espécies e revelam as produções de sentido e relações entre vegetais, paisagem, sujeitos e sociedade.

Considerações Finais

A análise da experiência pedagógica permitiu compreender que a fotogrametria, a modelagem tridimensional, a impressão 3D e a criação visual quando atravessadas pela reflexão teórica acerca das plantas passaram a constituir um campo relacional que produziu deslocamentos e revelaram a condição relacional da sociedade com os vegetais estudados. Nesse sentido, a pesquisa contribui em sustentar a hipótese de que a arte pode atuar como forma de arquivamento sensível das relações, preservando além da forma da planta, também perceptos, afetos, e modos de coexistência que se articulam entre a vegetação, a natureza, e a sociedade.

Os resultados evidenciam, também, que a técnica não é inerente ao meio, quando atuando dessa maneira. Ao contrário, ela tensiona, condiciona e transforma o próprio processo, impedindo que a modelagem seja compreendida como decalque. A passagem dos modelos digitais às esculturas híbridas, bem como sua exposição em espaço público, mostrou que o processo não se encerrou no decalque, mas se desdobrou para um processo de criação, reterritorialização e produção de novas relações de sentido. Ao serem articuladas a objetos cotidianos, como o abajur, o sapato e o regador, as plantas passaram a compor novas relações simbólicas, materiais e imaginativas. Assim, a experiência indicou que a modelagem 3D, quando inserida em um processo de experimentação, torna-se capaz de operar como mapa, abrindo conexões e sentidos.

A exposição das esculturas no hall da Escola de Arquitetura, ao saírem do contexto restrito da disciplina e ocuparem um espaço de circulação pública, instaurou novas formas de presença para as plantas estudadas. Essa passagem produziu uma ampliação do território da pesquisa, pois reinscreveu os vegetais ameaçados em outro campo de visibilidade, atenção e interpretação. O território, nesse caso, se constitui nas relações móveis entre planta, imagem, objeto, estudante, público e instituição.

A noção de repetição e a observação reiterada das plantas - a produção de múltiplas fotografias, a geração dos modelos, os ajustes digitais, as tentativas de impressão e a composição final das esculturas - produziram variações, modificações, novos vetores e camadas de elaboração. A repetição técnica, nesse contexto, não foi apenas uma etapa operacional, mas um procedimento capaz de intensificar a atenção, aproximar os estudantes das plantas e transformar a percepção sobre o vegetal.

Os questionários, embora limitados pelo número reduzido de participantes e respostas, contribuíram para revelar a heterogeneidade da experiência e reforçar que a potência não se encontra pronta nos objetos isolados, mas nas diferenças e nas relações.

Podemos concluir que a potência do processo encontra-se no conjunto de relações que tornaram possíveis as esculturas, na sua prática reiterada e desdobrada. É nesse campo que se formam os blocos de sensações discutidos ao longo do artigo, como composições sensíveis que emergem das relações entre plantas, sujeitos, território, técnica e imaginação. A arte, nesse sentido, atua como arquivamento sensível: conserva modos de relação e deslocamentos produzidos nas relações interespécies. Assim, o artigo indica que práticas pedagógicas que articulam arte, tecnologia e pensamento crítico podem contribuir para formas ampliadas de preservação, capazes de atuar também no plano sensível e relacional, na produção, e reprodução, de sentidos.

Agradecimentos

Agradeço à professora doutora Cynara Field Bremer, pela condução da disciplina de Biônica e Biomimética e pelo acompanhamento da experiência pedagógica analisada neste artigo. Agradeço também aos estudantes participantes da disciplina, cujos processos de criação, respostas ao questionário e envolvimento com a proposta foram fundamentais para o desenvolvimento da reflexão apresentada. Estendo meus agradecimentos à Inês Ribeiro de Andrade, bióloga e curadora do Herbário da Fundação de Parques Municipais e Zoobotânica; a Carlos Alberto Ferreira Júnior, do Jardim Botânico; e a Marcelo Vichiato, engenheiro agrônomo, gerente do Jardim Botânico, pelo apoio institucional e pela colaboração no contato com os exemplares vegetais e nas diferentes etapas da pesquisa. Agradeço ainda ao Museu de História Natural e Jardim Botânico de Belo Horizonte, pelo suporte à realização do estudo, ao Laboratório de Experimentação Tridimensional (LabExp3D), pelo apoio técnico à materialização das peças, à Universidade Federal de Minas Gerais, pelo ambiente institucional que possibilitou a realização desta pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

AMPARO, Sandoval dos Santos. *Da ordem cósmica à desordem territorial: a geograficidade ameríndia no chão de Abya Yala ou América Latina*. 2019. 706 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.

BAUER, Martin W.; GASKELL, George; ALLUM, Nicholas C. Qualidade, quantidade e interesses do conhecimento: evitando confusões. In: BAUER, Martin W.; GASKELL, George (org.). *Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático*. Tradução de Pedrinho A. Guareschi. Petrópolis, RJ: Vozes, 2002.

BAUER, Martin W.; GASKELL, George (org.). *Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático*. Tradução de Pedrinho A. Guareschi. Petrópolis, RJ: Vozes, 2002.

CASTRO, Fabiana Faleiros Santana et al. Use of virtual questionnaire and dissemination as a data collection strategy in scientific studies. *Texto & Contexto - Enfermagem*, Florianópolis, v. 25, n. 4, e3880014, 2016.

CRESPO, Jeanne Cristina Menezes. *Das "Minas" e suas serras: narrativas de construção das paisagens da mineração no Quadrilátero Ferrífero (MG)*. 2015. 280 p. Tese (Doutorado) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

DELEUZE, Gilles. *Diferença e repetição*. Rio de Janeiro: Graal, 2006.

DELEUZE, Gilles; GUATTARI, Félix. *Mil platôs: capitalismo e esquizofrenia*. v. 4. Tradução de Suely Rolnik. São Paulo: Editora 34, 1997a.

DELEUZE, Gilles; GUATTARI, Félix. *O que é a filosofia?* Rio de Janeiro: Editora 34, 1997b.

FERREIRA, Luiz Carlos de Oliveira. Questionário on-line aplicado aos estudantes da disciplina de Biônica e Biomimética [instrumento de pesquisa]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2025. Documento não publicado.

GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA. *Estudo de Impacto Ambiental: Projeto Complexo Minerário Serra do Taquaril (CMST)*. Belo Horizonte, 2019.

MACHADO, Roberto. *Deleuze, a arte e a filosofia*. Rio de Janeiro: Zahar, 2009.

ROLNIK, Suely. *Esferas da insurreição: notas para uma vida não cafetinada*. São Paulo: n-1 edições, 2018.

SALVADOR, Pétala Tuani Candido de Oliveira et al. Estratégias de coleta de dados online nas pesquisas qualitativas da área da saúde: scoping review. *Revista Gaúcha de Enfermagem*, Porto Alegre, v. 41, e20190297, 2020.

VEIGA, Ádamo Bouças Escóssia da. O excesso do real: Deleuze e a virada especulativa. 2020. 488 f. Tese (Doutorado em Filosofia) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

O FIM NÃO É O FIM: PRA ONDE VAI O SEU RESÍDUO? - DOCUMENTÁRIO SOBRE A GRSU NO MUNICÍPIO DE CAMPINA DO MONTE ALEGRE - SP.

1Alany Becker Pereira, 2Bianca Gomes Pereira, 3Isabelly de Souza Ruiz, 4Julya T. C. Esteves, 5Maria Clara Q. T. Rodrigues, 6Milena Torino Rubio, 7Cláudia Marisse dos Santos Rotta, 8Franciane Mendonça dos Santos

1 Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, e-mail: alanybecker@estudante.ufscar.br; 7 Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, e-mail: francianems@ufscar.br; 8 Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, e-mail: claudiarotta@ufscar.br

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Comunicação ambiental; Educação ambiental

Resumo

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (GRSU) configura-se como um dos principais desafios ambientais contemporâneos, estando diretamente relacionada a problemas como poluição do solo e da água, emissões de gases de efeito estufa e riscos à saúde pública. A destinação inadequada dos resíduos e a baixa adesão a práticas como a coleta seletiva e a reciclagem agravam esses impactos, evidenciando a necessidade de estratégias integradas que envolvam poder público e sociedade.

Esse cenário torna-se ainda mais complexo em pequenos municípios, onde frequentemente há limitações estruturais, técnicas e financeiras para a implementação de sistemas eficientes de gestão de RSU. A escassez de recursos, a dificuldade de acesso a tecnologias adequadas e a baixa capacitação técnica de equipes locais contribuem para a manutenção de práticas inadequadas de manejo dos resíduos, além de dificultarem a consolidação de políticas públicas eficazes.

Inserido nesse contexto, o município de Campina do Monte Alegre (SP) apresenta desafios típicos de cidades de pequeno porte, especialmente no que se refere à organização da coleta, à destinação final dos resíduos e à promoção de ações de educação ambiental. Compreender a realidade local torna-se fundamental para propor estratégias que dialoguem com as especificidades do território e com as necessidades da população.

Nesse sentido, a cultura, a arte e a comunicação ambiental emergem como ferramentas essenciais para ampliar o engajamento social e promover mudanças de comportamento. A utilização de linguagens acessíveis e criativas, como o audiovisual, possibilita a aproximação entre conhecimento científico e comunidade, favorecendo a sensibilização ambiental e o fortalecimento do senso de responsabilidade coletiva.

Diante disso, esse trabalho apresenta a produção de um documentário sobre a gestão de resíduos sólidos no município de Campina do Monte Alegre. O objetivo foi evidenciar o percurso dos resíduos, contribuir para conscientização da população e fortalecer a comunicação ambiental.

A pesquisa adotou abordagem qualitativa, com realização de entrevistas semiestruturadas envolvendo moradores, estudantes, professores, profissionais da saúde, catadores e representantes do poder público. As gravações foram realizadas em diferentes espaços do município, incluindo escolas, áreas urbanas, e locais de destinação final dos resíduos. O documentário foi estruturado em quatro seções, contemplando a contextualização do problema, o papel da escola, a importância da educação ambiental e os processos de destinação dos resíduos. Os resultados evidenciam a relevância do material como ferramenta de sensibilização, ao reunir diferentes perspectivas e apresentar informações de forma acessível.

Conclui-se que o documentário possui potencial para ampliar os debates sobre as lacunas na gestão de resíduos sólidos urbanos no município e também para promover a aproximação entre universidade e comunidade.

Introdução

A geração crescente de resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um dos principais desafios ambientais da sociedade contemporânea. O aumento do consumo, aliado ao crescimento populacional e à urbanização acelerada, tem provocado uma expansão significativa da quantidade de resíduos produzidos nas cidades. Quando esses resíduos não são gerenciados adequadamente, podem gerar impactos ambientais relevantes, como contaminação do solo e da água, emissão de gases de efeito estufa e riscos à saúde pública. Nesse contexto, a gestão adequada dos resíduos sólidos tornou-se uma questão central para a sustentabilidade ambiental e para a qualidade de vida da população (Jacobi; Besen, 2011; Gouveia, 2012).

No Brasil, a gestão dos resíduos sólidos passou a receber maior atenção com a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 de 2010, que estabeleceu diretrizes para a redução da geração de resíduos, incentivo à reciclagem, responsabilidade compartilhada e destinação ambientalmente adequada dos resíduos. Apesar dos avanços legais, ainda existem dificuldades na implementação efetiva dessas políticas, especialmente relacionadas à infraestrutura, planejamento municipal e participação social nos sistemas de gestão de resíduos (Neto, 2010; Jacobi; Besen, 2011).

Esses desafios tornam-se ainda mais evidentes em municípios de pequeno porte, que frequentemente enfrentam limitações técnicas, financeiras e institucionais para implementar sistemas eficientes de gerenciamento de resíduos sólidos. Muitas dessas cidades apresentam baixa capacidade administrativa, dificuldades na implantação de coleta seletiva e limitações

na adoção de tecnologias adequadas de tratamento e disposição final de resíduos. Além disso, a ausência de programas permanentes de educação ambiental e de engajamento comunitário pode dificultar a participação da população na separação e no descarte adequado dos resíduos (Gouveia, 2012).

O município de Campina do Monte Alegre, localizado no interior do estado de São Paulo, apresenta características típicas de municípios de pequeno porte brasileiros. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a cidade possui cerca de 6 mil habitantes e baixa densidade populacional. Informações sobre saneamento indicam que aproximadamente 84,6% da população é atendida pelo serviço de coleta de resíduos domiciliares, embora ainda existam desafios relacionados à universalização dos serviços e à implementação de práticas como a coleta seletiva e a recuperação de materiais recicláveis (De Oliveira, 2022; INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO, 2023) .

Nesse contexto, iniciativas locais de gestão e planejamento ambiental são fundamentais para aprimorar o manejo de resíduos sólidos. O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Campina do Monte Alegre estabelece diretrizes voltadas à redução da geração de resíduos, ao incentivo à reciclagem e à promoção da participação social no manejo adequado dos resíduos. Tais ações estão alinhadas aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos e reforçam a importância da gestão integrada como instrumento para melhorar a qualidade ambiental e a qualidade de vida da população (Prefeitura Municipal de Campina do Monte Alegre, 2025) .

Além das políticas públicas e das soluções técnicas, a sensibilização da sociedade desempenha papel fundamental na gestão ambiental. Nesse sentido, a cultura, a arte e a comunicação ambiental têm se destacado como ferramentas importantes para ampliar o diálogo entre ciência, sociedade e meio ambiente. A comunicação ambiental busca traduzir conhecimentos científicos para diferentes públicos, contribuindo para a conscientização e para a mudança de comportamentos relacionados ao consumo e ao descarte de resíduos. Estratégias baseadas em linguagem audiovisual, como documentários, podem facilitar a compreensão da realidade ambiental local e estimular a participação da população em práticas sustentáveis (Costa; Loureiro, 2015).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo a realização de um documentário que retrata a gestão dos resíduos sólidos urbanos no município de Campina do Monte Alegre. O material audiovisual será divulgado na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus Lagoa do Sino e também no próprio município, com o propósito de promover a educação ambiental, estimular o debate sobre a gestão de resíduos e contribuir para a construção de práticas mais sustentáveis na comunidade local.

Material e Métodos

Esse documentário foi desenvolvido a partir de uma abordagem qualitativa que teve como estratégia a investigação da percepção da população sobre a gestão de resíduos sólidos e seus impactos ambientais.

Inicialmente, foram elaboradas perguntas norteadoras com o objetivo de identificar o nível de conhecimento da população sobre a gestão de resíduos sólidos e seus impactos ambientais. As questões aplicadas foram: se os participantes sabem o que são resíduos orgânicos e se conseguem citar exemplos; se sabem o que são materiais recicláveis e também exemplos; o que entendem por reciclagem; se sabem para onde são destinados os resíduos coletados; o que fazem com o lixo gerado em suas residências e se conhecem a cooperativa de reciclagem do município; se em sua rua há coleta seletiva ou reciclagem; o que acreditam que aconteceria caso a população deixasse de reciclar os resíduos; e se têm noção da quantidade de resíduos que produzem.

Em seguida, o público participante foi definido com o objetivo de englobar uma ampla diversidade de públicos, incluindo moradores, catadores de materiais recicláveis, servidores públicos, profissionais da saúde, professores e estudantes. Nesse contexto, as entrevistas foram realizadas em diferentes espaços do município, sendo que a Figura 1 ilustra uma das aplicações do questionário em uma escola local.



Figura 01: Coleta de dados em escola do município
Fonte: Autoria própria

Os locais de coleta de dados também foram selecionados para abranger diferentes contextos, como bairros urbanos, escolas, unidades de saúde, pontos de descarte irregular e o aterro controlado de resíduos municipal. A Figura 2 apresenta a visita

realizada ao aterro controlado do município, evidenciando as condições de operação do local e os procedimentos adotados para a disposição dos resíduos sólidos urbanos.



Figura 02: Aterro Controlado - Campina do Monte Alegre/SP
Fonte: Autoria própria

A coleta de dados foi realizada por meio de entrevistas semiestruturadas, registradas em formato audiovisual com o uso de smartphone, microfones de lapela e tripés, garantindo qualidade técnica de áudio e imagem. Paralelamente, foram captadas imagens de apoio (b-roll), incluindo cenas da coleta de resíduos e áreas com descarte irregular, com o intuito de complementar a narrativa visual.

Na etapa de pós-produção, o material foi submetido a um processo de seleção e organização conforme roteiro previamente definido. A edição foi realizada em softwares específicos, estruturando-se em três etapas: (i) triagem e seleção do material bruto; (ii) montagem narrativa com integração de entrevistas e imagens de apoio; e (iii) finalização, incluindo inserção de trilha sonora, legendas e elementos gráficos (contribuíram para reforçar a carga emocional do projeto e tornar o conteúdo mais claro e acessível ao público.). As legendas foram inicialmente geradas por ferramentas automáticas e posteriormente revisadas para assegurar a fidelidade das informações e a acessibilidade do conteúdo.

No item (i), realizou-se a seleção criteriosa dos registros audiovisuais obtidos, com base no roteiro previamente estabelecido, priorizando os trechos mais relevantes para a construção da narrativa e excluindo materiais redundantes ou com baixa qualidade técnica.

No item (ii), procedeu-se à organização dos conteúdos selecionados em linhas do tempo auxiliares e, posteriormente, na timeline principal do software de edição, promovendo a articulação entre as entrevistas e as imagens de apoio (b-roll). Essa etapa buscou garantir a coesão narrativa e o encadeamento lógico das informações, permitindo o desenvolvimento progressivo do tema.

No item (iii), foram realizados os ajustes finais do material, incluindo a inserção de trilha sonora para reforço da expressividade narrativa, a implementação de legendas — inicialmente geradas por ferramentas automáticas e posteriormente revisadas — e a adição de elementos gráficos, como créditos e informações complementares, visando à clareza e acessibilidade do conteúdo.

Todos os participantes assinaram Termo de Consentimento para uso de imagem e voz, sendo que, para menores de idade, a autorização foi obtida junto aos responsáveis legais, garantindo conformidade com os aspectos éticos da pesquisa.

Resultados

O documentário com o título “O fim não é o fim: para onde vai o seu resíduo?”, tem a duração de 29 minutos e 29 segundos, e foi produzido no município de Campina do Monte Alegre, localizado no estado de São Paulo. A obra tem como objetivo evidenciar o percurso e a problemática que envolve a gestão dos resíduos sólidos urbanos, além de analisar o conhecimento da população local sobre o assunto e o impacto da educação ambiental nesse processo.

Os atores principais envolvidos na produção incluíram alunos e professores da rede municipal de ensino e da Universidade Federal de São Carlos, moradores, comerciantes e representantes do poder público, incluindo o responsável pela gestão ambiental do município (Secretário do meio ambiente).

Na sequência, foi elaborado um roteiro técnico contendo o planejamento das cenas, com estimativa de duração, descrição dos ambientes de filmagem, caracterização dos participantes e definição dos principais conteúdos abordados em cada segmento do documentário.

O documentário foi organizado em quatro seções principais definidas para garantir a progressão lógica da abordagem sobre a gestão de resíduos sólidos. A introdução apresenta a contextualização do município e os desafios relacionados à gestão de resíduos sólidos, através de imagens do cotidiano urbano e narração explicativa.

Na primeira parte, o enfoque é direcionado para o ambiente escolar, com entrevistas realizadas com alunos e professores, visando identificar o nível de compreensão sobre conceitos relacionados aos resíduos sólidos e sua gestão. A segunda parte aborda o papel da educação ambiental, destacando iniciativas educativas e projetos de extensão voltados à promoção da reciclagem e do descarte adequado.

A terceira parte é focada na apresentação dos processos de destinação e tratamento dos resíduos, incluindo materiais recicláveis e resíduos especiais, além de aspectos legais e operacionais da gestão municipal, evidenciados por meio de entrevistas com representantes do poder público. Por fim, o encerramento retoma a problemática central, enfatizando os impactos ambientais associados ao manejo inadequado dos resíduos e reforçando a necessidade de maior conscientização social.

O documentário completo encontra-se disponível para acesso online, podendo ser visualizado por meio do seguinte link: https://docs.google.com/document/d/18yFBvErwdf2II_DqwLQtWbWE2gQuZmT2pD7oMb6DuZ0/edit?tab=t.0.

Discussão dos Resultados

O documentário elaborado trata-se de uma ferramenta de sensibilização e comunicação sobre a gestão de resíduos sólidos. A diversidade de participantes permitiu reunir diferentes perspectivas, contribuindo para compreender como o assunto se distribui de entre os grupos entrevistados.

O material produzido assume um papel importante ao apresentar informações sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos municipais de forma acessível, aproximando o conhecimento técnico da realidade da população.

Devido a quantidade de materiais produzidos houve a necessidade de síntese do conteúdo através de um processo rigoroso afim de priorizar os elementos mais representativos, processo esse imprescindível para a qualidade do produto final.

Dessa forma, o documentário se configura como um instrumento de educação ambiental, com potencial para estimular reflexões e promover maior conscientização sobre a gestão adequada dos resíduos sólidos.

Considerações Finais

Espera-se que o documentário contribua para fortalecer a conscientização e educação ambiental sobre a gestão de resíduos sólidos. No âmbito acadêmico, o material também figura como um instrumento de extensão, ao aproximar a universidade da comunidade e favorecer a disseminação do conhecimento de forma acessível.

Agradecimentos

Agradecemos a todos os participantes envolvidos, cuja colaboração e disponibilidade foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

COSTA, C. A.; LOUREIRO, C. F. B. Contribuições da pedagogia crítica para a pesquisa em educação ambiental: um debate entre Saviani, Freire e Dussel. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 10, n. 1, p. 180–200, 2015.

DE OLIVEIRA, D. C. Retratos da população negra brasileira: como a dimensão racial tem sido considerada no Censo Demográfico do IBGE. 2022. Tese (Doutorado em Educação) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2022.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. Ciência & Saúde Coletiva, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012.

INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO. Município de Campina do Monte Alegre – indicadores de saneamento. 2023. Disponível em: https://www.aguaesaneamento.org.br. Acesso em: 03 maio 2026.

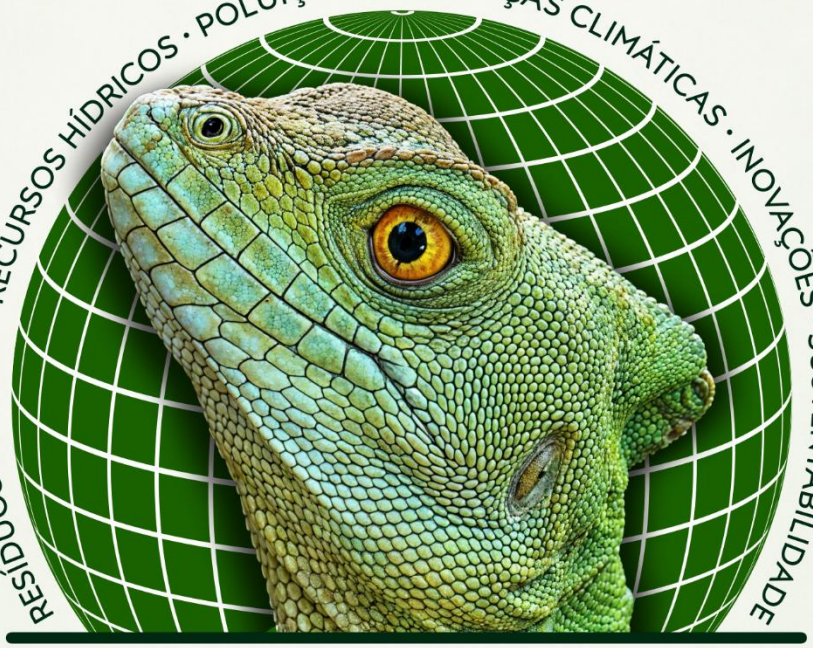
JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. Estudos Avançados, v. 25, n. 71, p. 135–158, 2011.

NETO, P. N.; MOREIRA, T. A. Política nacional de resíduos sólidos: reflexões acerca do novo marco regulatório nacional. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n. 15, p. 10–19, 2010.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINA DO MONTE ALEGRE. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Campina do Monte Alegre, 2025.

ÁREA TEMÁTICA 4

DESASTRES NATURAIS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

DESASTRE NATURAL E A POSSÍVEL DESERTIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE ITAPAJÉ

1 Juscelino Chaves Sales
1 Universidade Estadual Vale do Acaraú, e-mail: juscelinochaves@hotmail.com

Palavras-chave: Seca, Desertificação, Itapajé, Energia Solar.

Resumo

A possível desertificação da região semiárida nordestina vem sendo estudada para ser evitada e isso decorre principalmente das secas que assolam a região semiárida. Vale ressaltar que o desastre natural da seca acontece com mais frequência na região. O principal objetivo desse trabalho foi analisar algumas áreas susceptíveis à desertificação no município de Itapajé. Para realizar esse trabalho foram feitas visitas in loco as áreas degradadas pela seca. No município de Itapajé que fica localizado na região semiárida do Estado do Ceará, foi possível concluir que foi instalada a primeira usina solar de maior capacidade de geração de energia a partir do sol da região norte do Estado do Ceará localizada na região do semiárido cearense, como também já foi instalada uma usina solar no município onde existe uma maior probabilidade de uma possível desertificação menor do que é o município de Irauçuba, aproveitando assim a área que é imprópria para a agricultura. Foi possível perceber que existe uma usina solar de menor porte em outra ares do município de Itapajé, e outras áreas também apresentam processo de possível desertificação. Também foi possível constatar que um existe um potencial de geração de energia elétrica a partir do sol com a instalação de usinas solares em áreas susceptíveis a desertificação devida principalmente ao fenômeno do desastre natural da seca no município de Itapajé

Introdução

Os desastres naturais veem acontecendo com cada vez mais frequência no planeta Terra, que são decorrentes principalmente do aquecimento global que vem acontecendo principalmente devido a emissão de CO_2 na atmosfera, que vem sendo emitido pelo desmatamento das florestas, da combustão de combustíveis fosseis, da criação de bovinos etc. A ação antrópica feita pelo homem como o desmatamento do bioma da caatinga existente na região semiárida do nordeste brasileiro vem trazendo como consequência o desastre ambiental em terras onde vai ocorrer uma possível desertificação.

Em todo mundo vem ocorrendo vários desastres naturais como os furacões, tsunamis, ciclones bomba, enchentes, tufões, secas, tornados etc.

Valendo ressaltar que no dia 7 de novembro de 2025 ocorreu um tornado na região sul do Brasil com maior intensidade no Estado do Paraná que causou seis mortes. Segundos meteorologistas, o fenômeno foi causado pelo nascimento de um ciclone extratropical que atinge o Sul do Brasil (BRAUN, 2025).

A desastre natural das secas veem ocorrendo com mais frequentes e mais tempo do que em anos anteriores no Estado do Ceará. Vale ressaltar também que o desastre natural da seca não é um fenômeno só da região semiárida nordestina, pois ocorreram secas no bioma do pantanal, como também no bioma da Amazônia recentemente.

De acordo com Locateli (2024) a seca no Brasil entre 2023 e 2024 é a “mais intensa da história recente”, segundo o Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Naturais (Cemaden). As condições de seca tornaram-se mais perceptíveis e frequentes após a década de 1990.

A desastre natural das secas veem ocorrendo com mais frequentes e mais tempo do que em anos anteriores no Estado do Ceará. Vale ressaltar também que o desastre natural da seca não é um fenômeno só da região semiárida nordestina, pois ocorreram secas no bioma do pantanal, como também no bioma da Amazônia recentemente.

As secas compõem uma realidade dominante e presente até os dias de hoje com a mesma intensidade do passado, representando um desastre social desde o século XVII. Na região semiárida do Nordeste, as secas, enquanto fenômeno físico constitui um desastre de ordem natural. Os impactos da semiaridez representam, secularmente, um quadro de risco para a sua população. A falta de uma gestão eficiente amplia os riscos de ameaças, incidindo diretamente no processo de construção social dos riscos, ou seja, a consequência da degradação ambiental da região está relacionada com a dependência em relação aos seus recursos naturais, intensificando o desmatamento, a erosão e a perda de fertilidade dos solos, assoreamento dos cursos d’água e a desertificação (SILVA, 2013).

As terras secas abrangem cerca de 41,3% das terras globais, abrigando um terço da população mundial. Historicamente, essas áreas têm recebido insuficiente atenção de governos e organismos de financiamento a população mundial. internacional, principalmente no combate à desertificação. A Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (United Nations Convention to Combat Desertification – UNCCD), criada em 1994, é o principal instrumento para atuação dos países no enfrentamento da questão em nível global. No Brasil, destaca-se a Lei no 13.153/2015, que institui a Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca. Esses dois instrumentos focam o combate à degradação da terra nas (LIMA, 2024).

Vem ocorrendo um o desastre ambiental da seca no município de Tamboril no Estado do Ceará, onde já existem áreas de possível desertificação (SALES, 2024).

Aconteceu um fato mutio contraditório do atual governo brasileiro que liberou a eploração de de petróleo na margem

equatorial do Brasil país precisamente próximo a Foz do Rio Amazonas para a exploração ofshore em águas e profundas e ese fato ocorreu pouco antes da COP 30 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas) que foi realizada em Belém no Estado do Pará.

Pequisadores criticam a decisão do governo brasileiro, anunciada em 20 de outubro de 2025, de autorizar perfurações exploratórias de petróleo em uma área offshore próxima à foz do Amazonas (REIS FILHO, 2025).

Segundo Reis Filho (2025) existe um extremo risco ambiental: a área de exploração de petróleo próximo a Foz do Rio Amazonas.está situada em águas profundas

O principal objetivo desse trabalho foi analisar algumas áreas susceptíveis à desertificação devido principalmente ao desastre ambiental da seca no município de Itapajé.

Metodologia

O presente trabalho foi realizado através de visitas *in loco* as áreas de susceptíveis à desertificação no município de Itapajé onde foram feitos registros fotográficos das áreas analisadas. As áreas analisadas estão no clima do sertão onde predomina o bioma da caatinga. O município de Itapajé onde foram feitas as análises, ocorreram no segundo semestres do ano de 2024, Também foi feita uma pesquisa de cunho bibliográfico em sites (IBGE, FUNCEME), artigos.

Possível desertificação no município de Itapajé

Em 2022, a população do município de Itapajé era de 46.426 habitantes e a densidade demográfica era de 107,42 habitantes por quilômetro quadrado. Na comparação com outros municípios do Estado do Ceará, ficava nas posições 39 e 24 de 184. Já na comparação com municípios de todo o Brasil, ficava nas posições 695 e 723 de 5570. O município de Itapajé fica localizado na mesorregião norte do Estado do Ceará (cearense) e na microrregião de Uruburetama (IBGE, 2025).

Em 2024, a área do município era de 436,32 km², o que o coloca na posição 113 de 184 entre os municípios do Estado do Ceará e 2702 de 5570 entre todos os municípios. O bioma predominante no ano de 2024 era a caatinga (IBGE, 2025). A município de Itapajé é um município de dois climas, ou seja, possui o clima de serras e o clima do sertão em sua área. Já a cidade de Itapajé fica muito próximo das serras. Já as áreas analisadas estão no clima do sertão onde predomina o bioma da caatinga.

A Figura 1 mostra no dia 10 de setembro de 2025 uma área muito próxima de uma possível desertificação onde foi possível perceber que sobre a área crítica que a tendência de virar um pequeno deserto onde foi instalada uma usina solar fotovoltaica. Como não existe mais condições de plantar alguma cultura devido ao próprio solo as placas solares fotovoltaicas foram instaladas e assim a geração de energia está servindo para utilizar a área. A instalação de usinas solares é uma excelente alternativa para aproveitar o solo pobre de nutrientes que não serve para plantar nenhuma cultura, para gerar energia solar ressaltando que o município de Itapajé tem uma excelente irradiação solar para gerar energía solar.

Foi possivel perceber tambem na Figura 1 a existencia de serras na proximidade da usina solar, ou seja, atrás dos equipamentos. O local analisado fica localizado no município de Itapajé a cerca de 140 km da cidade de Fortaleza que é a capital do Estado do Ceará.

Vale ressaltar que na região do município de Itapajé onde foram feitas as análises, ocorreram no segundo semestres do ano de 2024, ano em que choveu em torno da média, ou seja, não foi um ano de seca e mesmo assim as áreas analisadas apresentava escassez hídrica.

Vale ressaltar também que existe um potencial de geração de energia elétrica a partir do sol que é abundante pois temos o sol quase o ano todo, com a instalação de usinas solares em áreas semiáridas como é o caso de áreas no município de Itapajé que fica localizado na mesorregião norte do Estado do Ceará. Vale ressaltar que o desastre natural da seca contribuiu para o aumento das áreas em possível desertificação no Estado do Ceará.

Regiões áridas são conhecidas por seu clima seco e escassez de recursos hídricos. No entanto, essas mesmas regiões são abençoadas com uma abundância de luz solar. A energia solar é uma fonte inesgotável de energia limpa e renovável que pode ser aproveitada mesmo em áreas com baixa disponibilidade de água (MAYA ENERGY, 2024).

É de grande importancia os avanços tecnológicos na área de energia solar destacando o papel da energia solar na transição enérgica, ou seja, da mudança de geração de energia a partir de combustíveis fósseis para energia limpa com destaque para a energia solar. Vale ressaltar que hoje os pesquisadores discutem também as inovações na área de energia solar como também a implementação dessas novas tecnologías para serem utilizadas na impalntação de novas usinas solares na região semiárida do Estado do Ceará.

Vale ressaltar tambem que a queima de combustiveis fosseis liberam CO_2, aumentado assim o aquecimento global, onde o aquecimento do planeta Terra vai dimnuir a quantidade de chuvas na região semiárida acarretando o fenómeno, ou seja, o desastre natural da seca, como já vem acontecendo no municipio de Itapajé localizado no Estado do Ceará.

Como a energía solar é sustentável pois ela é uma energía renovável, é importante que o governo incentive a utilização da energía solar com implantação de novas usinas solares na região semiárida.



Figura 1: Mostra no dia 10 de setembro de 2025 uma área muito próxima de uma possível desertificação onde foi possível perceber que sobre a área crítica, que a tendência de virar um pequeno deserto onde foi instalada uma usina solar fotovoltaica. Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Foi possível constatar também em uma fazenda que fica localizada na localidade de São Joaquim do Doce, na margem esquerda rodovia federal BR-222 no sentido de Fortaleza que a capital do Ceará até o município de Irauçuba uma área com acelerado processo de uma futura desertificação no dia 10 de setembro de 2025. Do lado esquerdo em frente à casa da fazenda foi instalada uma usina solar para aproveitar área árida (desértica) e gerar energia pois essa área não serve para a agricultura. A área analisada fica localizada cerca de 200m de distância da margem do Riacho da Forquilha, ressaltado que o Riacho da Forquilha que se encontrava praticamente seco divide os municípios de Itapajé e Irauçuba.

Figura 2 mostra a pequena usina solar na região semiarada sujeita a desertificação em uma fazenda no municpio de Itapajé. A usina solar fica localizada na margem esquerda da rodovia Federal BR-222 no Estado do Ceará. Foi possível perceber que a área que fica a direita da usina solar está quase desértica, ou seja, é uma área muito suseptível a desertificação onde se poderia instalar mais usinas solares. Ja na área à esquerda da casa foi possivel perceber resquicios da vegetação do bioma da caatinga sendo uma área menos sujeita à desertificação.

Vários países já estão aproveitando o potencial da geração de energia solar em regiões áridas. A Índia, por exemplo, é um dos líderes mundiais na instalação de usinas solares em regiões áridas. O país lançou um ambicioso programa de energia solar que visa instalar 100 GW de capacidade solar até 2022. A China também está investindo pesadamente em usinas solares em regiões áridas, visando reduzir sua dependência de combustíveis fósseis e combater a poluição (MAYA ENERGY, 2024).

Tambem foi possivel perceber na margem esquerda da Rodovia Federal BR-222 que já está também ficando quase árida e futuramente poderá se tornará um deserto.



Figura 2: Pequena usina solar na região semiárida sujeita á uma possivel desertificação. Fonte: Arquivo pessoal (2025)

A Figura 3 mostra duas áreas de possível desertificação nas margens da rodovia federal BR-222. Do lado esquerdo foi possível perceber a existência de uma área em maior tamanho em degradação, onde também foi possível perceber que parte da vegetação do bioma da caatinga na área de domínio da rodovia foi queimada. Já do lado direito da Rodovia Federal BR-222 foi encontrada uma pequena área onde não existia também a vegetação.

Tambem vale ressaltar como o solo é muto pobre com pouquissima vegetação e em algunos lugares sem nenhuma vegetação, accarretando assim a não existencia da flora do bioma da caatinga como também a fauna praticamente não é predominante, ou seja, existem na área analizada no municpio de Itapajé poucos animais.

A característica típica da flora desértica é a sua grande proporção de plantas efêmeras , que sobrevivem a períodos de seca na forma de sementes resistentes e dormentes. Na maioria dos casos, as ligações florísticas entre regiões desérticas são indicadas pela presença de espécies relacionadas. Os animais do deserto apresentam muitas adaptações semelhantes à disponibilidade infrequente de umidade nos desertos, resultando em pouca atividade durante os períodos geralmente secos e intensa atividade nos breves e raros períodos úmidos. Durante a seca, muitos animais do deserto permanecem no subsolo (SMITH, 2025).



Figura 2: Duas áreas de possível desertificação nas margens da rodovia federal BR-222. Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Os galhos secos de árvores do bioma da caatinga onde não brota nenhuma flor foram possíveis encontrar em outra área, onde também na referida área, onde já existe um acelerado processo de degradação ambiental e inclusive sobre o pequeno serrote, onde o solo é muito pobre de nutrientes e pedregoso sendo susceptível a uma futura desertificação. Em parte dessa área a vegetação do bioma da caatinga foi queimada danificando mais ainda o solo (Figura 4).



Figura 4: Galhos secos de árvores do bioma da caatinga onde o solo é muito pobre de nutrientes e pedregoso e susceptível a uma futura desertificação. Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Na margem da rodovia federal BR-222 foi possível perceber outra área susceptível a uma possível desertificação e essa área fica no sopé de um pequeno serrote onde também a vegetação é escassa, como também na parte final do serrote foi possível perceber a existência de um inselberg onde isso foi constado no dia 10 de setembro de 2025 (Figura 5).

A localidade que foi analisada é cortada pelo Riacho da Forquilha é denominada de São Joaquim do Doce a área de possível desertificação encontrada pertence ao município de Itapajé. Vale ressaltar que existe no município de Itapajé outra localidade chamada de São Joaquim que não está em processo de uma possível desertificação.

O nome de São Joaquim do Doce decorre do fato que toda a área analisada pertencia a Fazenda São Joaquim onde nessa fazenda se fabricava muito doce de leite, que era produzido a partir do leite ordenhado das vacas leiteiras da Fazenda São Joaquim. Como hoje diminuiu muito a criação de bovinos na região e isso é decorrente das secas que veem acontecendo mais frequentes acarretando a falta de pasto para os bovinos e tornando o solo da região com baixos nutrientes e com pouquíssima vegetação, aumentando assim a área de uma possível desertificação.

Claro que também o solo vai perdendo sua qualidade devido a ação antrópica realizada pelo homem como o próprio pastejo dos animais (bovinos, ovinos e caprinos) que devido ao seu peso vem compactando cada vez mais o solo, como também a prática de queimar a vegetação do bioma da caatinga que existe no terreno para plantar.

Muito próximo do Riacho da Forquilha é a divisa entre o município de Irauçuba e o município de Itapajé. Segundo Sales (2024) o município de Irauçuba no Estado do Ceará está em processo de possível desertificação.

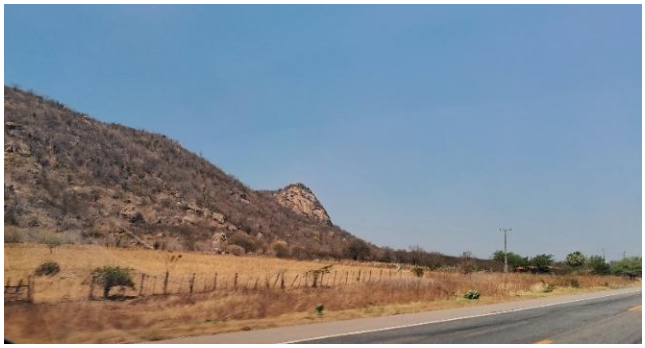


Figura 5: Área susceptível a uma possível desertificação e essa área fica no sopé de um pequeno serrote. Fonte: Arquivo pessoal (2025).

O desastre natural das secas severas que acontecem no município de Itapajé acarreta a geração de uma grande escassez hídrica, porém foram construídos alguns açudes para armazenar água e essa água ser utilizada pelo homem para consumo humano, dessedentação animal, irrigação etc. Vale ressaltar que no município de Itapajé foram construídos alguns açudes.

De acordo com a FUNCEME (2025) com a conclusão da quadra chuvosa de 2025 o Ceará registrou 55% de sua capacidade total de armazenamento hídrico preenchida, o que representa cerca de 10,2 bilhões de metros cúbicos de água nos 157 reservatórios estratégicos monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH).

A Figura 6 mostra a localidade de São Joaquim do Doce onde foi possível perceber a existência de edificações que fazia parte da chamada Fazenda São Joaquim que está localizada no município de Itapajé e outra parte da Fazenda São Joaquim está localizada no município de Irauçuba. O município de Itapajé fica muito próximo do riacho da forquilha. As áreas analisadas estão localizadas muito próximas da margem do Riacho da Forquilha, onde foi possível perceber uma placa designando a ponte dobre o Riacho da Forquilha, onde a ponte foi construída de concreto armado.

Vale ressaltar que o Riacho da Forquilha é que abastece a comunidade de São Joaquim do Doce com água, onde inclusive foi possível perceber a existência de um cacimbão dentro do leito do Riacho da Forquilha que estava totalmente seco. Com o cachimbão que é uma tecnologia social muito utilizada na região semiárida é possível tirar água do lençol freático que fica abaixo do leito do Riacho da Forquilha. A água do cacimbão que fica onde era centro do leito do Riacho da Forquilha era retirada manualmente através de baldes puxados por uma corda.



Figura 6: Localidade de São Joaquim do Doce e a ponte construída de concreto armado sobre o Riacho da Forquilha. Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Considerações finais

Foi possível concluir que as usinas solares encontradas no município de Itapajé ficam localizadas em áreas de possível desertificação.

Foi também possível constar a existência de duas usinas solares onde uma dessas usinas é pequena, ou seja, possui uma menor quantidade de placas solares que a usina de maior porte, ou seja, que tem um número bem maior de placas solares tendo assim uma paior potencia instalada.

As usinas solares foram instaladas em áreas muito susceptíveis ao desastre ambiental da desertificação, ressaltando que seria importante se investir mais na instalação de novas usinas solares nessas áreas improdutivas para agricultura e pastagem dos animais (bovinos, caprinos, ovinos).

Existe um potencial para instalação de usinas solares em áreas semiáridas que futuramente podem se tornar áridas no município de Itapajé ocasionadas principalmente devido ao fenômeno do desastre natural chamado seca.

Também foi possível concluir que como a energía solar é sustentável pois ela é uma energía renovável faz-se necessário a instalação de mais usinas solares no municipio de Itapajé.

Referências Bibliográficas

BRAUN, J. **Tornado destrói cerca de 90% de cidade e deixa 6 mortos no Paraná; o que se sabe**. Disponível em: < https://www.bbc.com/portuguese/articles/cgmxennzzymo>. Acesso em: 9 nov. 2025.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2025. **Ceará encerra quadra chuvosa de 2025 com 55% de volume armazenado em seus reservatórios**. Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=14207>. Acesso em: 7 nov. 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025. **Itapajé**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/itapaje/panorama>. Acesso em: 8 nov. 2025.

LIMA, J.R.; MAGALHÃES, A. R. **O combate à desertificação para além das terras secas: conceitos e contradições no Brasil**. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, 32. 2024. 1. DOI: http://dx.doi.org/10.38116/brua32art14.

LOCATELI, V.; FARIAS, J. **Seca no Brasil é "a mais intensa da história", diz Cemaden.** Disponível em: < https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/seca-no-brasil-e-a-mais-intensa-da-historia-diz-cemaden/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

MAYA ENERGY, 2024. **Potencial de geração de energia solar em regiões áridas**. Disponível em: <https://mayaenergy.com.br/geracao-de-energia-solar-em-regioes-aridas/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

REIS FILHO, J.A. et al. **Brazil's hypocrisy at COP30.** Science, Vol 390, Issue 6775, pp. 794-795, DOI: 10.1126/science.aed3748.

SALES, J. C. **Possível desertificação em Irauçuba - CE**. In: Falcão, Cleire Lima Costa; Monteiro, Jander Barbosa; Jader de Oliveira Santos. (Org.). Estudos sobre a Natureza: Fragilidades, potencialidades e sustentabilidade. 1eded.Sobral: Observatório do Semiárido, 2024, v. 1, p. 259-274.

SALES, J. C. **O desastre ambiental da seca no município de Tamboril no Estado do Ceará**. IV END - Encontro Nacional de Desastres da ABRHidro, 2024, Curitiba.

SILVA, V. M. A. et al, 2013. **O desastre da seca no nordeste brasileiro**. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/polemica/article/view/6431/4857>. Acesso em: 8 nov. 2025.

SMITH, J. M. B. 2025. **Biota**. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/desert/Population-and-community-development-and-structure>. Acesso em: 9 nov. 2025.

RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM DESASTRES HIDROLÓGICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

1 Emilly Victória Silva e Sousa, 2 Juliana Rodrigues Tovar Garbin, 3 Jacqueline Rogéria Bringhenti
1 Instituto Federal do Espírito Santo, e-mail: emillyvss@gmail.cocm; 2 Instituto Federal do Espírito Santo, e-mail: juliana.garbin@ifes.edu.br; 3 Instituto Federal do Espírito Santo, e-mail: jacquelineb@ifes.edu.br

Palavras-chave: Resíduos de desastres; Desastres hidrológicos; Gestão de resíduos de desastres.

Resumo

A identificação de informações para embasar a caracterização dos resíduos de desastres hidrológicos é o objeto do presente estudo. A revisão sistemática da literatura (RSL) foi a estratégia metodológica adotada, o tratamento dos dados seguiu as diretrizes PRISMA e resultou na seleção de sete estudos publicados entre 2020 e 2025, reunindo evidências recentes e consistentes sobre o tema. A análise desses trabalhos permitiu identificar e categorizar os principais resíduos produzidos em inundações, enxurradas e alagamentos, revelando que possuem uma composição heterogênea de materiais, substâncias e objetos. Entre as tipologias de resíduos de desastres mais recorrentes, destacam-se frações orgânicas, recicláveis, volumosos, resíduos de construção e demolição (RCD), além de sedimentos, solos e lama mobilizados pela força da água, configurando uma mistura complexa que amplia a diversidade e a dificuldade de manejo dos resíduos pós-desastre. A análise dos estudos selecionados mostrou que falhas na triagem em campo e o uso de fluxos únicos no gerenciamento de resíduos de desastres (RD) inviabilizam sua valorização e aumentam os riscos ambientais e sanitários. Lacunas operacionais e estruturais foram ainda identificadas, incluindo a escassez de dados básicos sobre as características dos RD (volume, peso específico e composição dos resíduos), de metodologias apropriadas para sua caracterização, bem como a carência de diretrizes para o seu manejo nos instrumentos municipais e regionais de gestão de resíduos. Compreender ~~ess~~as características dos RD é fundamental para o seu reconhecimento como uma categoria específica e para subsidiar políticas públicas mais eficazes e fortalecer a capacidade de resposta frente ao aumento dos eventos hidrológicos extremos.

Introdução

As mudanças climáticas induzidas por atividades humanas têm provocado transformações rápidas e abrangentes no sistema terrestre, gerando impactos adversos que comprometem a integridade dos ecossistemas naturais e afetam, de maneira desproporcional, grupos socialmente vulneráveis (IPCC, 2024, p. 5). Nesse cenário, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, constituem um marco estratégico fundamental. Destaca-se o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), que ressalta a urgência de medidas coordenadas para mitigar impactos e fortalecer a resiliência das sociedades, integrando ações climáticas às políticas públicas e planejamentos nacionais (ONU, 2015).

No Brasil, as enchentes que atingiram o Rio Grande do Sul em 2024 configuraram-se como um dos eventos hidrológicos extremos mais severos já registrados, evidenciando a necessidade de infraestruturas resilientes e planejamento territorial integrado (ANA, 2025). Apesar da gravidade de tais episódios, observa-se a ausência de ações de emergência específicas nos Planos Municipais de Saneamento Básico, além de uma frágil integração entre o planejamento urbano e a gestão de recursos hídricos (Magalhães et al., 2023; ANA, 2025). Nesse contexto, a gestão dos resíduos sólidos torna-se um componente crítico, visto que o volume e a diversidade dos materiais gerados variam conforme a natureza e intensidade do evento (Brown; Milke; Sevilha, 2011). No âmbito regulatório, embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei nº 12.608/2012) estabeleçam princípios fundamentais, persistem lacunas significativas na destinação final de resíduos gerados especificamente em desastres naturais (Barboza, 2016; Ocha, 2013).

Diante desse cenário, o desafio atual reside na mobilização de esforços articulados entre diferentes setores para apoiar os municípios na formulação de políticas eficazes. Isso inclui estratégias de prevenção de riscos e a implementação de estruturas de proteção ambiental capazes de enfrentar os impactos de desastres hidrológicos (Robaina et al., 2024). Entretanto, a gestão é dificultada pela ausência de dados sistemáticos sobre o volume e a composição dos materiais gerados, uma lacuna que compromete o planejamento operacional e a resposta célere recomendada pelos órgãos de controle (ANA, 2024; IPCC, 2024). Nesse sentido, considerando a relevância de identificar as tipologias de resíduos gerados, este estudo busca compreender tais características para subsidiar a atuação de técnicos e gestores locais no enfrentamento de eventos extremos.

Material e Métodos

Como estratégia metodológica para identificar e caracterizar as tipologias de resíduos geradas em contextos de desastres hidrológicos, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), pautada em protocolos estruturados para a identificação e síntese de evidências científicas. A condução da revisão seguiu as diretrizes da declaração Preferred

Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020), visando assegurar a transparência e o rigor metodológico.

A coleta de dados foi realizada por meio de um levantamento bibliográfico na base de dados Web of Science – Coleção Principal (Clarivate Analytics / Thomson Reuters), escolhida por sua natureza multidisciplinar e relevância acadêmica (CAPES, 2024; CLARIVATE, 2025). A estratégia de busca consistiu na combinação do termo principal "Hydrological disasters" unido pelo operador booleano AND ao conjunto de descritores relacionados à gestão de resíduos ("Disaster waste management", "Disaster waste", "Disaster debris", "Emergency waste", "Post disaster waste" e "Post disaster debris") vinculados pelo operador OR.

Para assegurar a relevância e a atualidade da revisão sistemática, foram definidos critérios específicos de inclusão e exclusão, conforme o Quadro 01. Para a seleção dos estudos, foram incluídas publicações científicas, como artigos, teses, dissertações e documentos técnicos, publicadas entre 2020 e 2025, que abordem direta ou indiretamente a geração, caracterização ou gestão de resíduos sólidos em contextos de desastres hidrológicos, desde que apresentem dados empíricos ou análises pertinentes ao tema. Por outro lado, foram excluídas da análise publicações duplicadas, incompletas ou indisponíveis em texto completo, bem como estudos cujo foco esteja restrito exclusivamente a resíduos líquidos ou gasosos, por não se enquadrarem no escopo estabelecido para esta revisão.

Quadro 01: Critérios de inclusão e exclusão.

Critérios de inclusão e exclusão.	
Critérios de Inclusão	Publicações científicas entre 2020 e 2025
	Geração, caracterização e/ou gestão e/ou gerenciamento de resíduos sólidos de desastres hidrológicos
Critérios de Exclusão	Publicações duplicadas, incompletas ou indisponíveis
	Estudos com foco em resíduos líquidos ou gasosos
	Estudos que abordam desastres naturais distintos.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Resultados e Discussão

No que se refere ao processo de seleção dos estudos, a triagem foi realizada em duas etapas: inicialmente, por meio da avaliação de títulos e resumos e, posteriormente, pela análise integral dos textos elegíveis, com o auxílio da ferramenta digital Rayyan, utilizada para a otimização do processo e a remoção de duplicatas. O fluxo de seleção, conduzido conforme as diretrizes do protocolo PRISMA, identificou inicialmente 185 registros, resultando em uma amostra final de sete estudos que compuseram a síntese qualitativa e quantitativa desta revisão.

Observou-se uma concentração temporal das publicações nos anos de 2024 e 2025, o que sugere um aumento do interesse científico impulsionado pela crescente recorrência de eventos hidrológicos extremos em escala global. Quanto à distribuição geográfica, verificou-se a predominância de estudos vinculados a instituições dos Estados Unidos (três artigos), seguidos por França, Itália, Austrália e Brasil, com uma publicação cada. Essa predominância de pesquisas provenientes do Norte Global evidencia uma assimetria epistemológica na produção científica, marcada pela baixa participação de países do Sul Global. Tal concentração contribui para o apagamento de perspectivas locais e limita a compreensão das realidades latino-americanas e africanas, reforçando lacunas importantes no campo.

Nesse contexto, a predominância de estudos do Eixo Norte impõe modelos de gestão que nem sempre são aplicáveis à realidade brasileira, caracterizando o que a literatura denomina como racismo epistemológico: a validação de soluções tecnológicas do Norte como "universais", enquanto as particularidades do Sul são ignoradas. Essa transposição acrítica ignora a precariedade infraestrutural e as especificidades socioeconômicas do Sul Global, perpetuando lacunas na formulação de políticas públicas e normas regulatórias resilientes (Mendes, 2021). Conforme reforçado por Caldera, Jayarathna e Desha (2025), a baixa representatividade da produção científica nacional sublinha a necessidade de aprofundar pesquisas que considerem as particularidades e vulnerabilidades do cenário brasileiro.

No Quadro 02, detalham-se os artigos analisados, identificados por códigos para rastreabilidade nas análises subsequentes.

Quadro 02: Artigos selecionados para análise segundo autor, ano, país e palavras-chave.

Código	Título	Autor(es)	Ano	País	Palavras-chave
1	Disaster waste management after flood events	Amato et al.	2020	Itália	Disaster waste management; economic analysis; flood; life cycle assessment; natural disaster
2	Disaster waste: Characterization and quantification applied to an intense rain event	De Mello et al.	2021	Brasil	Flooding; disaster debris estimation; disaster waste management; climate change
3	Disaster reconnaissance framework for sustainable post-disaster materials management	Yesiller, et al.	2023	Estados Unidos	Debris; Waste Disaster; Reconnaissance; Landfill
4	Disaster debris management and the Maine floods of December 2023	Crowley, J.	2024	Estados Unidos	Disaster debris management; Planning; Maine; Floods
5	'Discarding well' after disasters? Examination of disaster waste and debris management in the United States	Matsler, A. M.; Maxwell, K. B.; Henson, S.	2024	Estados Unidos	Disaster debris; government actors; institutional norms; United States; waste management
6	How does the waste management system reorganise in response to a disaster? A case of the Roya Valley (France) after storm Alex	Marchesini, G.	2025	França	Disaster waste management; Waste system transformation; Functional analysis; Natural hazards
7	A resilient disaster waste management framework for communities: Experiences from Australian industry practitioners	Caldera, et al.	2025	Austrália	Disaster waste management; Disaster waste; Resilient community; Institutional theory; PPRR model; Australian disasters

Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Entre os artigos analisados, o estudo de De Mello et al. (2021) tinha como foco principal a caracterização e quantificação dos resíduos de desastre, enquanto os demais concentravam-se em aspectos relacionados à gestão pós-desastre, desafios operacionais de campo e processos que abrangem as fases de preparação, resposta e recuperação. Tal achado evidencia a necessidade de ampliar a produção científica voltada à compreensão das características dos resíduos gerados por eventos hidrológicos.

Em termos das terminologias adotadas para descrever os RD, observa-se que o termo "disaster waste" é recorrente em aproximadamente 57% dos artigos analisados, aparecendo invariavelmente associado ao termo "management". Paralelamente, as variações "disaster debris" e "debris" também foram identificadas em aproximadamente 57% dos estudos; nota-se, contudo, uma concentração geográfica dessa nomenclatura, visto que 75% das ocorrências desses termos provêm de pesquisas realizadas nos Estados Unidos.

Outro aspecto relevante é que parte significativa das publicações analisadas, aproximadamente 43%, não se restringe exclusivamente a desastres hidrológicos. Conforme apresentado no Quadro 03, dos sete artigos avaliados, quatro têm foco específico, enquanto os demais abordam diferentes categorias de desastres, como furacões, tornados, incêndios florestais, terremotos e deslizamentos de terra. Embora essa diversidade amplie o panorama comparativo e contribua para discussões mais abrangentes sobre a gestão de resíduos em cenários de desastre, ela também reduz o foco nos resíduos gerados em eventos hidrológicos, cujas características de composição e dispersão apresentam particularidades importantes.

Quadro 03: Tipologias de desastres naturais predominantes nos artigos selecionados.

País	Número de Artigos	Tipo de Desastre
Estados Unidos	3	Terremotos, tempestades, tornados, derramamentos de petróleo, acidentes industriais, inundações repentinas, fluxos de detritos, deslizamentos de terra e incêndios florestais

França	1	Tempestade
Itália	1	Chuvas intensas e inundações
Austrália	1	Incêndios florestais, inundações, pandemias e terremotos
Brasil	1	Chuvas intensas e inundações

Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Nesse contexto, destaca-se que, quando uma inundação atinge áreas urbanizadas, o volume de resíduos sólidos gerados pode ser entre cinco e quinze vezes superior às taxas anuais de geração de resíduos de uma comunidade (Brown; Milke; Sevilha, 2011). Esse aumento expressivo decorre da destruição de propriedades privadas, como residências e veículos, bem como de infraestruturas públicas, a exemplo de estradas, pontes e equipamentos urbanos, além de impactos sobre áreas agrícolas e espaços verdes. Como consequência, observa-se a ampla dispersão de lama, detritos e múltiplas tipologias, frequentemente misturados ao solo e à água, o que dificulta sua identificação e manejo adequado (Amato et al., 2020).

Além do volume significativo, os resíduos apresentam elevada heterogeneidade em sua composição, podendo conter substâncias químicas perigosas e agentes biológicos patogênicos. Em muitos casos, ocorre contaminação cruzada com esgoto doméstico, produtos tóxicos armazenados em residências e estabelecimentos comerciais, bem como com resíduos hospitalares e industriais. Essa complexidade amplia os riscos sanitários e ambientais associados, exigindo abordagens multidisciplinares e protocolos específicos para o seu gerenciamento (Magalhães et al., 2023).

Verifica-se que, durante eventos dessa natureza, a maior parte dos resíduos não é triada, sendo coletada em fluxo único, quando o ideal seria a adoção de fluxos distintos, com organização e regulamentação específicas para coleta e tratamento. Essa dinâmica é agravada pelo fato de que materiais originalmente inertes ou não perigosos tendem a sofrer contaminação cruzada durante o evento, o que transmuta sua natureza e exige protocolos rigorosos de segregação e destinação final. Tal condição reitera a indispensabilidade de planos de contingência específicos, visto que a ausência de uma separação técnica preliminar não apenas compromete a logística, mas onera ambiental e financeiramente a recuperação das áreas atingidas (Marchesini, 2025). Sob essa ótica, a análise dos artigos selecionados evidenciou que a heterogeneidade e a complexidade de classificação desses resíduos são reflexos diretos das condições específicas de cada cenário.

Após a análise dos resíduos identificados nos artigos selecionados para esta revisão, procedeu-se à sua classificação com base em dois referenciais normativos amplamente utilizados na gestão de resíduos no Brasil: a Instrução Normativa nº 13/2012 do IBAMA e a Lista Geral de Resíduos (LGR) da ABNT NBR 10004 (2024). Os resultados demonstram que os resíduos gerados em inundações, enxurradas e alagamentos compõem um conjunto heterogêneo de materiais. Entre as tipologias mais recorrentes, destacam-se as frações orgânicas, recicláveis, volumosos, resíduos de construção e demolição (RCD), além de grandes volumes de sedimentos, solo e lama mobilizados pela força hídrica. No Quadro 04, apresenta-se a síntese dessas categorias.

Quadro 04: Tipologias de RD relacionados a desastres hidrológicos identificados na RSL, segundo classificação pela norma brasileira ABNT NBR 1004-2:2024.

Classificação - ABNT NBR 1004-2:2024		**Tipologias de RD identificados na Literatura**
Categorias	**Sub-Categorias**	
Resíduos sólidos urbanos e equiparados	Resíduos domésticos	Papel e cartão; vidro; resíduos biodegradáveis (cozinhas e cantinas); roupas e têxteis; óleos e gorduras alimentares; tintas, adesivos, colas e resinas; detergentes; medicamentos; plásticos; metais; resíduos de limpeza de chaminés; madeira; terras e pedras; resíduos não biodegradáveis; resíduos de mercado e de limpeza de ruas; lamas de fossas sépticas e de limpeza de esgotos; eletrodomésticos; móveis (camas, mesas, sofás); eletrônicos (TVs, geladeiras); e resíduos vegetais (árvores).
	Comércio	
	Indústria	
	Serviços	
	Frações provenientes da coleta seletiva	
	Resíduos de limpeza urbana	
	Outros resíduos dos serviços públicos de saneamento básico e equiparados	

Veículos em fim de vida e resíduos do desmantelamento/desmanche	Veículos em fim de vida útil.
Resíduos de construção e demolição (RCD)	Blocos de concreto; pavimentos; tijolos; madeira tratada; metais; cabos elétricos; e estruturas provenientes de obras e edificações danificadas ou colapsadas.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Observa-se uma concentração significativa dos materiais identificados na categoria de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Tal fato é preocupante, pois, embora a NBR 10004 e a IN 13/2012 do IBAMA ofereçam diretrizes de classificação, a gestão prática municipal muitas vezes carece de segregação na fonte durante o pós-desastre. Conforme Medeiros e Lara (2025), a gestão de resíduos em eventos hidrológicos extremos demonstra que a infraestrutura urbana convencional é insuficiente para o volume gerado, exigindo estratégias de manejo que vão além da coleta regular de RSU.

Destaca-se, ainda, que a gestão dos resíduos sólidos gerados após desastres hidrológicos apresenta desafios significativos, muitos dos quais diretamente relacionados à ausência de triagem adequada. Isso ocorre porque a maioria dos materiais não é separada na fonte, sendo coletada em um único fluxo. Como consequência, esses materiais acabam sendo misturados com resíduos de construção e demolição (RCD), entre outros, dificultando a identificação individualizada dos materiais e inviabilizando processos posteriores de tratamento (Marchesini, 2025).

Além disso, a mistura de diferentes tipologias de resíduos, que poderiam ser gerenciados por fluxos específicos, como os recicláveis, os resíduos perigosos e os RCD, nas operações de coleta e armazenamento temporário pós-desastre resulta em um destino final inadequado, no qual os resíduos deixam de passar por processos ambientalmente corretos, como triagem, reutilização, reciclagem ou recuperação energética, e acabam sendo incinerados ou enviados diretamente para aterros sanitários, sem segregação prévia (Marchesini, 2025). Em condições normais, diferentes categorias de resíduos possuem rotas específicas de coleta e destinação, entretanto, durante um desastre, essas rotas são descontinuadas, substituídas ou reorganizadas de forma emergencial. Essa alteração abrupta compromete processos essenciais de identificação, segregação e recuperação de materiais. Segundo Amato et al. (2020), a falta de informações científicas que possam servir de apoio sobre a gestão dos resíduos em contexto de desastre, frequentemente, leva a uma gestão inadequada e insustentável, com impactos negativos na esfera econômica e ambiental. Afinal, após esse tipo de evento, os tomadores de decisão devem fazer escolhas para acelerar a gestão de fluxos heterogêneos.

A ausência de triagem dos resíduos implica, adicionalmente, a escassez de informações confiáveis sobre os tipos e volumes gerados no pós-desastre. Esses dados são fundamentais tanto para subsidiar ações emergenciais quanto para orientar estratégias de recuperação de materiais, reaproveitamento de recursos e valorização de resíduos que atingiram o fim de sua vida útil. Por esse motivo, a análise de campo torna-se uma etapa fundamental após um evento de desastre, uma vez que é impossível simular artificialmente as condições in situ. Além da complexidade topológica do cenário atingido, as condições ambientais se modificam de forma rápida e altamente variável no espaço e no tempo, o que exige observações diretas e contínuas (Yessiler et. al., 2023).

Ainda assim, entre os principais desafios para a gestão de resíduos pós-desastre, destaca-se a gestão do tempo, de modo a equilibrar a coleta de dados com a necessidade de reabertura, a falta de dados detalhados sobre a quantidade e composição dos resíduos gerados, a falta de triagem na fonte, a falta de padrões simplificados para amostragens de campo na caracterização de detritos, a falta de infraestrutura para gerenciamento dos resíduos e a dificuldade de acesso de dados de materiais pós-desastre e de infraestrutura de gestão de eventos anteriores (Yessiler et. al., 2023).

No contexto internacional, observa-se que os resíduos pós-desastre ainda não constituem uma preocupação central para os gestores de crises, permanecendo como um tema secundário dentro das ações emergenciais. Como resultado, a questão dos resíduos gerados por desastres tende a ser abordada apenas durante o próprio evento, de forma reativa e sem planejamento prévio, em vez de ser incorporada como componente estratégico das políticas de gestão de risco e preparação para emergências (Marchesini, 2025; Caldera et al., 2025).

Os governos locais, nesse contexto, são as principais entidades responsáveis pela gestão dos resíduos gerados em desastres, cabendo às demais partes interessadas cooperarem com essas administrações para que o apoio seja efetivo. Por estarem diretamente inseridos nos territórios afetados, os governos locais constituem o centro da Gestão de Resíduos de Desastres (GRD), sendo também os mais bem posicionados para solicitar suporte, articular recursos e coordenar ações entre diferentes instituições durante as etapas de preparação, resposta e recuperação (Caldera et al., 2025).

Dessa forma, garantir que a gestão disponha de planos de desastres atualizados, é fundamental para uma resposta eficiente. Tendo em vista que, durante a análise dos textos, emergiu um aspecto crítico: a falta de preparo da gestão para lidar com os resíduos gerados em situações de desastre. Apesar dos avanços conceituais observados nos estudos, a revisão evidenciou uma escassez de protocolos operacionais específicos para o manejo de resíduos em contextos emergenciais. Essa insuficiência normativa compromete a capacidade de resposta rápida e sustentável frente a desastres hidrológicos, resultando em improvisações, atrasos na tomada de decisão e aumento dos riscos ambientais e sociais decorrentes do manejo inadequado.

Comentários finais

A revisão sistemática realizada permitiu identificar, de forma abrangente, as características dos RD em desastres hidrológicos. Os achados mostram que esses eventos geram resíduos altamente heterogêneos, que incluem frações orgânicas, recicláveis, volumosos, RCD, sedimentos, solos e lama, aumentando significativamente a complexidade do gerenciamento pós-desastre.

Destaca-se a baixa importância ou atenção atribuída à possibilidade de conciliar a etapa de remoção e armazenamento temporário dos RD no pós-desastre para ampliar o potencial de valorização e minimização de impactos, além de otimização de custos. A adoção de fluxos únicos, onde materiais perigosos e não perigosos são misturados, não apenas dificulta o reaproveitamento, mas amplia os riscos ambientais e sanitários. Sob a ótica da engenharia sanitária, essa lacuna evidencia que a gestão de resíduos em desastres ainda não está integrada à lógica de gestão de riscos, sendo tratada de forma reativa e desarticulada. O risco sistêmico de manter esse cenário é a sobrecarga imediata das infraestruturas de saneamento e o agravamento de crises de saúde pública. A permanência de resíduos contaminados em áreas urbanas favorece a proliferação de vetores, a contaminação aguda do solo e de corpos d'água, além de elevar a exposição ocupacional das equipes de limpeza e o risco para populações vulneráveis que residem em áreas de autoconstrução.

A literatura também evidencia lacunas estruturais e operacionais, como a escassez de dados e a ausência de metodologias padronizadas. Para mitigar tais problemas, as recomendações operacionais devem focar na incorporação do tema nos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) e planos de contingência, na definição prévia de protocolos de triagem emergencial e áreas de armazenamento temporário, além da integração com a Defesa Civil em todas as etapas do ciclo (pré, durante e pós-desastre). Ademais, os resultados devem ser analisados sob a perspectiva das mudanças climáticas, que apresentam uma tendência de intensificação dos eventos extremos e, consequentemente, um aumento projetado na geração de resíduos.

Por fim, cabe ressaltar as limitações desta revisão. O número reduzido de estudos encontrados reflete a escassez de pesquisas acadêmicas sistemáticas sobre o tema, especialmente com dados primários de campo. Observou-se um possível viés geográfico e uma acentuada heterogeneidade metodológica entre os autores, o que dificulta a padronização de indicadores de geração. Tais lacunas reforçam a necessidade de novas investigações que foquem na padronização da caracterização de resíduos pós-desastre no contexto do Sul Global.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) pelo apoio institucional e pela base acadêmica fornecida para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

AMATO, Alessia et al. Disaster waste management after flood events. **Journal of Flood Risk Management**, 2020.

ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente.** Brasília: ANA, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004-1:2024:** Classificação de resíduos sólidos – Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004-2:2024:** Classificação de resíduos sólidos – Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR). Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BARBOZA, Mariana Fernandes. **Gestão de resíduos sólidos oriundos de alagamentos e inundações: uma avaliação sobre legislação e instrumentos de gestão em Belo Horizonte - MG.** 2016. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2016.

BRASIL**.** Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL**.** Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 11 abr. 2012.

BROWN, Charlotte; MILKE, Mark; SEVILHA, Érica. Gestão de resíduos de desastres: um artigo de revisão. **Waste Management**, v. 31, n. 6, 2011.

CALDERA, Savindi; JAYARATHNA, Chamari; DESHA, Cheryl. Disaster waste management for resilient communities: a systematic literature review. **Journal of Environmental Management**, v. 12, 2025.

CALDERA, et al. A resilient disaster waste management framework for communities: Experiences from Australian industry practitioners. **Cleaner Waste Systems,** v. 10, p. 100197, 2025.

CAPES. **Portal Periódicos da CAPES.** Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics / Thomson Reuters). 2024.

CLARIVATE. **Web of Science.** Clarivate, 2025.

CROWLEY, J. Disaster debris management and the Maine floods of December 2023. **Journal of Environmental Management**, 2024. Elsevier.

DE MELLO, D. P. P. et al. Disaster waste: characterization and quantification applied to an intense rain event. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 56, n. 3, 2021.

IPCC. **Summary for Policymakers.** In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report. Geneva, Switzerland, 2024.

MAGALHÃES, et. al. **Nota técnica (NT) sobre saneamento em situações de desastres hidrológicos - inundações**. Porto Alegre: IPH, UFRGS; out. 2023.

MARCHESINI, G. How does the waste management system reorganise in response to a disaster? A case of the Roya Valley (France) after storm Alex. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, 2025.

MATSLER, A. M.; MAXWELL, K. B.; HENSON, S. 'Discarding well' after disasters? Examination of disaster waste and debris management in the United States. **Human Organization**, v. 84, n. 2, p. 131-143, 2024.

MEDEIROS, R. R.; LARA, D. M. de. Gestão de resíduos em desastres: uma análise detalhada e o caso do Rio Grande do Sul em 2024. In: VIII CONRESOL - Congresso sobre Gestão de Resíduos Sólidos, 2025. **Anais.** Porto Alegre: IBEAS, 2025.

MENDES, João M.; AMATO, Alessia. Desafios da gestão de resíduos em cenários de catástrofe: uma análise crítica das assimetrias entre Norte e Sul Global. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 104-125, 2024.

OCHA. **Disaster Waste Management Guidelines.** Switzerland, 2013.

ONU (Organização das Nações Unidas). **Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** 2015.

ROBAINA, et. al. **Desastres hidrológicos:** levantamento para o estado do Rio Grande do Sul. Canoas, RS: Média Publishers, 2024.

YESILLER, Nazli et al. Disaster reconnaissance framework for sustainable post-disaster materials management. **Waste Management**, v. 169, 2023.

CLASSIFICAÇÃO DE TORNADOS NO PARANÁ: ANÁLISE CRÍTICA DA APLICAÇÃO DA ESCALA FUJITA MELHORADA NO CONTEXTO CONSTRUTIVO BRASILEIRO

1 Thiago Mej, 2 Karin Linete Hornes

1 Universidade Estadual de Ponta Grossa, e-mail: thiagomej@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Ponta Grossa, e-mail: klhornes@uepg.br

Palavras-chave: Vulnerabilidade estrutural; Wood frame; Calibração de escala

Resumo

A ocorrência de tornados no sul do Brasil é sistematicamente subestimada devido à falta de classificação padronizada de danos adaptada às práticas construtivas locais. A Escala Fujita Melhorada (EF), padrão internacional para avaliação da intensidade de tornados, foi calibrada para construções norte-americanas em wood frame, que diferem substancialmente da construção em alvenaria predominante no Brasil. Este estudo de aplicabilidade analisa criticamente seis eventos tornádicos no estado do Paraná (1997-2024) utilizando a Escala EF, avaliando as lacunas entre os padrões de dano observados e as calibrações originais. A seleção dos seis eventos foi um filtro de qualidade rigoroso, priorizando registros obtidos em até 24 horas (conforme Karstens et al., 2022) e com disponibilidade de múltiplas fontes independentes. Os padrões de danos foram avaliados por meio da coleta e análise sistemática de registros fotográficos e videográficos de fontes públicas, seguida da comparação com os Indicadores de Danos (DIs) e Graus de Danos (DoDs) da Escala EF. Para cada evento, foram analisadas no mínimo cinco estruturas do mesmo tipo, resultando e um banco de dados com estruturais individuais. Foram adotados critérios de validação: priorização de registros com até 24 horas; comparação de múltiplas estruturas do mesmo tipo; verificação cruzada entre fontes; e atribuição de margens de incerteza às velocidades estimadas. Os eventos foram classificados como EF4 (Nova Laranjeiras, 1997), três EF3 (Cascavel 2023, Francisco Beltrão 2015, Marechal Cândido Rondon 2015), EF2 (Ponta Grossa 2015) e EF1 (Ponta Grossa 2024). Para cada um dos seis casos, identificaram-se discrepâncias sistemáticas: os modos de falha observados em estruturas de alvenaria corresponderam a Graus de Dano (DoDs) cujas velocidades tabeladas são inferiores àquelas previstas para estruturas em wood frame no mesmo nível de destruição; telhados cerâmicos e espécies arbóreas nativas (Araucaria angustifolia, Eucalyptus spp.) exibiram modos de dano não contemplados pelos DIs existentes. Os resultados indicam que, embora a Escala EF forneça uma estrutura de classificação útil, sua aplicação direta à construção brasileira introduz vieses sistemáticos que demandam calibração específica, alinhada aos esforços de padronização internacional representados pela Escala Fujita Internacional (IF-Scale).

Introdução

Os tornados estão entre os fenômenos meteorológicos mais intensos e destrutivos, surgindo em condições de alta instabilidade atmosférica e frequentemente associados a sistemas convectivos. Embora sejam bem documentados em regiões como o centro dos Estados Unidos, sua ocorrência no Brasil, particularmente na região Sul, permanece subnotificada e pouco compreendida. Conforme observado por Hornes (2022), os números apresentados pelos registros oficiais não refletem as ocorrências reais, que provavelmente são muito superiores às contabilizadas. A falta de classificação precisa dificulta a avaliação de riscos, a mitigação de desastres e a segurança pública nas áreas afetadas.

Nas últimas duas décadas, a comunidade internacional tem avançado no aperfeiçoamento da classificação de tornados. A transição da Escala Fujita original (F) para a Escala Fujita Melhorada (EF), consolidada pelo relatório técnico da Texas Tech University (WSEC, 2006), representou um avanço significativo ao introduzir 28 Indicadores de Danos (DIs) e Graus de Danos (DoDs) calibrados por engenharia. Edwards et al. (2013), em uma revisão abrangente publicada no Bulletin of the American Meteorological Society, destacaram que a principal inovação da EF foi a consideração da variabilidade na qualidade e nos materiais de construção. Contudo, esses mesmos autores reconheceram que a calibração original permaneceu fortemente ancorada no sistema construtivo norte-americano, predominantemente em wood frame.

Críticas mais recentes aprofundaram essa questão. Lombardo et al. (2023) demonstraram, por meio de simulações de Monte Carlo, que a baixa densidade de estruturas em áreas rurais e a variabilidade na qualidade construtiva podem levar à subestimação sistemática da intensidade de tornados em até duas categorias. Paralelamente, Wurman et al. (2021) e Lyza et al. (2024), utilizando medições de radar Doppler móvel, argumentaram que as classificações baseadas exclusivamente em danos subestimam a intensidade real de tornados violentos em aproximadamente 1,5 categoria, sugerindo que até 20% dos tornados supercelulares teriam potencial para atingir níveis EF4-EF5, embora poucos recebam essa classificação oficial por falta de estruturas adequadas para serem destruídas.

No âmbito internacional, a percepção das limitações regionais da EF levou ao desenvolvimento da Escala Fujita Internacional (IF-Scale) pelo European Severe Storms Laboratory (ESSL, 2023). Esta proposta introduz o conceito de "robustez" (sturdiness) como um modificador físico universal para avaliar edifícios de qualquer material, reconhecendo explicitamente que a alvenaria pesada predominante na Europa e em outras regiões do mundo não responde às mesmas calibrações das estruturas em wood frame norte-americanas. Estudos específicos sobre o impacto de tornados em alvenaria histórica (Penn State University,

2024) corroboram essa necessidade, demonstrando que os modos de falha de estruturas de tijolos e blocos de concreto diferem substancialmente daqueles previstos pelos DIs originais da EF.

O estado do Paraná, localizado na região Sul do Brasil, registrou 81 tornados entre 1975 e 2018, conforme levantamento de Almeida, Hornes e Estivallet (2023). O sistema construtivo da região é majoritariamente composto por alvenaria estrutural e telhas cerâmicas ou de fibrocimento, aproximando-se mais do padrão europeu do que do norte-americano. Os seis eventos selecionados para este estudo foram escolhidos como "casos-tipo" que representam a diversidade territorial e tipológica do Paraná (urbano, rural, industrial e vegetação), alinhando-se às agendas de pesquisa internacionais, como as do Northern Tornadoes Project (NTP, 2025).

Diante desse cenário, este estudo de aplicabilidade se insere no debate global sobre as limitações da Escala EF, investigando sua aplicabilidade ao contexto construtivo brasileiro. Especificamente, busca-se: (i) classificar a intensidade de tornados ocorridos no Paraná utilizando os critérios da EF; (ii) identificar discrepâncias entre os padrões de dano observados e as calibrações originais; (iii) discutir as implicações dessas discrepâncias para a gestão de riscos e para os esforços de padronização internacional.

Material e Métodos

A metodologia adotada baseou-se na análise de danos de seis eventos tornádicos ocorridos no estado do Paraná, selecionados a partir do trabalho de Almeida et al. (2023) e complementados por ocorrências posteriores. Este estudo integra a dissertação de mestrado do primeiro autor (MEJ, 2025). A seleção de apenas seis eventos não decorre de limitação de dados, mas sim de um filtro de qualidade rigoroso, priorizando registros obtidos em até 24 horas (conforme Karstens et al., 2022) e com disponibilidade de múltiplas fontes independentes. A opção metodológica fundamenta-se no princípio de que é preferível uma amostra de n=6 com alta resolução e triangulação de dados do que uma amostra extensa baseada em relatos vagos ou registros jornalísticos imprecisos.

Os seis eventos foram selecionados como "casos-tipo" que representam a diversidade territorial e tipológica do Paraná: (a) área urbana consolidada (Nova Laranjeiras, Marechal Cândido Rondon); (b) área rural (Francisco Beltrão); (c) área industrial (Cascavel); (d) área urbana com variação de intensidade (Ponta Grossa 2015 e 2024). Adicionalmente, os eventos abrangem diferentes tipologias construtivas (alvenaria estrutural, estruturas metálicas, vegetação nativa) e distintos níveis de intensidade (EF1 a EF4), permitindo uma análise comparativa robusta da aplicabilidade da Escala EF no contexto brasileiro.

Os eventos analisados foram: Nova Laranjeiras (13 de junho de 1997), Francisco Beltrão (13 de julho de 2015), Marechal Cândido Rondon (19 de novembro de 2015), Cascavel (04 de dezembro de 2023) e dois eventos em Ponta Grossa (27 de setembro de 2015 e 05 de abril de 2024).

A coleta de dados foi realizada por meio de buscas sistemáticas em plataformas digitais, utilizando palavras-chave como "tornado", "temporal", "vendaval", "tormenta" e "ciclone", combinadas aos nomes dos municípios e datas dos eventos. Foram coletados e analisados registros fotográficos e videográficos obtidos em fontes diversas, incluindo mídias sociais, sites de notícias e acervos institucionais.

Para garantir a validade da análise e compensar o número reduzido de eventos, foram estabelecidos critérios explícitos de validação e robustez amostral interna: (a) Temporalidade: priorização de registros coletados até 24 horas após a ocorrência dos eventos, conforme recomendação de Karstens et al. (2022); (b) Multiplicidade de fontes: para cada evento, foram comparados registros de pelo menos três fontes independentes (ex: diferentes veículos de imprensa, mídias sociais e acervos institucionais); (c) Comparação estrutural: para cada categoria de dano (ex: residências de alvenaria, estruturas metálicas, vegetação), foram analisadas no mínimo cinco estruturas do mesmo tipo por evento, totalizando um banco de dados de pelo menos 30 análises estruturais individuais, o que confere robustez estatística interna; (d) Triangulação metodológica: a classificação final baseou-se na convergência de múltiplos DIs ao longo do caminho de destruição, e não em um único indicador.

Para o evento de 2024, os autores conduziram levantamentos de campo in situ dentro de 48 horas, incluindo fotografias com georreferenciamento.

A análise dos danos consistiu na identificação dos Indicadores de Danos (DIs) e dos respectivos Graus de Danos (DoDs) conforme descritos na Escala Fujita Melhorada (SPC, 2014). Para cada evento, foram comparadas estruturas semelhantes, tais como residências, edificações comerciais, estruturas industriais e vegetação, estabelecendo-se a correspondência entre os danos observados e os descritores da EF.

A estimativa da discrepância entre as velocidades previstas pela EF e as velocidades inferidas a partir dos danos observados baseia-se exclusivamente na comparação entre os valores tabelados da própria escala (WSEC, 2006) para diferentes Graus de Dano (DoDs). Não foram realizadas medições diretas de velocidade do vento in situ, como aquelas obtidas por radar Doppler móvel (Wurman et al., 2021; Lyza et al., 2024). Portanto, as discrepâncias apresentadas devem ser interpretadas como uma indicação qualitativa da direção e magnitude relativa da diferença entre os DoDs observados e os previstos, e não como valores absolutos validados instrumentalmente.

Para cada um dos seis casos, foi realizada uma análise comparativa entre o DoD previsto pela EF (com base no modelo para wood frame) e o DoD efetivamente identificado nos danos observados em estruturas de alvenaria e estruturas metálicas.

Quanto às incertezas na classificação, adotaram-se os seguintes procedimentos: (a) incerteza associada à velocidade do vento: foram registrados os intervalos inferior e superior para cada DoD atribuído; (b) incerteza associada à seleção do DI: nos casos em que múltiplos DIs eram aplicáveis, adotou-se o DI mais conservador; (c) incerteza associada à qualidade da documentação: para eventos anteriores a 2010 (Nova Laranjeiras, 1997), a classificação foi considerada menos precisa devido à

qualidade limitada dos registros fotográficos disponíveis.

A classificação final foi atribuída com base na convergência dos danos observados em diferentes DIs ao longo do caminho de destruição.

Para a análise das condições sinóticas que favoreceram a ocorrência dos eventos, foram consultadas cartas sinóticas disponibilizadas pela Marinha do Brasil e imagens de satélite e radar obtidas junto ao Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Resultados

Os resultados da análise permitiram classificar os seis eventos tornádicos conforme a Escala Fujita Melhorada (Tabela 01).

Tabela 01: Classificação dos tornados analisados segundo a Escala Fujita Melhorada
Fonte: Elaborado pelos autores com base na Escala Fujita Melhorada (SPC, 2014).

Município	Data	Classificação EF	Velocidade estimada (km/h)	DI e DoD segundo EF (modelo)	DI e DoD identificados	Principais danos observados
Nova Laranjeiras	13/06/1997	EF4	267-321	DI 2 (DoD 10); DI 21 (DoD 8)	DI 2 (DoD 8-9); DI 21 (DoD 7-8)	Destruição de residências de alvenaria; colapso de estruturas industriais; veículos arremessados; árvores descascadas; aproximadamente 600 residências destruídas.
Francisco Beltrão	13/07/2015	EF3	218-265	DI 2 (DoD 7-8); DI 1 (DoD 8)	DI 2 (DoD 7-9); DI 1 (DoD 8)	Destruição parcial de residências de alvenaria e destruição total de residências de madeira; veículos retorcidos; aviários destruídos; floresta severamente danificada; 76 residências afetadas.
Marechal Cândido Rondon	19/11/2015	EF3	218-265	DI 21 (DoD 7-8); DI 27 (DoD 4-5)	DI 21 (DoD 7-8); DI 27 (DoD 4-5)	Colapso de estruturas metálicas e alvenaria industrial; árvores arrancadas; telhados arrancados; 1.500 residências danificadas; prejuízo superior a R$ 130 milhões.
Cascavel	04/12/2023	EF3	218-265	DI 21 (DoD 8); DI 28 (DoD 4-5)	DI 21 (DoD 8); DI 28 (DoD 4-5)	Colapso de silo metálico; árvores arrancadas e quebradas; rastro de destruição visível em vegetação.
Ponta Grossa	27/09/2015	EF2	178-217	DI 2 (DoD 4-6); DI 27 (DoD 3-4)	DI 2 (DoD 4-6); DI 22 (DoD 3)	Telhados arrancados; árvores quebradas; danos em posto de combustível; projéteis lançados ("mísseis");

Município	Data	Classificação EF	Velocidade estimada (km/h)	DI e DoD segundo EF (modelo)	DI e DoD identificados	Principais danos observados
						250 residências danificadas.
Ponta Grossa	05/04/2024	EF1	138-177	DI 1 (DoD 4-5); DI 27 (DoD 3-4)	DI 1 (DoD 4-5); DI 27 (DoD 3-4)	Danos em árvores (copas arrancadas, troncos quebrados); telhados arrancados em galpões agrícolas; projéteis lançados.

O tornado ocorrido em Nova Laranjeiras em 1997 foi classificado como EF4, com ventos estimados entre 267 e 321 km/h. As imagens analisadas (Figura 01) evidenciaram a destruição total de residências de alvenaria (DI 2, DoD 8 a 9) e o colapso de estruturas industriais metálicas (DI 21, DoD 7 a 8). Comparando com as calibrações originais da EF, observou-se que as residências de alvenaria não armada atingiram graus de destruição equivalentes ao DoD 8-9, enquanto o modelo previa DoD 10 para o mesmo nível de destruição em wood frame, indicando uma discrepância na calibração para este tipo construtivo.



Figura 01: Destruição total de residências e veículos arremessados pelo tornado EF4 em Nova Laranjeiras (1997). Fonte: TV Tarobá (2023), adaptado pelos autores.

Os eventos classificados como EF3 (Cascavel, Francisco Beltrão e Marechal Cândido Rondon) apresentaram características comuns, como o colapso de estruturas industriais e de armazenamento, a destruição significativa de residências e danos à vegetação (Figura 02). Em Marechal Cândido Rondon e Cascavel, as estruturas metálicas com ancoragem deficiente apresentaram modos de falha compatíveis com os DoDs previstos, mas em velocidades inferiores às tabeladas, sugerindo que a qualidade construtiva local influencia significativamente os limiares de falha.



Figura 02: Danos provocados pelos tornados de Cascavel, Francisco Beltrão e Marechal Cândido Rondon. Fonte: g1.globo, Folha Uol, Portal Rondon e AEN-PR.

Os eventos em Ponta Grossa ilustram a variação de intensidade, com um tornado EF2 em 2015, que causou danos consideráveis na área urbana, incluindo a remoção completa de telhados e o lançamento de projéteis ("mísseis") a centenas de metros de distância. O evento de 2024, classificado como EF1, apresentou danos mais localizados, concentrados em vegetação, em estruturas agrícolas de menor porte e alguns danos em residências. A remoção de copa observada em araucárias (Araucaria angustifolia) representa um modo de dano não contemplado nos DIs 27 e 28, indicando a necessidade de desenvolvimento de indicadores específicos para a vegetação da região Sul.

Discussão

A literatura técnica confirma que a Escala Fujita Melhorada (EF) foi fundamentada predominantemente em padrões construtivos norte-americanos, utilizando como benchmark a residência unifamiliar de madeira (wood-frame) (WSEC, 2006). Esta "ancoragem regional" é problemática porque a resistência ao cisalhamento e os modos de falha da alvenaria pesada, predominante na América Latina e Europa, diferem mecanicamente das estruturas de madeira leve (Edwards et al., 2013). Estudos indicam que a falha em alvenaria não reforçada frequentemente ocorre por rachaduras diagonais sob tensões de tração, um comportamento não capturado pelos Indicadores de Dano (DIs) originais da EF, podendo gerar erros de classificação de até duas categorias (Lombardo et al., 2023). As observações de campo realizadas no Paraná, que documentaram falha precoce em alvenaria em velocidades 10-20% inferiores às previstas pela EF em todos os seis eventos analisados, encontram eco na literatura que questiona a validade dos Graus de Dano (DoDs) 7 e 8 para estruturas mantidas no lugar principalmente pela gravidade e não por ancoragem mecânica rigorosa (Penn State University, 2024).

O desenvolvimento da Escala Fujita Internacional (IF-Scale) pelo European Severe Storms Laboratory foi motivado justamente pela insuficiência da escala original em contextos de construção robusta (ESSL, 2023). A inovação central da IF-Scale é a substituição de tipos de edifícios específicos por categorias universais ajustadas pelo atributo de "robustez" (sturdiness). Este parâmetro físico permite que o avaliador estime a qualidade da construção in situ — como a espessura das paredes e a presença de reforços — antes de derivar a velocidade do vento, tornando a escala agnóstica em relação ao padrão regional. A aplicação desse conceito ao contexto paranaense, com base nos seis casos analisados, permitiria calibrar as velocidades para telhas cerâmicas e alvenaria estrutural, corrigindo a subjetividade inerente ao julgamento de "construção típica" que limita a EF operacional (ESSL, 2023).

A discrepância entre danos terrestres e medições físicas é um dos conflitos científicos mais documentados na literatura atual. Estudos baseados em radares Doppler móveis (DOW) indicam que a Escala EF subestima sistematicamente a intensidade real de tornados violentos em cerca de 1,5 a 1,6 categorias (Wurman et al., 2021). Pesquisas abrangendo mais de 120 tornados sugerem que aproximadamente 20% dos eventos têm potencial físico para atingir níveis EF4 ou EF5, mas raramente recebem essa classificação oficial devido à falta de Indicadores de Danos robustos em seus rastros (Lyza et al., 2024). Além disso, simulações de Monte Carlo demonstram que em áreas rurais ou de baixa densidade habitacional, a probabilidade de um tornado

violento atingir uma estrutura capaz de registrar o nível máximo de dano (DoD 10) é estatisticamente baixa, levando a uma saturação da classificação em níveis inferiores (Lombardo et al., 2023). Embora o presente estudo não disponha de medições de radar in situ — uma limitação metodológica que deve ser reconhecida —, a classificação do tornado de Nova Laranjeiras como EF4, quando a destruição observada se aproximava dos critérios de EF5 em algumas áreas, sugere que fenômeno semelhante pode estar ocorrendo no Brasil..

A transição de uma meteorologia descritiva para a engenharia forense de ventos é o marco paradigmático das abordagens internacionais para classificação de danos por tornados (Edwards et al., 2013). Embora o fenômeno seja global, a uniformidade das escalas ainda é um desafio, evidenciado pelas adaptações regionais da EF-Scale.

O Japão (JEF-Scale) desenvolveu 30 Indicadores de Danos específicos para suas construções, incluindo estruturas como máquinas de venda automática e veículos ferroviários, calibrados por testes em túneis de vento. O Canadá (CEF-Scale) expandiu para 31 DIs, ajustando as velocidades na extremidade inferior da escala para alinhar-se aos seus protocolos operacionais (NTP, 2025). A Europa, por meio do European Severe Storms Laboratory (ESSL), propôs a Escala Fujita Internacional (IF-Scale), cuja inovação central é a substituição da classificação por tipo de edifício por uma Classe de Robustez (sturdiness) de A a F, permitindo que qualquer estrutura seja avaliada com base em sua integridade física, independentemente do padrão construtivo regional (ESSL, 2023).

Os achados do presente estudo — particularmente a diferença entre o DoD observado em alvenaria (8-9) e o DoD previsto para wood frame (10) em Nova Laranjeiras, bem como os modos de falha não contemplados em estruturas metálicas com ancoragem deficiente e em espécies arbóreas nativas — demonstram que o Brasil enfrenta desafios semelhantes aos que motivaram as adaptações japonesa, canadense e europeia A ausência de DIs específicos para alvenaria estrutural e telhas cerâmicas, bem como para espécies arbóreas nativas (Araucaria angustifolia, Eucalyptus spp.), limita a precisão das classificações e a comparabilidade dos dados brasileiros com os bancos de dados globais.

Além disso, os protocolos internacionais de campo (Post-Storm Data Acquisition) enfatizam a distinção entre danos por tornados (trilhas convergentes e rotacionais) e ventos de linha reta (padrões divergentes), bem como o uso de imagens de satélite (NDVI) para mapeamento de danos em áreas florestais (Karstens et al., 2022). A implementação de tais protocolos pela Defesa Civil e pelo SIMEPAR é um passo necessário para a sistematização da documentação de danos no Brasil.

Diante desse panorama, e com base na análise sistemática dos seis casos-tipo que representam a diversidade territorial e tipológica do Paraná, recomenda-se que o Brasil: (i) desenvolva DIs calibrados para alvenaria estrutural e espécies arbóreas nativas; (ii) adote o conceito de "robustez" (sturdiness) da IF-Scale para superar a subjetividade do julgamento de "construção típica"; (iii) implemente protocolos formais de coleta de dados pós-tempestade; (iv) crie um banco de dados nacional de danos por tornados, alinhado aos esforços globais de padronização. A classificação precisa dos tornados é fundamental para a formulação de políticas públicas eficazes. O conhecimento detalhado da intensidade e dos padrões de danos permite: (a) subsidiar a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros no registro e documentação de eventos futuros; (b) orientar a elaboração de normas técnicas para construções mais resilientes em áreas suscetíveis; (c) fundamentar campanhas educativas voltadas à população; e (d) contribuir para o planejamento urbano e gestão territorial.

A experiência norte-americana, especialmente após o tornado EF5 em Joplin (2011), demonstrou que a análise sistemática de danos pode levar ao aprimoramento de códigos de construção e à implementação de abrigos contra tornados (Kuligowski et al., 2014). No Brasil, a calibração da Escala EF ao contexto nacional — possivelmente por meio dos princípios da IF-Scale — constitui um passo essencial para avançar nessa direção, alinhando-se aos esforços globais de padronização da classificação de intensidade de ventos severos.

Considerações Finais

A análise de seis eventos tornádicos ocorridos no Paraná entre 1997 e 2024 permitiu sua classificação sistemática pela Escala Fujita Melhorada, revelando a ocorrência de um tornado EF4 em Nova Laranjeiras, três EF3 em Cascavel, Francisco Beltrão e Marechal Cândido Rondon, um EF2 e um EF1 em Ponta Grossa. **A seleção desses seis eventos como "casos-tipo" —** representando a diversidade territorial (urbano, rural, industrial) e tipológica (alvenaria, estruturas metálicas, vegetação) do Paraná — demonstra que é preferível uma amostra de n=6 com alta resolução e triangulação de dados do que uma amostra extensa baseada em relatos imprecisos.

Em todos os seis casos analisados, foram identificadas evidências de que os modos de falha observados não correspondem integralmente às calibrações originais da EF: (a) em Nova Laranjeiras, o DoD observado em alvenaria (8-9) foi inferior ao previsto para wood frame (10); (b) em Marechal Cândido Rondon e Cascavel, estruturas metálicas com ancoragem deficiente falharam em velocidades inferiores às tabeladas; (c) em Ponta Grossa 2024, a remoção de copa em araucárias não está contemplada nos DIs 27 e 28. Essa consistência nas discrepâncias, observada na maioria dos eventos analisados, fortalece a hipótese de que a escala norte-americana necessita de calibração para o contexto brasileiro.

Os achados deste estudo alinham-se a um movimento internacional mais amplo de revisão crítica da Escala EF, conforme documentado por Edwards et al. (2013), Lombardo et al. (2023) e pelo ESSL (2023). A aplicação da escala fora do contexto norte-americano introduz vieses sistemáticos que comprometem tanto a precisão das classificações quanto a comparabilidade dos bancos de dados globais. A proposta da IF-Scale, com seu conceito de "robustez" universal, oferece um caminho promissor que merece ser explorado no Brasil.

Reconhecem-se as seguintes limitações do estudo: (i) ausência de medições diretas de velocidade do vento in situ, como aquelas obtidas por radar Doppler móvel; (ii) dependência exclusiva de registros fotográficos e videográficos para inferência dos

danos; (iii) qualidade limitada da documentação para eventos anteriores a 2010. Essas limitações não invalidam as conclusões qualitativas sobre a necessidade de calibração da EF, mas indicam que os percentuais de discrepância devem ser tratados como estimativas baseadas na comparação entre DoDs, e não como valores absolutos validados instrumentalmente.

Com base no diálogo estabelecido com a literatura internacional e nas lições extraídas das adaptações japonesa, canadense e europeia, propõe-se uma agenda de pesquisa para o contexto brasileiro: (i) desenvolvimento de DIs calibrados para alvenaria estrutural, telhas cerâmicas e espécies arbóreas nativas (Araucaria angustifolia, Eucalyptus spp.); (ii) adoção do conceito de "robustez" (sturdiness) da IF-Scale para superar a subjetividade do julgamento de "construção típica"; (iii) implementação de protocolos formais de coleta de dados pós-tempestade pela Defesa Civil e pelo SIMEPAR, incluindo o uso de imagens de satélite (NDVI) para áreas florestais; (iv) criação de um banco de dados nacional de danos por tornados, alinhado aos esforços globais de padronização representados pelo European Severe Weather Database (ESWD).

Tais avanços contribuirão não apenas para uma melhor compreensão científica dos tornados no Brasil, mas também para a formulação de políticas públicas eficazes e para a proposição de técnicas construtivas mais adequadas às características climáticas e estruturais do país, alinhando-se aos esforços globais de padronização da classificação de intensidade de ventos severos.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, L. G.; HORNES, K. L.; ESTIVALLET, J. Ocorrências de tornados no Brasil no período de 1975 a 2018. In: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 32., 2023, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: UEPG, 2023.

EDWARDS, R. et al. Tornado intensity estimation: Past, present, and future. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 5, p. 641-653, 2013.

ESSL (European Severe Storms Laboratory). **The International Fujita Scale and its implementation**. 2023.

HORNES, K. L. (Org.). **Tornados no Brasil**. Ponta Grossa: Toda Palavra, 2022.

KARSTENS, C. D. et al. A method for adding intensity information to NWS preliminary tornado damage paths. In: CONFERENCE ON SEVERE LOCAL STORMS, 30., 2022, Santa Fe. **Anais...** Boston: AMS, 2022.

KULIGOWSKI, E. D. et al. **Final Report, National Institute of Standards and Technology (NIST) Technical Investigation of the May 22, 2011, Tornado in Joplin, Missouri**. Gaithersburg: NIST, 2014.

LOMBARDO, F. T. et al. An approach for assessing misclassification of tornado characteristics using damage. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 62, n. 6, p. 781-799, 2023.

LYZA, A. W. et al. Comparison of Tornado Damage Characteristics to Radar-Observed Wind Speeds. **Monthly Weather Review**, 2024.

MEJ, T. **Avaliação de danos de tornados ocorridos no estado do Paraná utilizando a Escala Fujita Melhorada**. 2025. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2025.

Northern Tornadoes Project (NTP). **Enhanced Fujita Scale (Canadian Implementation)**. Western University, 2025.
Penn State University. **Tornado Impact on Historic Masonry Analysis**. 2024.

STORM PREDICTION CENTER (SPC). **Enhanced Fujita Tornado Damage Scale**. Norman: NOAA, 2014.

WSEC (Wind Science and Engineering Center). **A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)**. Texas Tech University, 2006.

WURMAN, J. et al. Advances in tornado and severe storm research using mobile Doppler radars. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2021.

INUNDAÇÕES URBANAS EM ÁGUAS DE SANTA BÁRBARA: CONDICIONANTES E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO

1 Thomas Adryan Zanoni Machado Santos, 2 Maristela Denise Moresco Mezzomo
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: thomasadryan@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: mezzomo@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Desastres naturais; Fenômenos hidrometeorológicos urbanos; Plano de Contingência.

Resumo

O presente trabalho analisa as causas e consequências das áreas de risco de inundação no município de Águas de Santa Bárbara-SP, investigando a existência de medidas preventivas ou de mitigação. As inundações no Brasil são fenômenos de grande impacto socioeconômico e ambiental, intensificados por ações antrópicas como a impermeabilização do solo e a ocupação em planícies de inundação. A metodologia envolveu o uso de dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), processamento em software QGIS, análise de imagens de satélite junto a dados fornecidos pela prefeitura do município e noticiário local até o ano de 2025. Os resultados identificaram duas áreas de alto risco: a Região Central (Balneário Mizael Marques Sobrinho) e o encontro das ruas das Vertentes e Abel do Império. Embora já tenham sido realizadas algumas medidas pontuais de mitigação, há uma clara carência de políticas públicas estruturantes e de ações preventivas, como a não implementação efetiva da Defesa Civil e a carência de um Plano Diretor que integre o mapeamento de riscos.

Introdução

Os desastres naturais configuram um desafio global crescente, gerando impactos severos nos âmbitos ambiental, econômico e social (Tominaga, 2015). No contexto brasileiro, as inundações destacam-se como um dos fenômenos mais recorrentes e devastadores, resultando frequentemente em perdas de vidas humanas e danos materiais significativos. Tais eventos ocorrem quando o volume de água ultrapassa a calha principal de um curso d'água, atingindo as planícies de inundação ou áreas de várzea, e sua ocorrência é determinada por uma interação complexa entre condicionantes naturais e intervenções antrópicas (Amaral e Ribeiro, 2015).

É fundamental distinguir a inundação de outros processos hidrometeorológicos urbanos: a enchente (ou cheia) caracteriza-se pela elevação do nível da água dentro do canal sem transbordamento; o alagamento decorre de falhas pontuais no sistema de drenagem; e a enxurrada apresenta um escoamento superficial de alta energia (Min. Cidades/IPT 2007). Além da destruição física, esses eventos representam riscos graves à saúde pública devido à proliferação de doenças como leptospirose e hepatite A, além do perigo associado ao surgimento de animais peçonhentos nos destroços (Min. Saúde, 2025).

Para enfrentar essa problemática, a Lei Federal nº 12.608/2012 estabeleceu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), que impõe aos municípios o dever de mapear áreas de risco e elaborar estratégias de enfrentamento. Entre as medidas não estruturais mais relevantes está o Plano de Contingência, ferramenta que atua na gestão de desastres em três fases: na prevenção, por meio do monitoramento meteorológico e educação ambiental; na emergência, com protocolos de resposta imediata e evacuação; e no pós-evento, focando na recuperação e segurança das áreas afetadas (Brasil, 2012).

Sob esta perspectiva, este trabalho tem como finalidade analisar as causas e consequências das áreas de risco de inundação no município de Águas de Santa Bárbara-SP, bem como investigar a existência de medidas preventivas ou de mitigação para esses eventos até o ano de 2025.

Material e Métodos

O município de Águas de Santa Bárbara localiza-se no centro-oeste do estado de São Paulo, na mesorregião de Bauru (IBGE, 2024). Insere-se no Planalto Ocidental Paulista, com relevo de colinas suaves e altitudes entre 600 e 688 metros (Lazaretti e Tomita, 2017). O clima é subtropical úmido (Cfa), com chuvas concentradas no verão (média de 253 mm em janeiro) e precipitação anual de 1.437 mm (ClimaData, 2025). O uso do solo é predominantemente agropecuário (82,37 km²), com destaque para silvicultura, cana-de-açúcar e soja, enquanto a área urbana ocupa 12,17 km² dos 404,6 km² do município (MapBiomas, 2024).

A identificação das áreas de risco de inundação no município fundamentou-se em dados do Sistema de Geociências do Serviço Geológico do Brasil (GeoSGB/CPRM), especificamente em relatórios, mapas e fichas técnicas produzidos em 2017. Esses documentos permitiram a delimitação de setores com alto e muito alto risco para fenômenos como inundações, enchentes, alagamentos e movimentos de massa. A partir desse diagnóstico, realizou-se uma investigação técnica sobre as causas e consequências desses eventos, verificando a execução de medidas mitigadoras ou preventivas no período compreendido até o ano de 2025. Para a manipulação de dados geoespaciais e elaboração de cartografia temática, utilizou-se à mão livre o *software* QGIS versão 3.40.7, complementado pelo uso de imagens temporais e ferramentas do *software* Google Earth versão 7.3.7 para a análise da evolução da ocupação do solo e das intervenções estruturais na malha urbana. O levantamento de dados foi robustecido por informações institucionais fornecidas pela Secretaria Municipal de Obras após uma entrevista não estruturada, além da análise de dados secundários provenientes de registros midiáticos sobre episódios históricos de inundação em Águas de Santa Bárbara-SP. Essas informações foram tratadas como fontes qualitativas de apoio à análise, contribuindo para a contextualização dos eventos.

.**Resultados e Discussão**

A partir dos relatórios do SGB/CPRM de 2017, foram identificadas três áreas com inundações recorrentes em dois Setores, ambos localizados em Áreas de Preservação Permanente (APP) e de alto risco de inundação (Lazaretti e Tomita, 2017), detalhadas na Figura 1.

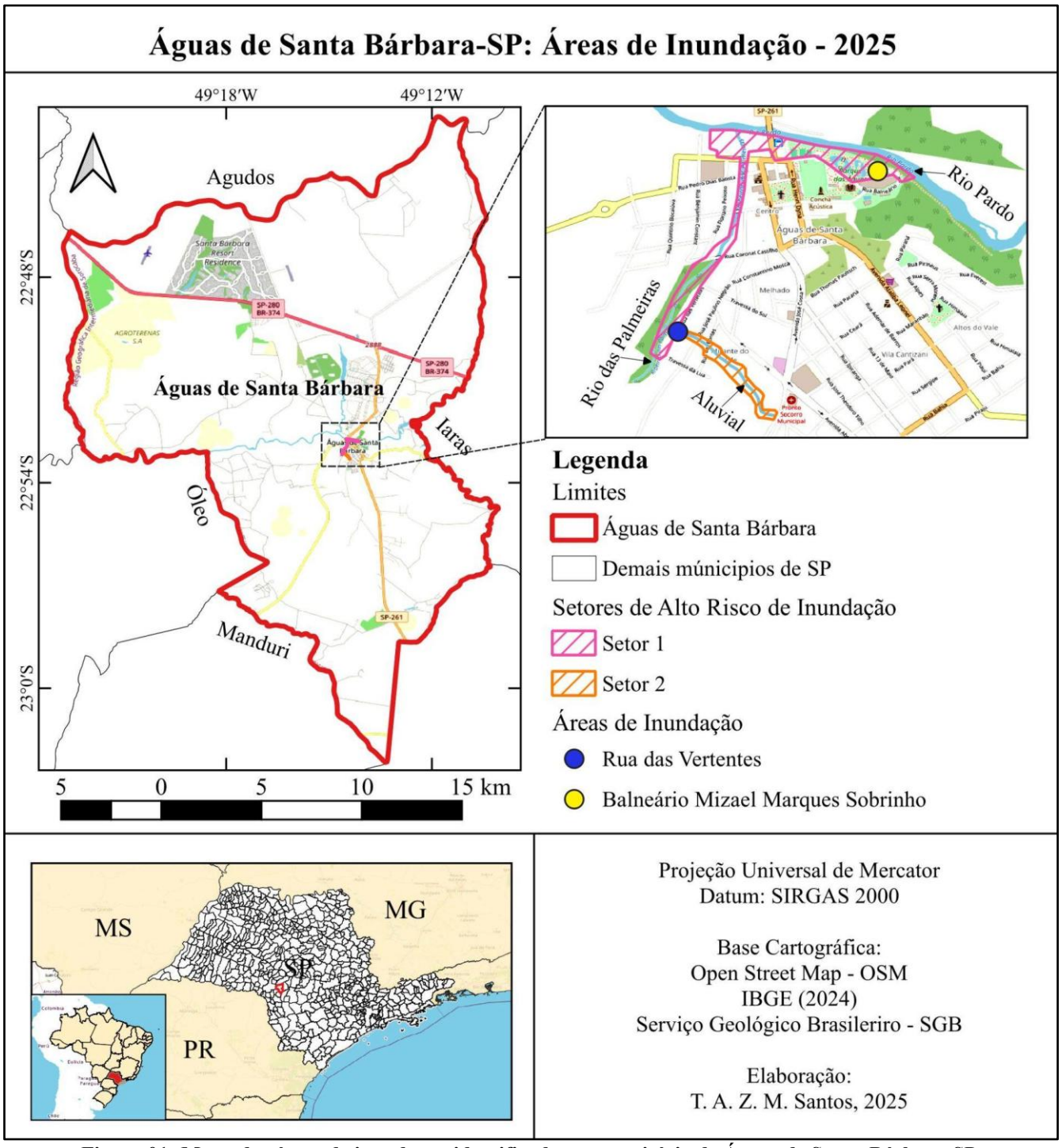


Figura 01: Mapa das áreas de inundação identificadas no município de Águas de Santa Bárbara-SP.
Fonte: Adaptado de Lazaretti e Tomita (2025)

A primeira está localizada no Setor 1, que compreende a margem esquerda do Rio Pardo, incluindo o Balneário Mizael Marques Sobrinho. Construído na década de 1960, o empreendimento foi implantado em uma planície de inundação natural, com base em relatos históricos sobre propriedades curativas e cicatrizantes das águas subterrâneas, registrados desde o período da escravidão (ALESP, 2010). Em decorrência dessa localização, sofreu eventos críticos em 13 de janeiro de 2016, conforme ilustrado na Figura 2, e em 21 de maio de 2017, conforme registrado na Figura 3.



Figura 02: Registro de inundação nas dependências do Balneário Mizael Marques Sobrinho em 13 de janeiro de 2016. Fonte: G1, 2016



Figura 03: Impactos do transbordamento do Rio Pardo no Balneário Mizael Marques Sobrinhol em 21 de maio de 2017. Fonte: Lazaretti e Tomita, 2017

Nestas datas, as vazões máximas atingiram 431,25 m³/s e 142,81 m³/s, valores expressivamente superiores à média de 68,5 m³/s (ANA, 2025), resultando no alagamento de fontes, estacionamentos e poços minerais devido ao refluxo de água pelas bocas de lobo. A intensificação desses episódios é atribuída ao assoreamento do Rio Pardo e à operação de uma Pequena Central

Hidrelétrica (PCH) localizada a montante, cerca de 2,2 km de distância, que realizava a abertura de comportas sem aviso prévio, evidenciando a ausência de um sistema de alerta municipal (Lazaretti e Tomita, 2017). É importante ressaltar que atualmente, embora a PCH promova projetos de recuperação ambiental e treinamentos de emergência em conformidade com a Lei Federal n.º 12.334/2010, as características técnicas indicam que o empreendimento foi projetado com finalidade principal de geração de energia elétrica, não apresentando elementos típicos de estruturas destinadas ao controle de inundações, como volume de amortecimento de cheias (PCH Ponte Branca, 2025; ANA, 2022).

A segunda localiza-se na interseção entre os Setores 1 e 2 , no bairro Mirante do Vale, com destaque para a Rua das Vertentes, inserida em APP, no encontro do afluente do Rio das Palmeiras. Em 2017, o afluente apresentava drenagem precária, com margens erodidas e elevado assoreamento, como demonstrado na Figura 4. Análises temporais por imagens de satélite na Figura 5 revelam que, entre 2017 e 2024, houve perda de cobertura vegetal e aumento da impermeabilização das vias.



Figura 04: Evidências de assoreamento e degradação em margens de afluente do Rio das Palmeiras.
Fonte: Lazaretti e Tomita, 2017



Figura 05: Análise temporal da evolução da ocupação urbana e impermeabilização na Rua das Vertentes (2017-2024).
Fonte: Google Earth, adaptado pelo autor, 2026

Após a análise dos relatórios, foi realizada uma entrevista com a Secretaria Municipal de Obras com o objetivo de verificar a existência de intervenções voltadas à mitigação ou prevenção dos impactos identificados. Em resposta, foram

disponibilizados projetos de drenagem referentes ao bairro Mirante do Vale, não havendo, entretanto, previsão de implantação de obras semelhantes para a área do Balneário. No bairro Mirante do Vale, foram executadas obras de pavimentação com lajotas, visando à redução parcial do escoamento superficial (Figura 6), além da instalação de uma aduela de concreto (Figura 7) para auxiliar na condução das águas pluviais.

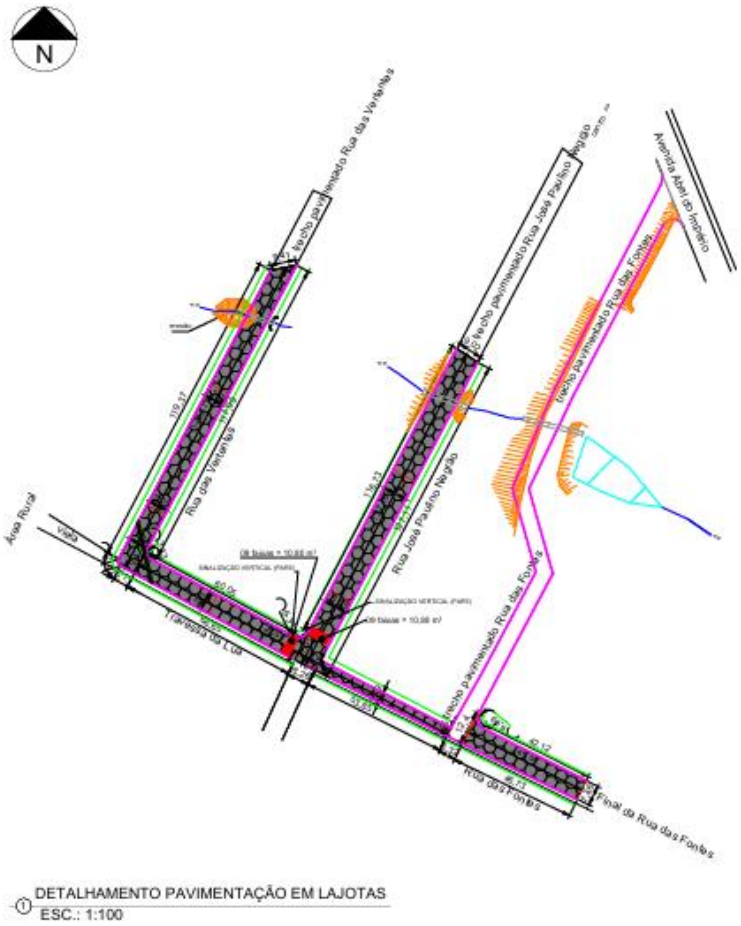


Figura 06: Detalhamento do projeto de pavimentação permeável com lajotas para controle de escoamento.
Fonte: Águas de Santa Bárbara, 2021

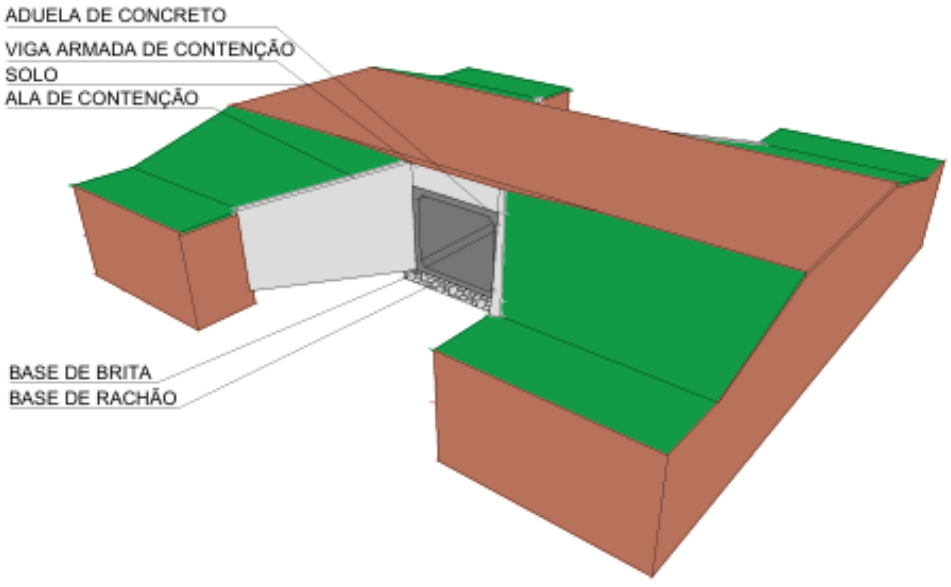


Figura 07: Instalação de aduela de concreto para ampliação da capacidade de drenagem pluvial.
Fonte: Águas de Santa Bárbara, 2021

A análise dos dados aponta uma fragilidade institucional na gestão de riscos em Águas de Santa Bárbara. Apesar da obrigatoriedade imposta pela Lei Federal n.º 12.608/2012, o Plano Diretor municipal (Lei Complementar n.º 29/2006) não integra o mapeamento de áreas de risco, e instrumentos cruciais como o Plano de Macro Drenagem tiveram seus prazos estendidos por dez anos (Águas de Santa Bárbara, 2006). Embora a Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC) tenha sido legalmente instituída em 2024 pela Lei Municipal n.º 1.962 (Águas de Santa Bárbara, 2024), sua implementação efetiva ainda não ocorreu, o que compromete a capacidade de coordenação e resposta em períodos críticos, mantendo a predominância de ações emergenciais pontuais sobre políticas preventivas estruturantes. A vulnerabilidade persiste em outras zonas, como no encontro do Rio das Palmeiras e Rio Pardo, onde residências ocupam áreas suscetíveis a cheias, conforme a Figura 8.



Figura 08: Edificações localizadas em Área de Preservação Permanente na confluência dos Rios das Palmeiras e Pardo. Fonte: Lazaretti e Tomita, 2017

Considerações Finais

A situação observada em Águas de Santa Bárbara ilustra uma tendência recorrente no cenário brasileiro, no qual ações emergenciais frequentemente prevalecem sobre estratégias preventivas, comprometendo a resiliência urbana diante de eventos hidrometeorológicos extremos. Embora o mapeamento das áreas de risco tenha sido estabelecido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) desde 2017 e intervenções mitigadoras pontuais tenham sido executadas, como a pavimentação permeável e a instalação de uma aduela, persiste uma carência de políticas públicas estruturantes e de ações preventivas de caráter contínuo. A inexistência de um Plano Diretor que incorpore efetivamente as áreas de risco, em conformidade com a Lei Federal n.º 12.608/2012, somada à não implementação operacional da Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC), mesmo após sua criação legal em 2024, evidencia uma fragilidade institucional na gestão de riscos de desastres no município. Portanto, torna-se imperativo que a administração municipal avance na consolidação desses instrumentos de planejamento e gestão para prevenir e minimizar os impactos socioeconômicos e ambientais de futuros desastres naturais.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Prefeitura Municipal da Estância Hidromineral de Águas de Santa Bárbara, em especial à servidora Tatiane Rosa Ali Zanoni Machado, pela valiosa assistência e informações prestadas durante a coleta de dados. Ao secretário municipal de obras e saneamento e sua assessoria por fornecer os planos de projeto de drenagem. Agradecemos também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio institucional no desenvolvimento desta pesquisa. Estendem-se os agradecimentos ao Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) pela disponibilização dos relatórios e dados técnicos fundamentais para a identificação das áreas de risco no município.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Definições importantes sobre segurança de barragens.** Brasília: Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), 2022. Disponível em https://www.snirh.gov.br/portal/snisb/Entenda_Mais/outros/definicoes-importantes-sobre-seguranca-de-barragem.pdf#:~:text=Sistemas%20extravasores:%20s%C3%A3o%20sistemas%20de%20maior%20import%C3%A2ncia,rio%20a%20jusante%2C%20descarga%20segura%20a%20jusante.. Acesso em: 06 abr. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **HidroWeb - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: http://hidroweb.ana.gov.br/. Acesso em: 30 jul. 2025.

ÁGUAS DE SANTA BÁRBARA (SP). Secretaria Municipal de Obras. **Projeto de drenagem urbana da Rua das Vertentes.** Águas de Santa Bárbara, 2021.

ÁGUAS DE SANTA BÁRBARA. Lei Complementar n.º 29, de 09 de outubro de 2006. Disponível em: https://www.camaraasb.sp.gov.br//temp/31032026184547download_lei_29.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

ÁGUAS DE SANTA BÁRBARA. Lei n.º 1.962, de 26 de dezembro de 2024. Disponível em: http://camaraasb.sp.gov.br//temp/01072025235004download_lei_1962.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO (ALESP). **A Estância Hidromineral de Águas de Santa Bárbara**. São Paulo, 2010. Disponível em: https://www.al.sp.gov.br/noticia/?id=268246 . Acesso em: 05 abr. 2026.

BRASIL. Lei n.º 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 abr. 2012. Disponível em: https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Legislacao/Lei%2012.608%20-%20Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de%20Defesa%20Civil.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

CLIMADATA. **Clima de Águas de Santa Bárbara**. Disponível em: https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/aguas-de-santa-barbara-287267/. Acesso em: 30 jul. 2025.

G1. **Balneário cancela visitação de 300 turistas diários após alagamento**. G1 Itapetininga e Região, Itapetininga, 13 jan. 2016. Disponível em: https://g1.globo.com/sao-paulo/itapetininga-regiao/noticia/2016/01/balneario-cancela-visitacao-de-300-turistas-diarios-apos-alagamento.html. Acesso em: 30 jul. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**, 2024. Disponivel em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/aguas-de-santa-barbara/panorama. Acesso em: 05 abr. 2026

LAZARETTI, Andrea Fregolente; TOMITA, Sueli Akemi (ed.). **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes, inundações e movimentos de massa: Águas de Santa Bárbara, SP**. Águas de Santa Bárbara: CPRM, 2017. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20199. Acesso em: 30 jul. 2025.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas – Coleção 10 – 1985 a 2024 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil.** 2025. Disponível em: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_10/lulc/coverage/brazil_coverage_2024.tif. Acesso em: 30 jul. 2025.

MINISTÉRIO DAS CIDADES / INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios.** Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p

PCH PONTE BRANCA. **O empreendimento.** Disponível em: https://www.pchpontebranca.com.br/. Acesso em: 06 abr. 2026.

TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela do (Org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015. 196 p. Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/05/Conhecer_para_Prevenir_3ed_2016.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

ANÁLISE DE DESASTRE NATURAL A PARTIR DE PUBLICAÇÕES NA MÍDIA: O CASO DO CIM-COIMBRA, 2026, PORTUGAL

1 Jacqueline R. Bringhenti, 2 Luis M. Araújo Santos, 3 Elano Silva Peres, 4 Wanda M. Risso Günther
1 Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), e-mail: jacquelineb@ifes.edu.br; 2 Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (Isec), e-mail: lmsantos@isec.pt; 3 Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), e-mail: elanosilvaperes0@gmail.com; 4 Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo (FSP/USP), e-mail: wgunther@usp.br.

Palavras-chave: Desastre natural; Cobertura midiática; Resíduo de desastre.

Resumo

Eventos climáticos extremos têm intensificado seus impactos em áreas urbanas, gerando não apenas danos sociais e estruturais, mas também grandes volumes de resíduos de desastres (RD), cuja gestão ainda recebe atenção limitada no debate público. Nesse contexto, este estudo investigou a cobertura midiática dos eventos extremos que atingiram a Comunidade Intermunicipal de Coimbra (CIM-Coimbra) nos meses de janeiro e fevereiro de 2026, período marcado pela atuação sucessiva das depressões Kristin, Leonardo e Marta, responsáveis por graves impactos na região. O objetivo foi analisar como a temática dos resíduos sólidos e limpeza pública foi abordada pela mídia. Trata-se de uma pesquisa documental, de abordagem qualitativa, com dados coletados pelo período em três meses, a partir de notícias veiculadas na CNN Portugal, no Diário de Coimbra e na página oficial da Câmara Municipal de Coimbra. A cobertura concentrou-se no mês de fevereiro, acompanhando o agravamento dos eventos. Os conteúdos foram classificados com base em cinco categorias temáticas e analisados quanto à distribuição temporal e frequência. Foram identificadas 82 notícias, resultando em 158 categorias temáticas. Observou-se predominância das dimensões social/cultural e saneamento/infraestrutura, enquanto a categoria relacionada aos resíduos sólidos e limpeza pública apresentou baixa frequência. Conclui-se que há um descompasso entre a relevância da adequada gestão dos RD e sua limitada visibilidade na mídia, evidenciando a necessidade de maior inserção do tema na comunicação sobre desastres e no apoio à formulação de políticas públicas.

Introdução

Desastres naturais impactam a infraestrutura urbana e a qualidade de vida, revelando a complexidade das questões socioambientais urbanas. Diante da vulnerabilidade a esses eventos extremos, é fundamental compreender como as populações afetadas recebem informações sobre os fenômenos. Segundo Oliveira *et al.* (2024), a mídia desempenha um papel crucial na formação da opinião pública, podendo atuar como agente educativo ou como redutora de complexidade. No megadesastre de Porto Alegre, Brasil, em 2024, os meios de comunicação foram centrais na sistematização e divulgação de informações sobre variados temas como os resíduos de desastres (RD), dando visibilidade a seus impactos, as falhas na gestão e disputas de responsabilidades (JUNQUEIRA; GÜNTHER; BRINGHENTI, 2025).

As cheias e inundações fluviais estão entre os eventos naturais mais recorrentes em escala global (CRED; UNDRR, 2024). Pesquisas evidenciam que tais eventos extremos podem desencadear efeitos em cascata sobre infraestruturas críticas, ampliando seus impactos no ambiente urbano (QIN et al., 2023). Essas interações afetam sistemas como transporte, energia e saneamento, gerando danos materiais expressivos e grandes volumes de resíduos. Nestes casos, a cobertura midiática enfrenta o desafio adicional de equilibrar clareza e complexidade na difusão dessas informações, que podem influenciar a compreensão pública de seus impactos sistêmicos."

Nos primeiros meses de 2026, a Comunidade Intermunicipal de Coimbra (CIM - Coimbra) e outras partes de Portugal e da Europa foram atingidas por eventos meteorológicos intensos com destaque para a tempestade Kristin e as depressões Leonardo e Marta, além de chuvas intensas a partir da segunda semana de fevereiro. Esses eventos desencadearam inundações fluviais, resultando em perdas humanas, deslocamento de populações, danos a habitações e à infraestrutura urbana, além de interrupções de serviços essenciais e prejuízos superiores a dezenas de milhões de euros (PÚBLICO, 2026), revelando fragilidades na resposta a desastres e suas consequências como é o caso da geração de grandes volumes de RD.

O rio Mondego destaca-se nesse cenário, pela importância estratégica para a região da CIM-Coimbra, e pelo histórico secular de eventos extremos: entre 1200 e 2021, foram identificadas 296 cheias na bacia, das quais 32 foram classificadas como catastróficas (PARDAL et al., 2022). Apesar das obras de regularização na década de 1980, o rio permanece parcialmente controlado. O evento de fevereiro de 2026 reforça essa condição, evidenciando a importância da análise integrada da resposta institucional e da atuação da mídia, sobretudo considerando que a percepção social do risco é fortemente mediada pelos processos de comunicação.

Diante disso, o estudo de caso ora apresentado investigou a cobertura midiática dos eventos extremos que atingiram a CIM-Coimbra nos meses de janeiro e fevereiro de 2026, com a finalidade de identificar e analisar como o tema resíduo sólido foi abordado pela mídia, como contribuição para o aprimoramento de políticas públicas de gestão de desastres.

Material e Métodos

Para a consulta de informações na mídia jornalística, foram selecionados dois veículos de comunicação: um portal de notícias de alcance nacional (CNN Portugal) e um outro de grande circulação na CIM-Coimbra (Diário de Coimbra), onde se

localizam municípios diretamente impactados pelo desastre natural avaliado da CIM Região de Coimbra, especialmente os do Baixo Mondego (figura 1). Adicionalmente, foram realizadas buscas por notícias na página oficial da Câmara Municipal de Coimbra.

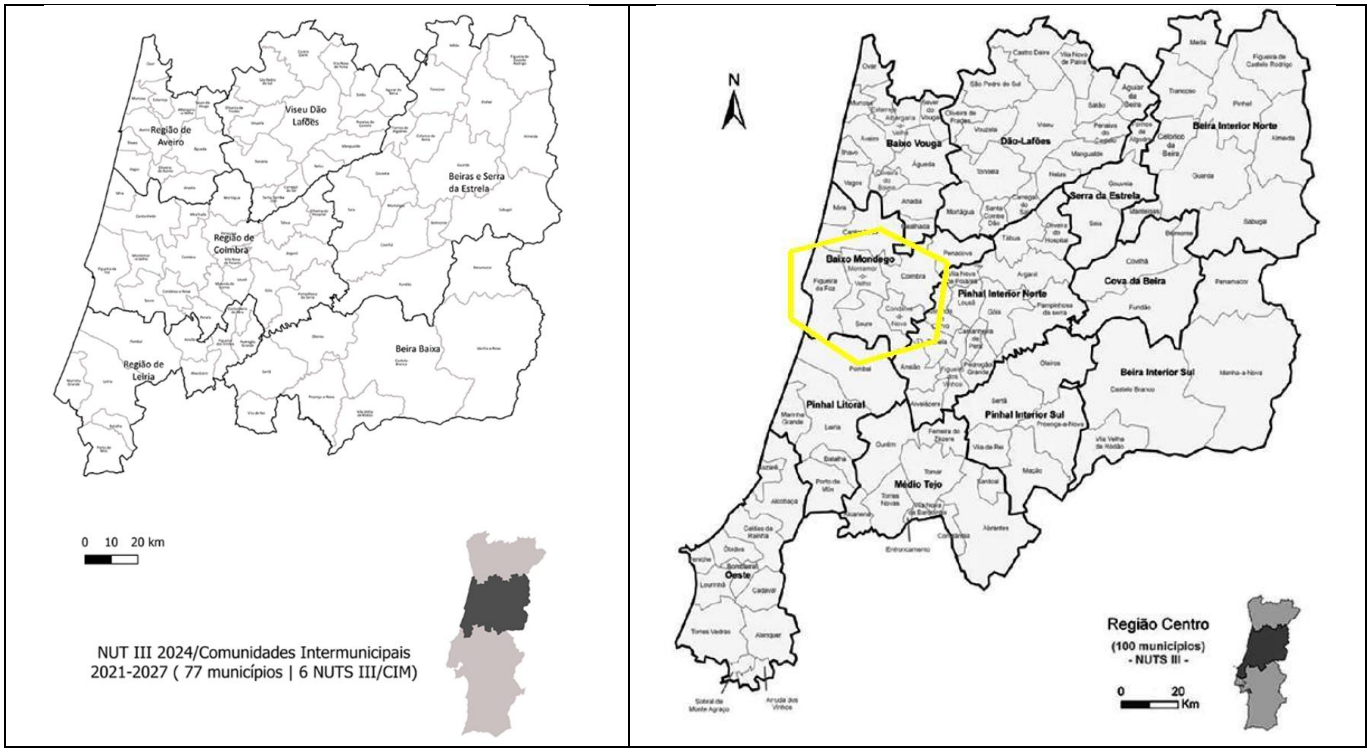


Figura 1 - Localização das áreas de estudo.
Fonte: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro (CCDRC)

Trata-se de pesquisa documental e qualitativa, com horizonte temporal para coleta de dados e informações de três meses. As etapas metodológicas estão detalhadas na Tabela 1.

Etapa	**Passos**
Seleção da área de estudo: Região CIM-Coimbra (19 municípios) Recorte amostral (N=12) Cantanhede, Coimbra, Condeixa-a-Nova, Figueira da Foz, Mealhada, Mira, Miranda do Corvo, Montemor-o-Velho, Mortágua, Penacova e Soure	Critério – municípios diretamente afetados pelos eventos climáticos extremos
Planejamento	Descritores de busca: “mau tempo”, “precipitação”, “cheias”, “Tempestade Kristin Coimbra”, “Tempestade Leonardo Coimbra”, “Depressão Leonardo Coimbra”, “Tempestade Martha Coimbra”, “cheias Mondego Coimbra”, “Inundações Mondego Coimbra”, “resíduos”, “destroços”, “limpeza”, “resíduos”, “destroços”, “dragagem” Seleção de portais de notícias: De âmbito nacional: CNN Portugal De âmbito regional: Diário de Coimbra Sites oficiais de governo: Câmara Municipal de Coimbra Elaboração e ajustes de planilha Excel auxiliar para compilação, quantificação e análise dos resultados
Busca de notícias e tratamento dos resultados	Busca de notícias em plataformas virtuais com uso dos descritores definidos Período de coleta de dados: janeiro a março de 2026 Classificação das notícias com uso de palavras-chave (Quadro 2) Registro de informações na planilha Excell segundo as variáveis: dia, mês, título

	e subtítulo da notícia, portal de notícia pesquisado, classificação por categorias (Resíduos e limpeza pública, Saneamento e Infraestrutura, Saúde e ambiente, Social e cultura, e Econômico) e link de acesso
Referencial teórico	Revisão bibliográfica - descritores: desastre; desastre meteriológico, resíduos de desastres; gestão de resíduos de desastres; mídia, notícia.
Análise e discussão – O papel da mídia na gestão dos eventos extremos que atingiram a CIM-Coimbra	

Tabela 1. Etapas metodológicas

A análise inicial das notícias selecionadas teve caráter geral e objetivou identificar os impactos diretos e indiretos do desastre avaliado em diversas áreas ao longo do tempo. Partindo do conceito do tripé da sustentabilidade (social, ambiental e econômico), foram adotadas cinco categorias temáticas: i) *Resíduos e limpeza pública*; ii) *Saneamento e infraestrutura*; iii) *Saúde e ambiente*; iv) *Social e cultural* e v) *Econômica*, apresentadas na Tabela 2. Adicionalmente, buscou-se compreender como os impactos em relação as diferentes categorias avaliadas foram apresentados pela mídia com regional. O município foi o foco da análise esta etapa por constituir o nível em que se organizam e executam as políticas locais de gestão e gerenciamento de resíduos.

TEMA	PALAVRAS-CHAVE	
Resíduos e limpeza pública	resíduo lixo destroço entulho escombros lama/ areia limpeza operações/ ação de limpeza	árvores caídas/ galhos/ madeira recolha sucata monos objetos volumosos armazenamento temporário zona de deposição temporária aterro / aterro sanitário
Saneamento e infraestrutura	reabertura de vias/ de estradas corte de estrada/ estradas cortadas autoestrada acessos pontes colapso rutura dique	reconstrução abastecimento de água saneamento drenagem bombagem energia eletricidade telecomunicações
Saúde e ambiente	doenças contaminação riscos para a saúde	saúde mental saúde pública mudanças climáticas
Social e cultural	evacuação aviso a população/ alerta de risco retirada de pessoas/ retirada de zonas de risco populações afetadas desalojados desaparecidos mortes/ vítimas mortais feridos	acolhimento de emergência abrigos salvaguardar bens kit sobrevivência voluntariado donativos patrimônio histórico/ cultural sítios patrimoniais
Econômico	prejuízos danos/ danos materiais impactos econômicos custos empresas	emprego apoio de emergência apoio ao arrendamento indenizações sinistros/ seguros

Tabela 2 -Temas e palavras-chave utilizadas na categorização das notícias
Fonte: Os autores (2026)

Assim, após a leitura, os conteúdos foram selecionados e sistematizados com base nas categorias previamente definidas e classificados com uso de palavras-chave (Tabela 2). Em seguida, os dados foram quantificados e organizados em tabelas e figuras para subsidiar a análise. O processo avaliou a variação quantitativa de publicações ao longo dos meses, as categorias temáticas exploradas e os fatores que justificaram a maior frequência de determinados temas em alguns períodos, assim como a ausência ou redução de publicações em outros. Na etapa seguinte, a análise concentrou-se na importancia atribuída ao tema dos resíduos sólidos nas notícias veiculadas pelos veículos de comunicação selecionados.

Resultados e Discussão

No total foram selecionadas 82 notícias dos veículos selecionados, que resultaram na identificação de 158 categorias temáticas a partir da leitura de seu conteúdo e uso de palavras-chave (Tabela 3). Em diversas notícias foi possível identificar mais de uma categoria, em função da abordagem abrangente dos conteúdos.

Portal de notícia	N. notícias avaliadas	N. categorias identificadas
CNN - Portugal	30	66
Diário de Coimbra	45	77
Sites – Câmara Municipal de Coimbra	7	13
Total	82	158

Tabela 3 – Distribuição de notícias avaliadas e categorias identificadas, segundo portal consultado, 2026
Fonte: Os autores (2026)

No portal de noticia de abrangencia nacional, CNN Portugal, destacam-se as categorias social e cultural (42,5%) e saneamento e infraestrutura (40,9%), com baixa participação das demais. De forma semelhante, no canal de mídia de ámbito regional, Diário de Coimbra, essas mesmas dimensões concentram a maior parte dos registros, com 40,2% para saneamento e infraestrutura e 36,4% para social e cultural, embora se observe maior participação relativa da categoria econômica (14,3%). Já no portal local da Câmara Municipal de Coimbra, verifica-se predominância da dimensão social e cultural (46,1%), seguida de saneamento e infraestrutura (30,8%), além de participação mais expressiva das categorias econômica (15,4%), e saúde e ambiente (7,7%), conforme apresentado na Figura 2.

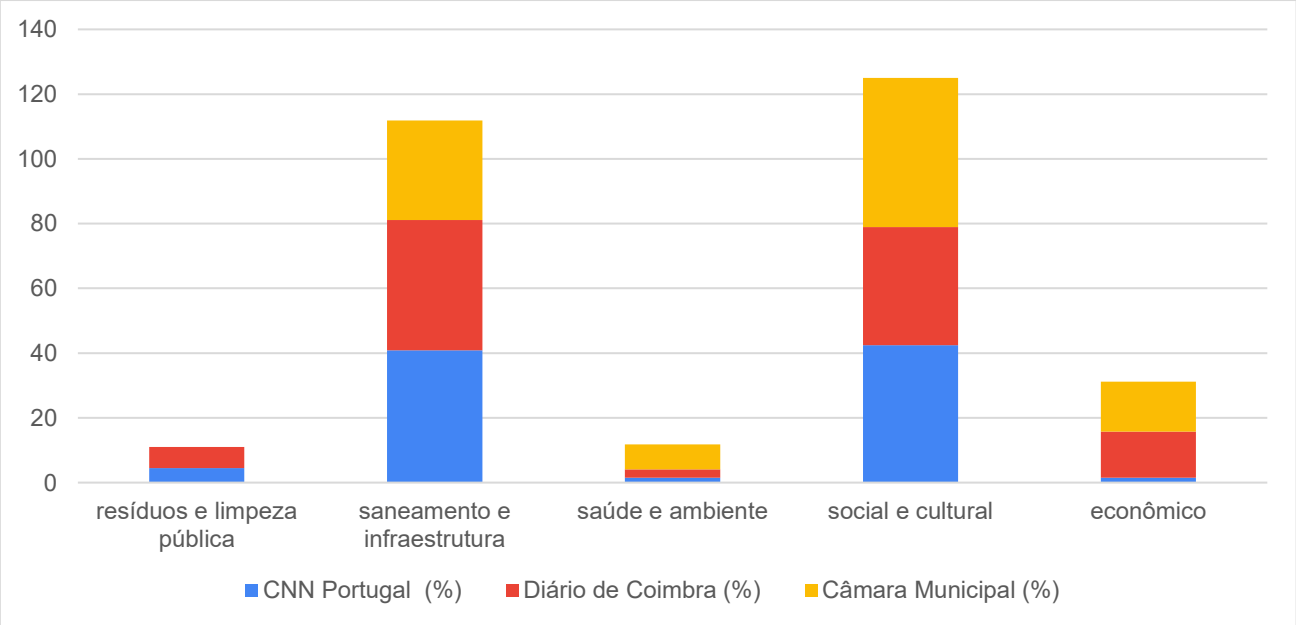


Figura 2 - Distribuição das categorías temáticas identificadas nas noticias levantadas, por portal de noticia avaliado, período de janeiro a março de 2026
Fonte: Os autores (2026)

A distribuição das categorias temáticas identificadas, mostrada na Figura 2, revela um padrão recorrente entre os portais avaliados, o qual pode estar asociado à tendencia de priorizar e reiterar assuntos com maior potencial de mobilizar a atenção pública, como impactos sociais imediatos e danos à infraestructura. Adicionalmente observa-se a menor presença das temática resíduos e limpeza pública e saúde e ambiente, o que sugere uma lacuna na visibilidade desses temas, apesar de sua relevância no contexto de desastres. Essa limitada atenção revela um descompasso com a realidade enfrentada pelos gestores locais, uma vez que eventos extremos, como os que atingiram a região da CIM Coimbra, estão frequentemente associados à RD, os quais constituem um fluxo adicional de rápida acumulação, com potenciais impactos à saúde pública e ao ambiente. Em um único evento, esses resíduos podem atingir volumes entre 5 e 15 vezes superiores à produção anual regular da comunidade afetada (Brown e Milke, 2011), impondo desafios substanciais às ações de resposta e recuperação.

Ao analisar a distribuição temporal das publicações (Figura 3), observa-se que embora a série de eventos climáticos extremos que atingiu a região do CIM-Coimbra tenha iniciado em janeiro de 2026 (Tabela 4), a cobertura jornalística concentrou-se no mês de fevereiro com 64 publicações (78,0%), coincidindo com o pico das cheias cujos efeitos passaram a interferir de forma mais intensa na rotina das cidades e da população.

Janeiro 2026 – 4ª. Semana (26 a 31 de Janeiro) **28 Jan.** – Depressão / Tempestade Kristin (tempestade extratropical com características de ciclone intenso). Atingiu o Centro de Portugal, incluindo Coimbra, Leiria e distritos vizinhos, bem como a Espanha e parte do Mediterrâneo. **Fevereiro 2026 – 1ª. semana (1 a 7 de fevereiro)** **2–3 Fev.** – Depressão Leonardo (Nova depressão significativa com chuva forte e ventos moderados). Atingiu o Centro de Portugal e áreas costeiras. Agravou a saturação do solo e elevou os níveis hidrológicos. **6–8 Fev.** – Tempestade Marta (Tempestade sucessora com chuva intensa, neve e ventos fortes). Atingiu Portugal e Espanha, ampliando os danos acumulados anteriormente. **Fevereiro 2026 – 2ª. semana (8 a 14 de fevereiro)** **9–15 fev.** – Persistência de precipitações e agravamento hidrológico. A continuidade das chuvas intensas resultou em inundações significativas, com evacuação de populações e danos severos como o rompimento de diques do rio Mondego.

Tabela 4. Linha do tempo dos eventos climáticos extremos que atingiram a região do CIM-Coimbra, 2026

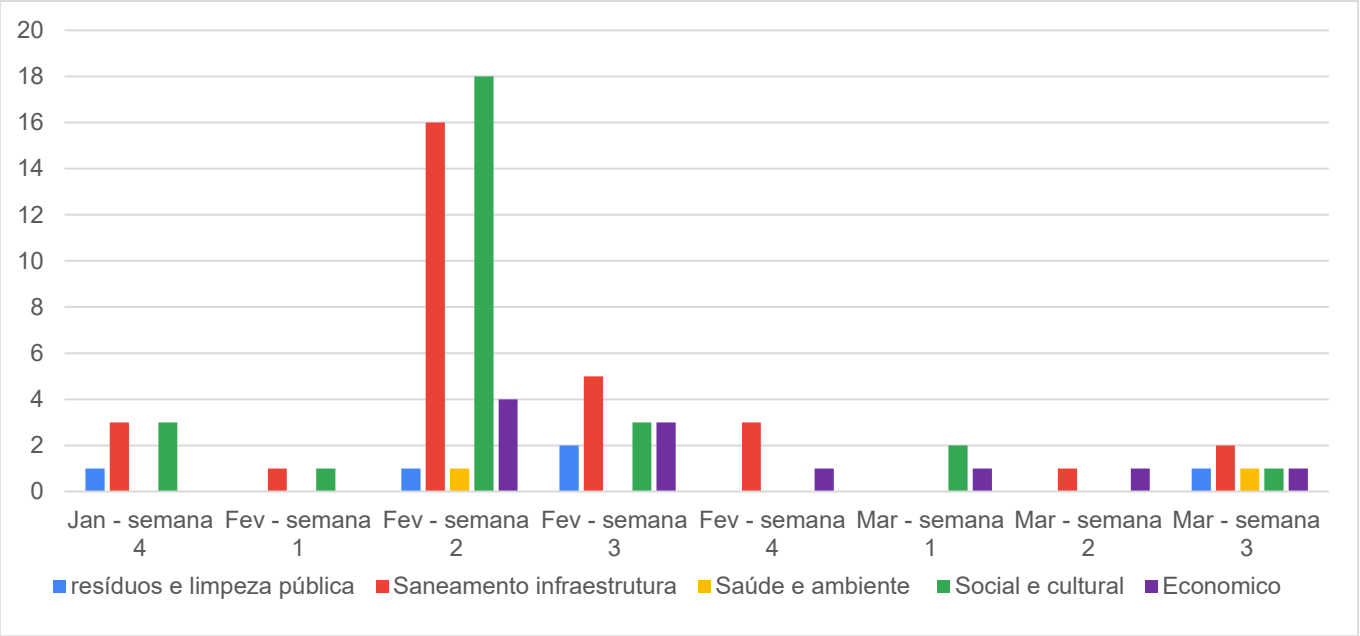


Figura 3 - Distribuição de notícias veiculadas pelo portal de notícias Diário de Coimbra, por categoria temática, período de janeiro a março de 2026
Fonte: Os autores (2026)

Neste contexto, observa-se que, apesar da tempestade Kristin ter provocado seis mortes em Portugal, com rajadas de vento de até 202 km/h, deixando populações das áreas afetadas sem eletricidade e causado danos significativos em infraestruturas (CIDADES PELO CLIMA, 2026), foi a continuidade dos eventos que intensificou impactos e levou à necessidade de evacuação de áreas afetadas, refletindo em maior cobertura da mídia no mês de fevereiro.

Considerações Finais

O estudo evidenciou o papel da mídia na comunicação dos eventos extremos que atingiram a CIM-Coimbra nos meses de janeiro e fevereiro de 2026. A análise revelou que a cobertura jornalística se concentrou nos impactos sociais e nas condições de saneamento e infraestrutura, enquanto a temática dos resíduos sólidos e limpeza pública recebeu atenção limitada, apesar de sua relevância processos de resposta e recuperação pós-desastre.

Os resultados indicam que a baixa presença desse tema na mídia tende reduzir sua visibilidade no debate público e, por consequencia, limitar a incorporação dessa dimensão nas estratégias de resposta e planejamento. Considerando que a gestão dos RD contitui aspecto crítico no cenário contemporaneo, marcado pela recorrencia de eventos extremos, a identificação dessa lacuna reforça a necessidade de ampliar sua inserção na comunicação midiática e nas agendas institucionais.

Recomenda-se aprofundar estudos sobre as interações entre mídia e gestão de resíduos gerados em desastres, com vistas a fortalecer a resiliência urbana e qualificar as respostas a eventos futuros.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Instituto Federal do Espírito Santo e ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BROWN C.; MILKE M.; SEVILLE E. Disaster waste management: A review article. **Waste Management**, v.31, p.1085-1098, 2011. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.027.

CIDADES PELO CLIMA. *Eventos extremos estão a intensificar-se: o que revelam as tempestades que atingiram Portugal e Espanha*. 2026. Disponível em: https://cidadespeloclima.pt/2026/03/06/eventos-extremos-estao-a-intensificar-se-o-que-revelam-as-tempestades-que-atingiram-portugal-e-espanha/. Acesso em: 9 abr. 2026.

COMISSÃO DE COORDENAÇÃO E DESENVOLVIMENTO REGIONAL DO CENTRO (CCDRC). Comunidades Intermunicipais – Região Centro. Disponível em: https://www.ccdrc.pt/pt/comunidades-intermunicipais-cim/. Acesso em: 12 abr. 2026.

JUNQUEIRA, Antonio Hélio; GÜNTHER, Wanda; BRINGHENTI, Jacqueline. Narrativas jornalísticas sobre as enchentes de Porto Alegre (RS), em 2024: disputas discursivas em torno do desastre e seus resíduos. **Interfaces da Comunicação**, *[S. l.]*, v. 1, n. 6, p. 1–18, 2025. DOI: 10.11606/issn.2965-7474.v1i6p1-18. Disponível em: https://revistas.usp.br/interfaces/article/view/239428. Acesso em: 12 abr. 2026.

OLIVEIRA, F. M. *et al.* Chuvas, Tragédias e Cobertura Midiática: Análise sobre as Inundações no Rio Grande do Sul. **Revista de Gestão Social e Ambiental (RGSA)**, v. 18, n. 4, 2024.

PÚBLICO. Cientistas apontam em Portugal falhas estruturais que agravam efeitos das tempestades. 26 fev. 2026. Disponível em: https://www.publico.pt/2026/02/26/azul/noticia/cientistas-apontam-portugal-falhas-estruturais-agravam-efeitos-tempestades-2166017. Acesso em: 6 abr. 2026.

QIN, X. L. et al. Flood cascading on critical infrastructure with climate change: A spatial analysis of the extreme weather event in Xinxiang, China. *Advances in Climate Change Research*, v. 14, n. 3, 2023.

DA FRAGMENTAÇÃO À INTEGRAÇÃO: GESTÃO DE RISCOS GEOTÉCNICOS E PLANEJAMENTO URBANO EM MEDELLÍN E ITABIRITO (MG)

1 Cézar Augusto Silvino Figueredo, 2 João Alexandre Paschoalin Filho
1 Universidade Nove de Julho, e-mail: cezar.f@uni9.edu.br; 2 Universidade Nove de Julho, e-mail: paschoalinfilho@yahoo.com

Palavras-chave: Riscos geotécnicos; Planejamento urbano; Governança climática.

Resumo

As mudanças climáticas têm intensificado eventos de precipitação extrema, elevando a recorrência de condições críticas de saturação em maciços terrosos e ampliando a suscetibilidade a movimentos de massa em áreas urbanizadas de relevo acidentado. Em contextos como o de Itabirito (MG), inserido no Quadrilátero Ferrífero, tais processos estão associados ao aumento de poropressões, redução da resistência ao cisalhamento e ativação de superfícies potenciais de ruptura. Apesar da existência de marcos normativos no Brasil, observa-se uma persistente desarticulação entre conhecimento geotécnico, planejamento urbano e governança climática, resultando em intervenções reativas e ocupação de áreas de risco. Dentro deste cenário, este trabalho realiza análise comparativa entre Itabirito e Medellín (Colômbia), referência na integração entre gestão de riscos e ordenamento territorial no Sul Global. Para tal, foi utilizada abordagem qualitativa com revisão integrativa, análise documental e estudo comparativo estruturado a partir de critérios como incorporação de parâmetros geotécnicos, força normativa e coordenação institucional. Os resultados indicam que, em Itabirito, as diretrizes são genéricas e não vinculantes, enquanto Medellín integra cartas de suscetibilidade ao planejamento, associando-as a intervenções técnicas e governança intersetorial. Conclui-se que a redução de riscos exige instrumentos normativos tecnicamente fundamentados e integração efetiva entre geotecnia e planejamento urbano.

Introdução

As mudanças climáticas constituem uma realidade concreta e progressiva, impactando diretamente o território brasileiro e a dinâmica dos processos geológicos superficiais. O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC (2022) confirma a influência antrópica no aquecimento global, apontando a intensificação da frequência e magnitude de eventos de precipitação extrema em diversas regiões do planeta desde meados do século XX. No contexto sul-americano, e particularmente no Brasil, tais tendências apresentam forte consistência empírica.

O aumento da temperatura média global altera a dinâmica atmosférica, favorecendo a formação de sistemas convectivos mais intensos e concentrados no tempo, resultando em eventos pluviométricos de elevada intensidade e curta duração (Trenberth, 2011). Estudos conduzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicam tendências de incremento de extremos de precipitação no Brasil, com maior incidência nas regiões Sul e Sudeste (Marengo et al., 2021; Oliveira; Ferreira, 2025).

Entre os anos de 2020 e 2023, foram registrados 7.539 desastres climáticos no Brasil associados a chuvas intensas, representando um aumento de 222,8% em relação à década de 1990 (Christofoletti at al., 2025). Projeções baseadas em modelos climáticos de alta resolução sugerem que os eventos mais intensos poderão triplicar em frequência até o final do século XXI, sob cenários de elevadas emissões de gases de efeito estufa (Zilli et al., 2025).

Sob a perspectiva geotécnica, a intensificação dos eventos pluviométricos exerce papel determinante na evolução dos mecanismos de instabilidade de encostas. A infiltração de água no maciço terroso promove o aumento das pressões neutras (poropressões), reduzindo a tensão efetiva e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento dos materiais, favorecendo a mobilização de superfícies potenciais de ruptura e a deflagração de movimentos gravitacionais de massa.

Esse processo é amplificado em ambientes urbanizados, onde a supressão da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo alteram significativamente o regime hidrológico, aumentando o escoamento superficial e a recarga irregular dos aquíferos rasos (Cooke; Doornkamp, 1974; Hudson; Goudie; Asrat et al., 2015). Como resultado, observa-se o aumento da frequência de deslizamentos mesmo em áreas anteriormente consideradas estáveis do ponto de vista geológico (Gabet, 2007; Glade; Crozier, 2010).A infiltração da água pluvial constitui, portanto, um dos principais fatores desencadeadores de instabilidades em encostas naturais e taludes antrópicos, tanto em contextos urbanos quanto rurais (Lins et al., 2013; Vedovello; Macedo, 2007; Bortolozo et al., 2019; Parizzi et al., 2011; Fiori, 2015).

Simulações hidrológicas indicam que eventos extremos poderão se tornar até cinco vezes mais frequentes no Brasil (Petry et al., 2025). Evidências recentes apontam que eventos pluviométricos extremos responsáveis por deslizamentos letais em Minas Gerais, em fevereiro de 2026, foram intensificados por mudanças climáticas de origem antrópica (Clarke et al., 2026).

Esse cenário evidencia uma reconfiguração dos padrões pluviométricos historicamente observados, transformando eventos anteriormente considerados excepcionais em ocorrências cada vez mais recorrentes. Tal mudança impõe a necessidade de revisão dos parâmetros tradicionalmente adotados na engenharia geotécnica e no planejamento urbano, especialmente em áreas caracterizadas por relevo acidentado e ocupação desordenada.

A desarticulação entre o conhecimento técnico sobre estabilidade de encostas e os instrumentos de uso e ocupação do

solo resulta na permanência de populações em áreas suscetíveis a movimentos de massa, contribuindo para a recorrência de desastres com significativas perdas humanas e materiais (Nunes et al., 2024). Nesse contexto, a incorporação de instrumentos como cartas geotécnicas de aptidão à urbanização e diretrizes técnicas de mitigação de risco torna-se fundamental para orientar o ordenamento territorial (Canil; Nogueira, 2017).

Apesar do agravamento do risco geotécnico em áreas urbanas, o Brasil dispõe, há mais de duas décadas, de marcos legais que, em tese, possibilitam enfrentar essa problemática. O Estatuto da Cidade (Lei Federal nº 10.257/2001) estabelece o plano diretor como instrumento central da política urbana, vinculando o direito de propriedade ao cumprimento de sua função social (Brasil, 2001). Posteriormente, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei Federal nº 12.608/2012) incorporou a gestão de riscos ao planejamento urbano, tornando obrigatória a elaboração de cartas geotécnicas e planos de contingência em municípios suscetíveis a desastres (Brasil, 2012). Apesar da normatização, desastres naturais, sobretudo deslizamentos de terra, seguem acontecendo de maneira recorrente e ocupando cada vez mais espaço no noticiário brasileiro.

Observa-se portanto uma significativa lacuna entre o arcabouço normativo e sua efetiva implementação. Essa limitação decorre de fatores estruturais, como a fragilidade institucional dos municípios, a descontinuidade administrativa e a insuficiência de recursos técnicos e financeiros, além da persistente dissociação entre políticas urbanas e gestão de riscos (Carvalho; Galvão, 2006; Sulaiman; Alheiros, 2015).

Nakano e Maru (2024), ao analisarem 1.133 municípios monitorados pelo CEMADEN, verificaram que apenas 25,2% possuíam políticas para a prevenção de deslizamentos, enquanto somente 15,5% dispunham de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização. Além disso, o zoneamento urbano frequentemente se apresenta de forma genérica, com categorias insuficientes para orientar intervenções geotécnicas específicas ou definir parâmetros diferenciados de ocupação.

No cenário do Sul Global, a urbanização acelerada intensifica desigualdades socioespaciais e vulnerabilidades ambientais, sobretudo em assentamentos informais situados em áreas de risco (Jatobá, 2011; Pereira; Nunes Da Silva, 2011; Rodrigues et al., 2016; Cidade, 2013). Historicamente, a variável ambiental foi tratada de forma secundária no planejamento urbano brasileiro, com decisões orientadas predominantemente por interesses econômicos (Santos; Silveira, 2001). Apenas a partir da década de 1990 essa temática passou a ser incorporada de forma mais consistente (Silva; Travassos, 2008).

A integração do conhecimento geotécnico ao planejamento urbano constitui elemento fundamental para a identificação de áreas suscetíveis a processos como deslizamentos, erosão e corridas de detritos, bem como para a definição de diretrizes de ocupação territorial mais seguras. Estes estudos devem considerar não apenas os aspectos físicos, mas também as dimensões socioeconômicas associadas à ocupação do solo (Christofoletti, 1999; Saadi, 1997).

Iwama et al. (2016) destacam que a efetividade das estratégias de adaptação climática depende da articulação entre geotecnia e planejamento urbano. No entanto, essa integração é limitada por três fatores principais: (i) a desconexão entre diagnósticos geotécnicos e instrumentos de zoneamento; (ii) a fragilidade institucional para fiscalização e monitoramento; e (iii) a priorização de soluções emergenciais em detrimento de políticas preventivas estruturais.

Dessa forma, a fragmentação entre engenharia geotécnica e planejamento urbano configura-se como um problema estrutural de governança territorial, contribuindo para a amplificação dos riscos. Mesmo diante da existência de instrumentos técnicos e legais, observa-se a prevalência de intervenções pontuais, reativas e pouco eficazes.

O município de Itabirito (MG), apresenta condições favoráveis à ocorrência de movimentos de massa, devido à combinação entre relevo acidentado, litologia suscetível (itabiritos, gnaisses e filitos alterados) e ocupação urbana irregular (Oliveira, 2013; Garcia et al., 2020). Eventos extremos recentes têm evidenciado a vulnerabilidade local, com registros de deslizamentos e danos significativos à infraestrutura urbana (Kolanski et al., 2024).

Por outro lado, Medellín (Colômbia) constitui referência internacional na integração entre gestão de riscos e planejamento urbano, destacando-se pela incorporação de parâmetros geotécnicos ao ordenamento territorial, pelo uso de sistemas de monitoramento e alerta e pela articulação entre políticas públicas e participação comunitária (Smith et al., 2022; Nerc, 2017; Werthmann et al., 2024; Rivera Flórez; Rodríguez Gaviria, 2020).

O presente artigo realiza uma análise comparativa entre Itabirito e Medellín quanto à gestão de áreas de risco geotécnico frente às mudanças climáticas, identificando fragilidades institucionais, instrumentos de planejamento, estratégias de mitigação e lições para integrar engenharia geotécnica e planejamento urbano.

Metodologia

O estudo adota abordagem qualitativa, de natureza descritiva e exploratória, estruturada a partir de um estudo de caso comparativo entre Itabirito (MG) e Medellín (Colômbia), conforme os pressupostos de Creswell (2010) e Yin (2015), aplicáveis à análise de fenômenos complexos em contextos reais.

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas. A primeira consistiu na revisão integrativa da literatura (Botelho; Cunha; Macedo, 2011), com foco em estabilidade de encostas, movimentos de massa e integração entre geotecnia, planejamento urbano e mudanças climáticas. A segunda etapa compreendeu a análise documental de instrumentos normativos e de planejamento, incluindo, para Itabirito, o Plano Diretor, Plano de Ação Climática, Plano Municipal de Contingência (PLAMCON) e cartas de suscetibilidade, e, para Medellín, o Plano de Ordenamento Territorial (POT) e documentos de resiliência urbana.

A terceira etapa envolveu análise comparativa estruturada com base em critérios técnico-institucionais: incorporação de parâmetros geotécnicos ao ordenamento territorial, caráter vinculante das diretrizes, coordenação interinstitucional, adoção de medidas de mitigação (estabilização de taludes, drenagem e monitoramento) e participação social.

A triangulação metodológica (Denzin; Lincoln, 2006) foi empregada para assegurar consistência analítica. A

interpretação geotécnica fundamenta-se nos mecanismos de instabilidade associados à infiltração, elevação de poropressões e redução da resistência ao cisalhamento dos solos.

Resultados obtidos

A seguir são apresentados os estudos de caso realizados e a comparação entre estes:

O caso de Itabirito (MG): integração entre planejamento urbano e gestão de riscos geotécnicos

O município de Itabirito localiza-se a aproximadamente 55 km de Belo Horizonte, integrando o colar metropolitano da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Possui área territorial de 541,93 km² e população estimada em 53.365 habitantes (IBGE, 2021). Inserido no contexto geológico e geomorfológico do Quadrilátero Ferrífero, Itabirito apresenta características típicas de relevo acidentado e elevada complexidade litológica, o que condiciona sua dinâmica de ocupação urbana (Conti; Martínez, 2017). Mapeamentos recentes indicam que 18,83% do território municipal apresenta alta suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa, enquanto 50,21% apresenta suscetibilidade média (Cabral; Silva, 2023), evidenciando um cenário significativo de vulnerabilidade geotécnica.

Sob a perspectiva da geologia urbana, observa-se um desequilíbrio entre a infraestrutura natural e a superestrutura urbana, decorrente da ocupação desordenada do território (Carvalho, 1999; Conti; Silva, 2017). A impermeabilização do solo, a ocupação de áreas de preservação permanente (APPs) e o lançamento de efluentes domésticos sem tratamento comprometem o funcionamento hidrológico das bacias urbanas, intensificando processos erosivos, inundações e instabilidade de encostas (Conti; Silva, 2017).

A expansão urbana do município ocorre por vetores de crescimento, com destaque para o vetor leste, que concentra a maior parte dos novos empreendimentos e avança em direção ao distrito de Acuruí e à divisa com Ouro Preto, ao longo da BR-356 (Conti; Meirelles, 2016). Esse processo, associado à ausência de diretrizes técnicas suficientemente detalhadas, contribui para o aumento da exposição a riscos geotécnicos.

No âmbito do planejamento territorial, o município instituiu seu Plano Diretor em 2005 (Lei nº 2.466/2005), posteriormente revisado em 2008 (Lei nº 2.667/2008) e substituído pela Lei nº 3.323/2019, que estabeleceu as diretrizes vigentes de uso e ocupação do solo. Em consonância com o Estatuto da Cidade (Lei Federal nº 10.257/2001), o plano busca orientar o desenvolvimento urbano e garantir a função social da propriedade.

Adicionalmente, foram elaborados instrumentos complementares de gestão de riscos e governança climática, incluindo o Plano Municipal de Contingência (PLAMCON), a Carta de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundação (CPRM/SGB, 2023) e a Análise de Risco e Vulnerabilidade Climática (ICLEI, 2023), que subsidiou o Plano de Ação Climática de Itabirito (PLAC, 2024). Este último estabelece diretrizes voltadas à resiliência urbana, incluindo como meta a revisão de indicadores e mapeamentos de risco até 2028 (ICLEI, 2024).

Apesar da existência de instrumentos normativos e técnicos, observa-se significativa fragmentação entre eles. As diretrizes sobre risco geotécnico permanecem genéricas, não vinculantes e insuficientes para orientar intervenções específicas, utilizando termos como “risco geológico” e "áreas de risco" sem associá-los a parâmetros objetivos de estabilidade de taludes, condições de drenagem ou limites de ocupação. Além disso, falta um instrumento integrador que consolide os diferentes mapeamentos existentes e viabilize uma leitura sistêmica do território e decisões baseadas em evidências, lacuna que o Plano de Ação Climática, embora seja um avanço institucional, não supre por apresentar diretrizes ainda genéricas e sem o detalhamento técnico necessário para atingir as metas que propõe. Essa desconexão estrutural entre geotecnia e planejamento urbano compromete a efetividade das políticas de redução de riscos e perpetua a ocupação de encostas sem medidas preventivas de estabilização, drenagem ou monitoramento, mantendo populações em condições de vulnerabilidade.

O caso de Medellín (Colômbia): integração entre planejamento urbano e gestão de riscos geotécnicos

Medellín (Colômbia), situada no Vale de Aburrá e circundada pela Cordilheira dos Andes, consolidou-se como um importante polo industrial e comercial ao longo do século XXI, após um período de instabilidade sociopolítica marcado por conflitos entre o Estado, grupos armados e o narcotráfico durante o século XX. A configuração geomorfológica do relevo, caracterizada por encostas íngremes e forte compartimentação topográfica, condicionou a expansão urbana informal, especialmente nas áreas de encosta, intensificada entre as décadas de 1960 e 1980 com a migração de populações deslocadas pela violência rural (Junyent, 2019).

Os assentamentos informais em Medellín apresentam dinâmica incremental de ocupação, marcada por processos de densificação progressiva, autoconstrução e fragmentação socioespacial, resultando em déficits de infraestrutura urbana, elevada vulnerabilidade social e significativa exposição a riscos ambientais, particularmente movimentos gravitacionais de massa (Arteaga, 2021). A partir dos anos 2000, o poder público passou a implementar políticas estruturadas voltadas à mitigação desses riscos, articulando intervenções em infraestrutura urbana, serviços públicos e governança territorial.

Sob este prisma, o conceito de “urbanismo social” (Coupé, 2015; Echeverri; Orsini, 2012) emerge como eixo estruturante das políticas urbanas, configurando-se como uma abordagem integrada que articula investimentos em infraestrutura, qualificação de espaços públicos e inclusão socioespacial em territórios historicamente marginalizados. Trata-se de uma estratégia de caráter transversal, que orienta a priorização territorial e a alocação de recursos públicos com base em critérios de vulnerabilidade e risco.

Espinal (2019) demonstra que a experiência de Medellín estruturou uma governança territorial baseada na construção participativa do direito à cidade, com forte ênfase na gestão de riscos em áreas de encosta. Segundo o autor, essa governança

apoia-se em cinco pilares: (i) continuidade político-institucional, garantindo a consolidação de políticas de longo prazo; (ii) integração intersetorial entre planejamento urbano, meio ambiente, mobilidade e gestão de riscos; (iii) participação comunitária institucionalizada, com envolvimento ativo das comunidades na definição e implementação das intervenções; (iv) inovação em mecanismos de financiamento, por meio de arranjos institucionais e parcerias público-comunitárias; e (v) monitoramento contínuo, baseado em indicadores de desempenho que permitem ajustes adaptativos nas políticas públicas.

A partir de 2016, Medellín consolidou sua Estratégia de Resiliência Urbana como diretriz transversal do planejamento, integrando redução de riscos geológicos, adaptação climática e coesão social. No plano institucional, a criação do *Chief Resilience Officer*, vinculado ao gabinete do prefeito e responsável pela coordenação das ações de resiliência entre os diversos órgãos municipais, permitiu articulação intersetorial e superação da fragmentação típica latino-americana (Rivera Flórez; Rodríguez Gaviria, 2020). O município também implementou programas de mitigação de riscos em encostas. As intervenções combinam obras de estabilização, drenagem, revegetação, monitoramento e alerta precoce, complementadas por reassentamentos em áreas de alto risco e urbanização de assentamentos precários, priorizando a permanência quando tecnicamente viável (Rivera Flórez; Rodríguez Gaviria, 2020). A integração geotecnia-planejamento urbano apoia-se em dois mecanismos: incorporação de cartas de suscetibilidade ao Plano de Ordenamento Territorial (POT) com parâmetros vinculantes de uso do solo e sistemas de informação geográfica compartilhados entre secretarias, viabilizando decisões baseadas em evidências (Smith et al., 2022). O reordenamento participativo e medidas técnicas mitigadoras são prioritários, sendo a remoção de populações o último recurso, modelo que, articulando instrumentos legais, engenharia e participação social, amplia a efetividade na redução de riscos (Ferrari et al., 2018). Iniciativas de soluções baseadas na natureza (SBN), como manejo integrado solo-água e revegetação, complementam a engenharia tradicional, reforçando resiliência com benefícios ambientais e sociais (Santamaría, 2014; Coupé, 2011).

De modo geral, o modelo adotado por Medellín caracteriza-se pela integração entre planejamento urbano, gestão de riscos geotécnicos e governança climática, com forte base em instrumentos técnicos, participação social e coordenação institucional, orientando o ordenamento territorial a partir de critérios de suscetibilidade e risco.

Integração entre geotecnia e planejamento urbano: análise comparativa entre Medellín (Colômbia) e Itabirito (MG)

O caso de Medellín demonstra, de forma empírica, que a integração entre engenharia geotécnica e planejamento urbano pode ser operacionalizada como componente estruturante do ordenamento territorial, sobretudo em contextos de elevada suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa.

Diferentemente de Itabirito, onde a variável geotécnica é tratada de forma predominantemente descritiva e não vinculante, Medellín incorpora parâmetros de suscetibilidade, condicionantes geomorfológicas e critérios técnicos de ocupação diretamente ao Plano de Ordenamento Territorial (POT), conferindo caráter normativo às restrições e diretrizes de uso do solo.

Essa distinção revela uma diferença relevante de abordagem: enquanto em Itabirito os instrumentos de planejamento apresentam baixa capacidade operativa e limitada articulação entre diagnósticos e regulação territorial, em Medellín observa-se a integração entre base técnica e tomada de decisão, permitindo que informações geotécnicas, como suscetibilidade a escorregamentos, condições de drenagem e estabilidade de encostas, orientem efetivamente o zoneamento urbano e as estratégias de intervenção.

Do ponto de vista geotécnico, Medellín incorpora em suas políticas urbanas os mecanismos de instabilidade de encostas para definir áreas de restrição e intervenção. Itabirito, embora disponha de mapeamentos de suscetibilidade, não os internaliza nas normas, permitindo ocupações que ignoram a capacidade de suporte do meio físico e ampliam a exposição ao risco.

Institucionalmente, Medellín opera com coordenação intersetorial, continuidade administrativa e sistemas integrados de informação territorial que articulam planejamento urbano, gestão ambiental e engenharia geotécnica. Itabirito, ao contrário, mostra-se fragmentado, com instrumentos desconexos entre órgãos que minam a eficácia da mitigação.

Nas intervenções, Medellín combina medidas estruturais com monitoramento, alerta precoce e reordenamento participativo, reduzindo tanto a probabilidade quanto os impactos dos eventos. Itabirito adota postura reativa, com ações pontuais e dissociadas das políticas de uso do solo. Por fim, a participação social é estruturante e legitimadora em Medellín, mas meramente consultiva e pouco influente nas estratégias de gestão de risco em Itabirito.

Embora a experiência de Medellín não seja diretamente replicável, em função de diferenças de escala, capacidade fiscal e trajetória institucional, ela oferece diretrizes relevantes para municípios de médio porte, dentre estas destacam-se: (i) a necessidade de incorporação vinculante de parâmetros geotécnicos aos instrumentos de planejamento territorial; (ii) a criação de instâncias formais de coordenação interinstitucional capazes de integrar planejamento urbano, meio ambiente e defesa civil; (iii) a adoção de estratégias combinadas de mitigação, articulando soluções de engenharia e instrumentos urbanísticos; e (iv) a implementação de sistemas contínuos de monitoramento e revisão, baseados em dados geotécnicos e climáticos atualizados.

É possível concluir que a principal distinção entre os dois casos reside menos na disponibilidade de conhecimento técnico e mais na capacidade institucional de internalizá-lo no processo decisório. Enquanto Medellín traduz a informação geotécnica em diretrizes normativas e operacionais, Itabirito ainda apresenta dificuldades em converter diagnósticos técnicos em instrumentos efetivos de regulação territorial, evidenciando uma lacuna relevante na integração entre geotecnia e planejamento urbano. O Quadro 01 apresenta um resumo uma síntese comparativa dos instrumentos geotécnicos e de planejamento urbano em Itabirito e Medellín:

Critério	Itabirito	Medellín
Integração geotecnia-planejamento	Baixa	Alta
Incorporação de parâmetros geotécnicos	Não vinculante	Vinculante

Uso de cartas de suscetibilidade	Existente, não integrada	Integrada ao POT
Governança institucional	Fragmentada	Intersetorial
Estratégia de intervenção	Reativa	Preventiva e integrada
Monitoramento	Limitado	Contínuo e sistemático
Participação social	Consultiva	Ativa e estruturante
Governança institucional	Fragmentada	Intersetorial

Quadro 01. Comparação dos modelos de gestão de riscos em encostas: Itabirito vs. Medellín
Fonte: Elaboração própria (2026)

O quadro revela um contraste sistêmico: as diferenças não são apenas pontuais, mas refletem níveis distintos de integração entre base técnica, normativa e governança. Medellín articula parâmetros geotécnicos, planejamento urbano e mecanismos institucionais num modelo preventivo e baseado em evidências, enquanto Itabirito mantém a gestão de riscos em patamar reativo pela dissociação entre esses elementos, apesar da existência do arcabouço técnico e normativo.

Considerações Finais

Superar a fragmentação entre geotecnia e planejamento urbano exige base epistemológica integrada e instrumentos que convertam conhecimento técnico em diretrizes de ordenamento territorial. Isso requer traduzir parâmetros como suscetibilidade a movimentos de massa, drenagem, estabilidade de taludes e comportamento hidromecânico em critérios normativos de uso do solo, incorporando também cenários climáticos futuros e dinâmicas socioespaciais. A comparação Medellín–Itabirito evidencia que a efetividade na redução de riscos depende menos da disponibilidade de conhecimento técnico que da capacidade institucional de internalizá-lo no planejamento e na governança. A integração metodológica e institucional entre geotecnia, planejamento urbano e adaptação climática é, portanto, condição para migrar de modelos reativos a abordagens preventivas e adaptativas.

Do ponto de vista das políticas públicas, os resultados deste estudo indicam diretrizes concretas para o aprimoramento do planejamento urbano em municípios sujeitos a deslizamentos, tais como: (i) incorporação obrigatória e vinculante de cartas geotécnicas de suscetibilidade e aptidão à urbanização aos planos diretores e legislações de uso do solo; (ii) criação de instâncias formais de coordenação intersetorial, integrando planejamento urbano, meio ambiente, defesa civil e infraestrutura; (iii) adoção de estratégias combinadas de mitigação, articulando intervenções estruturais, como estabilização de taludes e sistemas de drenagem com instrumentos urbanísticos e ações de reordenamento territorial; (iv) implementação de sistemas contínuos de monitoramento geotécnico e alerta precoce, integrados a plataformas de informação territorial; e (v) fortalecimento da participação social qualificada, como mecanismo de legitimação e sustentabilidade das intervenções.

No campo científico, este estudo aponta para a necessidade de aprofundamento de pesquisas que integrem modelagem geotécnica, simulações hidrológicas e análise espacial aplicada ao planejamento urbano, permitindo maior precisão na delimitação de áreas de risco e no suporte à tomada de decisão.

Por fim, a convergência entre gestão de riscos geotécnicos, planejamento urbano e adaptação às mudanças climáticas alinha-se diretamente à Agenda 2030 das Nações Unidas, especialmente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao mesmo tempo em que contribui para a construção de cidades mais resilientes, seguras e socialmente inclusivas.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Programa de Mestrado e Doutorado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho/SP, à Universidade de Medellín, à Prefeitura Municipal de Itabirito, à Prefeitura Municipal de Medellín e ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo.

Referências Bibliográficas

ARTEAGA, A. **Medellín, urban renewal of informal settlements through public space: the case of the North-Eastern Integral Urban Project (PUI)**. In: Resilient Urban Regeneration In Informal Settlements In The Tropics. Singapore: Springer, 2021. p. 83-99. DOI: 10.1007/978-981-13-7307-7_5.

BORTOLOZO, Cassiano Antonio; MOTTA, Mariana Ferreira Benessiuti; ANDRADE, Marcio Roberto Magalhães de; LAVALLE, Laura Vanessa Araque; MENDES, Rodolfo Moreda; SIMÕES, Silvio Jorge Coelho; MENDES, Tatiana Sussel Gonçalves; PAMPUCH, Luana Albertani. **Combined analysis of electrical and electromagnetic methods with geotechnical soundings and soil characterization as applied to a landslide study in Campos do Jordão City, Brazil**. Journal of Applied Geophysics, v. 161, p. 1-14, 2019.

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. de A.; MACEDO, M. **O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais**. Gestão e Sociedade, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011. DOI: 10.21171/ges.v5i11.1220.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências (Estatuto da Cidade). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 11 jul. 2001.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil – SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 11 abr. 2012.

CABRAL, L. A.; SILVA, R. F. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Itabirito**. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2023.

CANIL, K.; NOGUEIRA, F. R. **Cartas geotécnicas de aptidão à urbanização: instrumento de planejamento para prevenção de desastres e para a gestão do uso do solo**. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPUR, 17., 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ANPUR, 2017.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. (org.). **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais**. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006.

CARVALHO, E. T. **Geologia Urbana para todos: Uma visão de Belo Horizonte**. Belo Horizonte: Geolurb, 1999.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CHRISTOFOLETTI, R. et al. **Temporadas das Águas: O Desafio Crescente das Chuvas Extremas**. Série Brasil em Transformação, Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica; Universidade Federal de São Paulo, 2025.

CIDADE, L. C. F. **A questão ambiental urbana: perspectivas de análise**. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPUR, 15., 2013, Recife. Anais [...]. Recife: ANPUR, 2013. p. 1-15.

CLARKE, B. et al. **Unplanned urbanisation fuels landslide disasters amid emerging rainfall trends.** WWA scientific report, n. 84, 2026. DOI: 10.25560/128502.

CONTI, A.; MARTÍNEZ, G. A. T. **Cartographic visualization of morphological and hierarchical relations in city networks: a basis for understanding the urban systems of the Quadrilátero Ferrífero**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 69, n. 8, p. 1503-1520, 2017.

CONTI, A.; MEIRELLES, D. **Crescimento periférico e periurbano em Itabirito-MG, estudo de caso do vetor leste**. In: Anais do PNUM 2016. 2016.

CONTI, A.; SILVA, P. H. P. **As múltiplas escalas da reconciliação "Rio-Cidade": Ideias e Soluções replicáveis para a microbacia São José-Itabirito, MG.** In: Anais do ST 4.8-02. 2017.

COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C. **Geomorphology in Environmental Management**. Oxford: Clarendon Press, 1974.

COUPÉ, F. **La gestión del riesgo en el Valle de Aburrá. Una larga historia**. Gestión y Ambiente, v. 14, n. 2, p. 17-44, maio 2011.

COUPE, F. **Urbanismo social y transformación de la ciudad.** Medellín: Alcaldía de Medellín, 2015.

DENZIN, N. K.; LINCOLN, Y. S. **O planejamento da pesquisa qualitativa: teorias e abordagens.** 2. ed. Porto Alegre: Penso, 2006.

ECHEVERRI, A.; ORSINI, F. **Informalidad y urbanismo social en Medellín**. In: ECHEVERRI, A. et al. (org.). Medellín: medio ambiente, urbanismo y sociedad. Medellín: Universidad EAFIT, 2012.

ESPINAL, J. F. S. **A construção estratégica e participativa do direito à cidade: desenvolvimento urbano e gestão do risco em Medellín e o Vale de Aburrá**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Sociais Aplicadas) – UEPG, Ponta Grossa, 2019.

FERRARI, S. G.; SMITH, H.; CALDERON, E. C**ontemporary tendencies in Colombian urban planning: the case of the 'Planes Parciales' in Medellín**. International Planning Studies, v. 23, n. 4, p. 355-375, 2018. DOI: 10.1080/13563475.2018.1500276.

FIORI, A. P. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GABET, E. J. **A theoretical model coupling chemical weathering and physical erosion in landslide-dominated landscapes.** Earth and Planetary Science Letters, v. 264, p. 259-265, 2007. DOI: 10.1016/j.epsl.2007.09.028.

GARCIA, R. S.; MARTINS, C. P.; AMARAL, D. L. **Estudos geomorfológicos e ambientais aplicados ao planejamento urbano de cidades em áreas montanhosas.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 21, n. 3, p. 405-422, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i3.1564.

GLADE, T.; CROZIER, M. J. (ed.). **Landslide geomorphology in a changing environment**. Geomorphology, v. 120, n. 1-2, p. 1-90, 2010.

HUDSON, P.; GOUDIE, A.; ASRAT, A. **Human impacts on landscapes: sustainability and the role of geomorphology**. Zeitschrift für Geomorphologie, Stuttgart, v. 59, Suppl. 2, p. 1-5, June 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2021: estimativas populacionais dos municípios brasileiros**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/. Acesso em: 13 out. 2025.

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Plano de Ação Climática de Itabirito – MG**. São Paulo: ICLEI América do Sul, 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: **Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

IWAMA, A. Y. et al. **Risco, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas: uma abordagem interdisciplinar**. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 93-116, 2016.

JATOBÁ, S. U. S. **Urbanização, meio ambiente e vulnerabilidade social.** Boletim Regional, Urbano e Ambiental, Brasília, n. 5, p. 141-148, jun. 2011.

JUNYENT, I. A. L**a informalidad del límite urbano: Pinares de Oriente, procesos resilientes en Medellín**. In: ISUFh 2019: Ciudad compacta versus ciudad difusa, 3., 2019, Guadalajara. Proceedings [...]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2019. p. 1-10. DOI: 10.4995/ISUFh2019.2019.9711.

KOLANSKI, M. M. de P.; SANTOS, G. R. G.; NASCIMENTO, M. A. G. **A importância da modelagem hidrodinâmica na gestão de inundações e análise de danos - Um estudo de caso do município de Itabirito/MG**. 2024.

LINS, R. A. et al. **Avaliação dos fatores condicionantes dos movimentos de massa em áreas rurais e urbanas**. Revista Brasileira de Geociências, v. 43, n. 3, p. 345-360, 2013.

MARENGO, J. A. et al. **Extreme rainfall and hydro-geo-meteorological disaster risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C global warming scenarios: an analysis for Brazil**. Frontiers in Climate, v. 3, p. 610433, 2021.

NAKANO, A. K.; MARU, H. T. K. **O planejamento urbano e a gestão de riscos em municípios monitorados pelo CEMADEN**. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, Brasília, n. 33, p. 67-80, dez. 2024.

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL (NERC). **Resilience or resistance? Negotiated mitigation of landslide risks in informal settlements in Medellin**. Swindon: NERC, 2017.

NUNES, A. P. L. et al. **Planejamento urbano e áreas de risco: conceitos e abordagens legais em Minas Gerais.** Revista da Faculdade de Direito do Sul de Minas, Pouso Alegre, v. 40, n. 1, p. 268-284, jan./jun. 2024.

OLIVEIRA, D. R. **Aspectos litológicos e geomorfológicos do Quadrilátero Ferrífero e suas implicações na ocupação urbana**. Revista Brasileira de Geociências, v. 43, n. 2, p. 254-266, 2013.

OLIVEIRA, T. A.; FERREIRA, C. C. M. **Mudanças climáticas e chuvas no sudeste do Brasil: tendências e eventos extremos.** Revista de Geografia, v. 42, n. 1, p. 1-20, 2025.

PARIZZI, Maria Giovana; SOBREIRA, Frederico Garcia; GALVÃO, Terezinha Cássia de Brito; ARANHA, Paulo Roberto Antunes; ELMIRO, Marcos Antônio Timbó; BEIRIGO, Elder Antônio. **Processos de movimentos de massa em Belo Horizonte,** MG. Revista Geografias, Belo Horizonte, v. 7, n. 1, p. 58-87, jan./jun. 2011. DOI: 10.35699/2237-549X.13309. Disponível em: https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13309. Acesso em: 20 abr. 2026.

PEREIRA, D. de F.; NUNES DA SILVA, J. M. **Urbanismo de risco: a produção do espaço nas cidades brasileiras**. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 13, n. 1, p. 115-129, maio 2011.

PETRY, I.; MIRANDA, P. T.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; FAGUNDES, H. O. et al. **Changes in flood magnitude and frequency projected for vulnerable regions and major wetlands of South America**. Geophysical Research Letters, v. 52, e2024GL112436, 2025. DOI: 10.1029/2024GL112436.

RIVERA FLOREZ, L. A.; RODRIGUEZ GAVIRIA, E. M. **La gestión comunitaria del riesgo.** Justicia espacial y ambiental. Bitácora Urbano Territorial, v. 30, n. 3, p. 205-218, 2020. DOI: 10.15446/bitacora.v30n3.87769.

RODRIGUES, W.; SANTANA, W. C.; RODRIGUES, L. **A. Determinantes da degradação ambiental na América Latina: evidências para o período 1990-2010**. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica, v. 25, p. 1-15, 2016.

SAADI, A. **A geomorfologia e o planejamento do uso do solo urbano**. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. p. 227-260.

SANTAMARÍA, J. E. V. **Transición del ordenamiento territorial y tratamiento del recurso hídrico: algunos determinantes desde el caso de Medellín**. Gestión y Ambiente, v. 5, n. 2, p. 165-180, nov. 2014.

SANTOS, M.; SILVEIRA, M. L. **O Brasil: território e sociedade no início do século XXI**. Rio de Janeiro: Record, 2001.

SILVA, J. M. S.; TRAVASSOS, L. E. P. **A questão ambiental urbana: trajetória e perspectivas.** Cadernos Metrópole, São Paulo, v. 10, n. 19, p. 127-147, 2008.

SILVA, P. F. **Diagnóstico ambiental e socioeconômico da bacia hidrográfica do rio Itabirito (MG).** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 25, n. 4, p. 567-578, 2020. DOI: 10.1590/S1413-415220202004.

SMITH, H. et al. **Exploring appropriate socio-technical arrangements for the co-production of landslide risk management strategies in informal neighbourhoods in Colombia and Brazil**. International Journal of Urban Sustainable Development, v. 14, n. 1, p. 242-263, 2022.

SULAIMAN, S. N.; ALHEIROS, M. M. D**esastres naturais e gestão de risco no Brasil: características e desafios.** In: LONDE, L. R. et al. (org.). Gestão de riscos e desastres socioambientais. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. p. 42-65.

TRENBERTH, K. E. **Changes in precipitation with climate change.** Climate Research, v. 47, n. 1-2, p. 123-138, 2011.

VEDOVELLO, R.; MACEDO, E. **Deslizamentos de encostas. In: SANTOS, R. F. (org.). Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: MMA, 2007. Disponível em: http://goo.gl/aEuO4U. Acesso em: 20 abr. 2026.

WERTHMANN, C. et al. **Insights into the development of a landslide early warning system prototype in an informal settlement: the case of Bello Oriente in Medellín, Colombia.** Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 24, p. 1843-1870, 2024. DOI: 10.5194/nhess-24-1843-2024.

ZILLI, M. et al. **Threefold increase in most intense South Atlantic convergence zone events by 2100 in convection-permitting simulation**. Environmental Research Letters, 2025.

AHP-TOPSIS NO MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE TRAVESSIA DE CURSOS D'ÁGUA DANIFICADAS EM NOVA PALMA (RS)

1 Ana Carolina dos Santos Reis, 2 Yamila Soledad Chicherit, 3 Gabriel Marques Nascimento, 4 Leonardo de Sousa Sampaio, 5 Alexandre Sokoloski de Azevedo Delduque de Macedo, 6 Rutineia Tassi, 7 Alejandro Ruiz-Padillo, 8 Daniel Gustavo Alasia Piccili

1Universidade Federal de Santa Maria, e-mail:reis.ana@acad.ufsm.br; 2Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: yamila.chicherit@acad.ufsm.br; 3Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: gabriel-nascimento.1@acad.ufsm.br; 4Universidade Federal do Ceará, e-mail: leonardo.ssampaio95@gmail.com; 5Universidade Federal do Paraná, e-mail: alexandresokoloski@ufpr.br; 6Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: ruti@ufsm.br; 7Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br; 8Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: dallasia@gmail.com

Palavras-chave: decisão multicritério; infraestrutura viária; extremos climáticos.

Resumo

O presente estudo teve como objetivo mapear a suscetibilidade a inundações no município de Nova Palma (RS) por meio da integração dos métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Para isso, foram considerados nove indicadores de natureza topográfica, hidrológica e ambiental: altimetria, declividade, distância aos cursos d'água, densidade de drenagem, índice topográfico de umidade, curvatura, uso e cobertura da terra, tipos de solo e geologia. Os pesos dos critérios foram definidos pelo método AHP, enquanto o TOPSIS foi aplicado para a agregação dos indicadores e geração do mapa de suscetibilidade a inundações. Os resultados indicaram predominância de áreas com suscetibilidade baixa a moderada, tanto na bacia de contribuição quanto no limite municipal, enquanto as classes de alta e muito alta suscetibilidade concentram-se principalmente em regiões próximas à rede de drenagem, caracterizadas por baixa declividade e maior acúmulo de escoamento superficial. A validação do modelo foi realizada por meio da sobreposição espacial com um inventário de 16 estruturas de travessia (10 pontes e 6 passagens molhadas) afetadas durante o evento hidrológico extremo de abril-maio de 2024. Observou-se que a maior parte dessas estruturas está localizada em áreas classificadas como de alta e muito alta suscetibilidade, evidenciando coerência entre o modelo e a ocorrência de danos reais. Os resultados demonstram o potencial da abordagem AHP-TOPSIS como ferramenta de apoio ao planejamento territorial e à gestão de riscos, contribuindo para a identificação de áreas prioritárias e para o aumento da resiliência da infraestrutura frente a eventos hidrológicos extremos.

Introdução

Em escala global, alterações no uso da terra e a intensificação do ciclo hidrológico, impulsionada pelas mudanças climáticas, têm contribuído para o aumento da frequência e da severidade de eventos hidrológicos extremos, como chuvas intensas e inundações (IPCC, 2023). Nesse contexto, torna-se cada vez mais relevante compreender os impactos desses eventos e propor estratégias de mitigação voltadas ao aumento da resiliência e adaptação das cidades e da infraestrutura hídrica. Dentre os componentes da infraestrutura de transporte mais vulneráveis, as pontes se destacam pela exposição às dinâmicas fluviais (Kobiyama *et al.*, 2025). Durante eventos extremos, essas estruturas são submetidas a elevadas solicitações hidrodinâmicas, resultantes do aumento da velocidade do escoamento e da altura da lâmina d'água, além de processos erosivos que comprometem a estabilidade das fundações (Loli *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

No contexto brasileiro, os desastres relacionados à água têm se intensificado nas últimas décadas, com destaque para as inundações, que concentram grande parte das perdas humanas e econômicas (Escobar-Silva *et al.*, 2026). Entre abril e maio de 2024, o estado do Rio Grande do Sul foi atingido por intensas enchentes que afetaram diretamente cerca de 2,4 milhões de pessoas, resultando em danos generalizados à agricultura, à infraestrutura e à dinâmica fluvial da região (Chicherit *et al.*, 2025). Durante esse evento, foram registrados acumulados de aproximadamente 450 mm de chuva em um período de quatro dias, associados a tempos de retorno superiores a 300 anos, o que evidencia o caráter extremo do fenômeno segundo curvas intensidade-duração-frequência (IDF) ajustadas para o estado (Tassi et al., no prelo). Nesse cenário, os impactos sobre a infraestrutura de transporte são particularmente relevantes, uma vez que a combinação simultânea de chuvas intensas, transbordamento de rios e movimentos de massa, ampliam as solicitações hidráulicas e os mecanismos de dano em estruturas de travessia de cursos d'água (Suarez; Bello; Campbell, 2024).

Inserido nesse cenário, o município de Nova Palma, localizado na região central do estado do Rio Grande do Sul e banhado pelos rios Soturno, Jacuí e seus afluentes, também foi fortemente atingido pelas enchentes, acumulando prejuízos e transtornos à população (SEMA, 2018; Manfio, 2025). Conforme nota divulgada pela Prefeitura Municipal de Nova Palma (2024), em 4 de maio de 2024, foi decretada Situação de Emergência em razão das chuvas intensas registradas nos dias anteriores. Dias depois, o município informou que 13 estruturas de travessia de cursos d'água, entre pontes e passagens molhadas, haviam sido severamente comprometidas, exigindo reconstrução integral (Prefeitura Municipal de Nova Palma, 2024b). Esse número foi posteriormente atualizado com a inclusão de mais três passagens molhadas, totalizando 16 estruturas de travessia de cursos d'água afetadas pelo evento. Entre elas, 10 pontes e 6 passagens molhadas.

Diante desse cenário, é fundamental avaliar a relação entre eventos hidrológicos extremos com a vulnerabilidade das estruturas distribuídas em diferentes regiões na bacia hidrográfica, para auxiliar o planejamento territorial e a gestão preventiva da infraestrutura para resistir a eventos futuros. A análise espacial, quando associada a dados de risco e suscetibilidade, pode oferecer subsídios importantes para a identificação de áreas críticas, a priorização de obras de reforço ou reconstrução e a formulação de estratégias mais eficientes de adaptação.

Devido às limitações associadas a modelos hidrodinâmicos, como aquisição de dados de qualidade e complexidade computacional, tem-se observado um crescimento no uso de métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM) integrados a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para análise de suscetibilidade a inundações (Bunmi Mudashiru *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2023). Dentre os métodos MCDM, a técnica *Analytic Hierarchy Process* (AHP) destaca-se pela possibilidade de atribuir pesos relativos a critérios de forma estruturada e consistente (Saaty, 1980). De forma complementar, o método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) permite a agregação dos indicadores em um índice ponderado e ranqueamento das alternativas (Hwang; Yoon, 1981). A integração desses métodos potencializa a geração de mapas de suscetibilidade e a identificação de áreas críticas (Ghaleno; Meshram; Alvandi, 2020; Mabrouk; Han, 2023).

Diante disso, o objetivo deste estudo foi mapear a suscetibilidade a inundações no município de Nova Palma (RS) por meio da integração dos métodos AHP e TOPSIS, bem como avaliar sua relação com o colapso de estruturas de travessia durante o evento de 2024, além de propor uma validação com dados reais. Entende-se que mais do que compreender os danos já ocorridos, esse tipo de investigação pode contribuir para melhores práticas de gestão e planejamento de obras de infraestrutura, permitindo ampliar a resiliência a novos eventos extremos.

Metodologia

Área de estudo

O município de Nova Palma localiza-se na região central do Rio Grande do Sul, e integra a Quarta Colônia de Imigração Italiana. Limita-se com municípios como Júlio de Castilhos, Pinhal Grande e Faxinal do Soturno, e pertence à microrregião de Restinga Seca e à mesorregião Centro Ocidental Rio-Grandense. O município possui cerca de 5.586 habitantes em uma área de aproximadamente 314,6 km² (IBGE, 2022). Do ponto de vista hidrográfico, insere-se na região da bacia do Guaíba, sendo drenado principalmente pelo rio Soturno que deságua no rio Jacuí (SEMA, 2018).

Em termos geomorfológicos, a área de estudo apresenta relevo variado, com altitudes que variam aproximadamente entre 30 e 600 metros. A declividade acompanha essa variação altimétrica, apresentando valores predominantemente baixos nas áreas de vale e nas proximidades da rede de drenagem, o que favorece o acúmulo de água e aumenta a suscetibilidade a inundações. A Figura 01 apresenta a bacia hidrográfica do rio Jacuí até a confluência com o rio Soturno, com destaque para a área de estudo e para as infraestruturas de travessias de curso d'água afetadas.

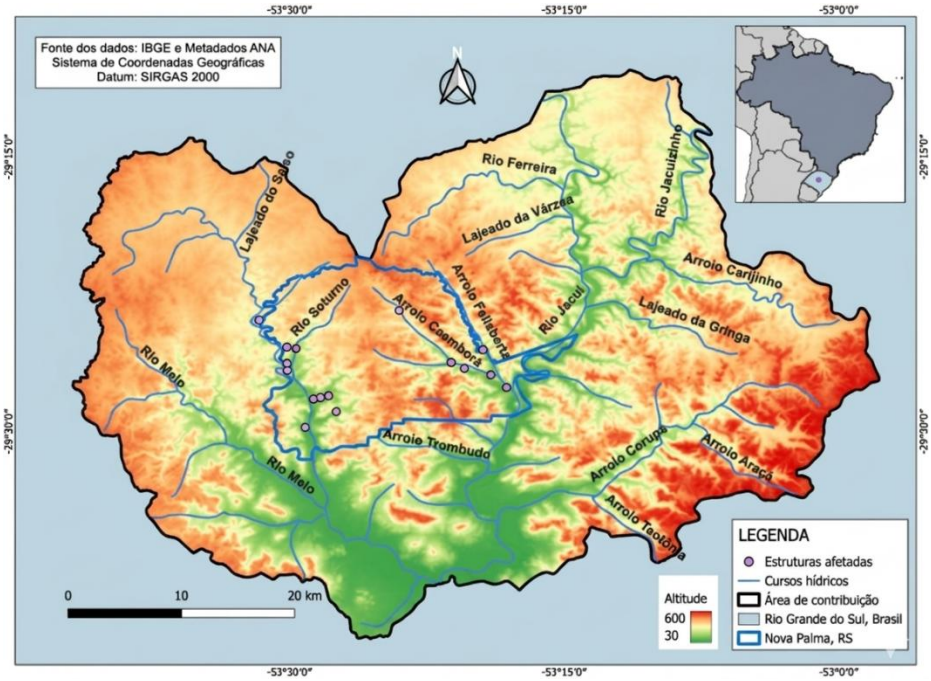


Figura 01: Localização da área de estudo, com indicação das estruturas de travessia de curso d'água afetadas. Fonte: IBGE; ANA, Prefeitura de Nova Palma. Elaborado pelos autores (2026).

Seleção dos indicadores

A suscetibilidade a inundações é condicionada por fatores topográficos, hidrológicos e ambientais (Kia *et al.*, 2012). Neste estudo, foram selecionados nove indicadores para a análise de suscetibilidade a inundações: altimetria (ALT), declividade

(DECL), distância ao rio (DRIO), densidade de drenagem (DDREN), índice topográfico de umidade (TWI), curvatura (CURV), uso e cobertura da terra (LULC), tipos de solo (SOLO) e geologia (GEO).

De forma geral, esses fatores influenciam diretamente a dinâmica do escoamento superficial, a infiltração e o acúmulo de água no terreno, controlando a distribuição espacial das áreas suscetíveis a inundações. Variáveis topográficas, como altimetria, declividade e curvatura, condicionam o comportamento do fluxo; fatores hidrológicos, como distância ao rio, densidade de drenagem e índice topográfico de umidade, estão associados à concentração e saturação hídrica; enquanto fatores ambientais, como uso e cobertura da terra, solos e geologia, influenciam a infiltração e a retenção de água no sistema (Saha; Agrawal, 2020; Das, 2020; Sarkar *et al.*, 2022; Mousavi; Ataie-Ashtiani; Hosseini, 2022; Shahiri Tabarestani; Afzalimehr, 2022; Pathan *et al.*, 2022; Negese *et al.*, 2022; Mabrouk; Han, 2023; Debnath *et al.*, 2024).

Base de dados e processamento geoespacial

Os dados geoespaciais utilizados neste estudo foram processados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), por meio do software QGIS. Inicialmente, todas as bases foram padronizadas para uma resolução espacial de 30 metros, garantindo a compatibilidade entre os diferentes dados de entrada e minimizando inconsistências decorrentes de variações de escala. Em seguida, os dados foram recortados para a área de estudo e submetidos a processos de reclassificação em uma escala de 1 a 5, conforme o grau de influência nos processos hidrológicos.

O mapa de cotas altimétricas foi derivado do Modelo Digital de Terreno ANADEM, com resolução espacial de 30 metros (Laipelt *et al.*, 2024, Figura 02a). Com base na rede gerada a partir do MDE, foi elaborado o mapa de densidade de drenagem (Figura 02b) a partir da ferramenta “Line Density”. Ainda a partir do MDE, foram gerados os mapas de declividade (Figura 03a) e curvatura (Figura 03b) por meio da ferramenta “Slope, Aspect, Curvature”.

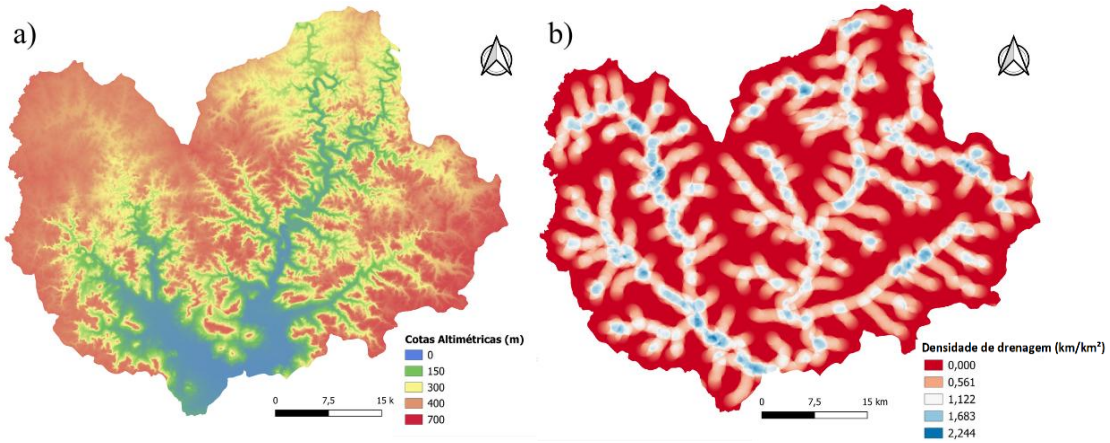


Figura 02: (a) Mapa de cotas altimétricas e (b) mapa de densidade de drenagem da área de estudo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

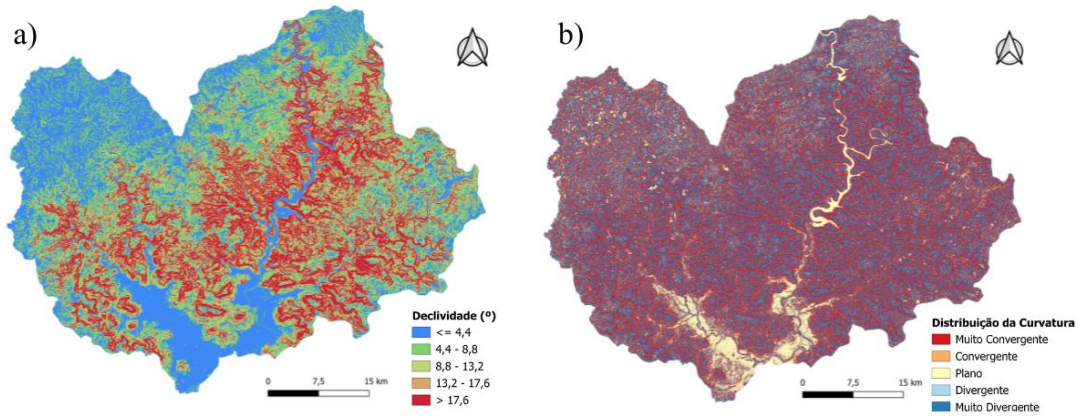


Figura 03: (a) Mapa de declividade e (b) mapa de curvatura do terreno na área de estudo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O mapa de distância ao rio foi gerado a partir da rede de cursos d’água, previamente obtida no Catálogo de Metadados da Agência Nacional de Águas - ANA (https://metadados.snirh.gov.br), e da ferramenta GRASS “r.grow.distance”. O resultado foi um raster contínuo que representa a distância de cada ponto da área de estudo ao curso d’água mais próximo (Figura 04a). Foi calculado o mapa do índice topográfico de umidade com o auxílio da ferramenta SAGA “topographic wetness index” (Figura 04b).

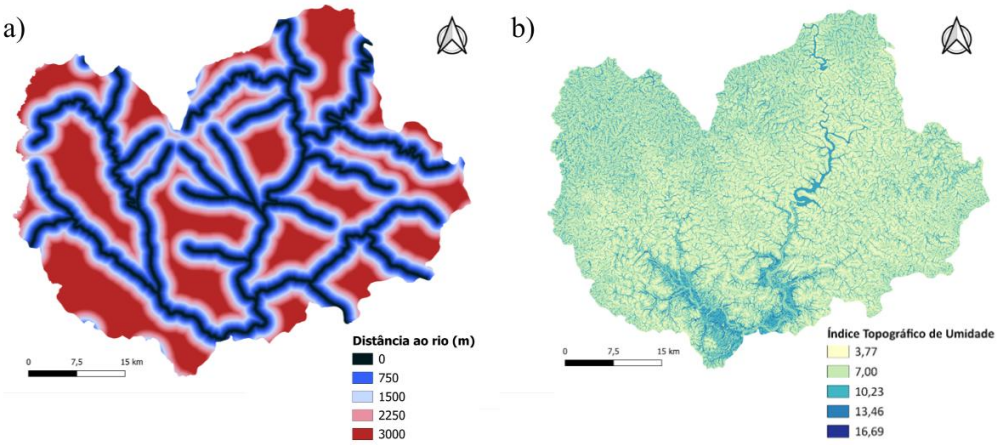


Figura 04: (a) Mapa de distância ao rio e (b) mapa do índice topográfico de umidade da área de estudo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os dados de uso e cobertura da terra, geologia e tipos de solo utilizados neste estudo foram obtidos a partir de diferentes bases de dados geoespaciais. O mapa de uso e cobertura da terra foi derivado da base Esri Sentinel-2 Land Cover Explorer, disponibilizada pelo Living Atlas (https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/), com resolução espacial de 10 metros (Figura 05a). Já o mapa de geologia (Figura 05b) e de tipos de solos (Figura 05c) foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (https://ibge.gov.br/).

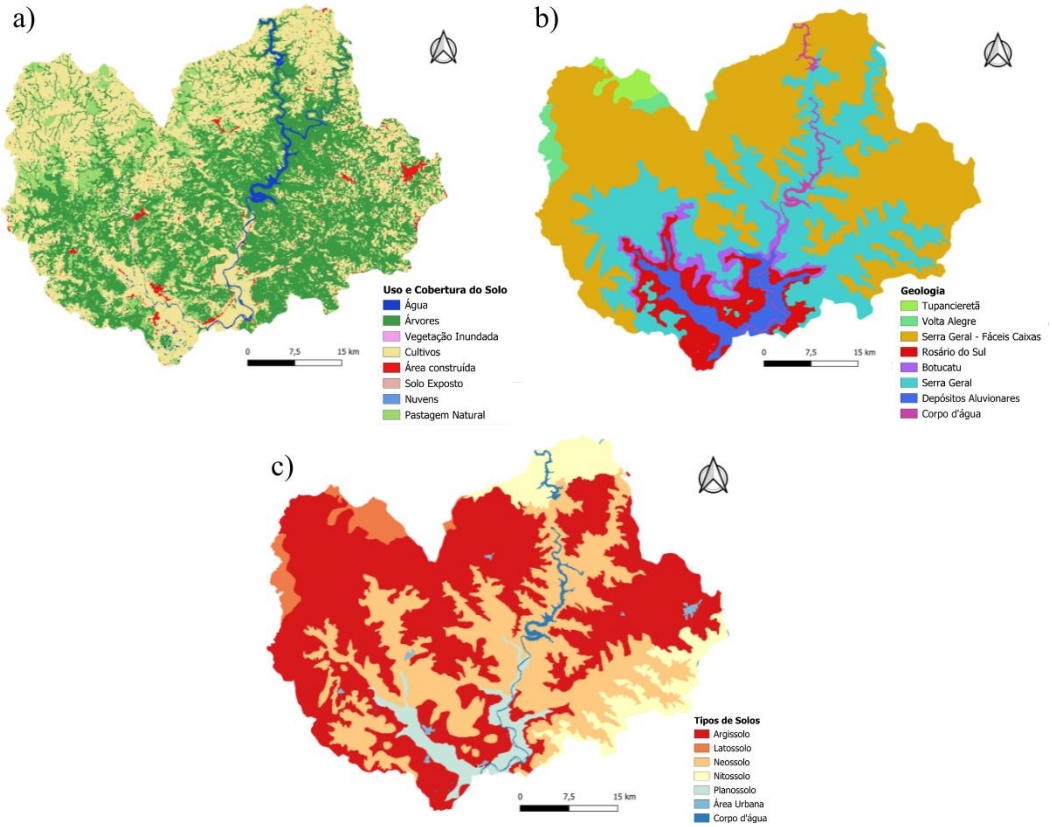


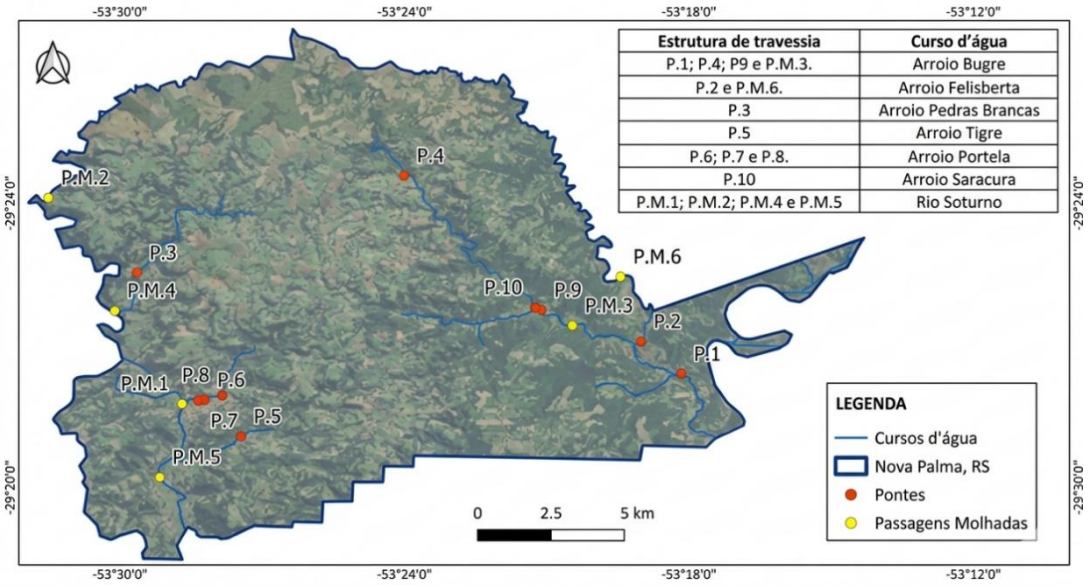
Figura 05: (a) Mapa de uso e cobertura do solo, (b) mapa geológico e (c) mapa de tipos de solos da área de estudo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Para fins de análise, foi elaborado um inventário das estruturas de travessia que colapsaram no município de Nova Palma (RS) durante o evento hidrológico extremo ocorrido entre abril e maio de 2024. A partir de informações provenientes de relatórios oficiais da Prefeitura Municipal, foram obtidas as coordenadas geográficas dessas estruturas, as quais foram organizadas em ambiente SIG e agrupadas no mapa de inventário apresentado na Figura 06.

Ao todo, foram identificadas 16 estruturas afetadas, sendo 10 pontes e 6 passagens molhadas, distribuídas ao longo de diferentes cursos d'água da área de estudo. As pontes correspondem a estruturas elevadas projetadas para permitir o escoamento

sob o tabuleiro, enquanto as passagens molhadas são estruturas implantadas ao nível do leito, sujeitas à submersão durante eventos de cheia, apresentando, em geral, maior vulnerabilidade a danos diretos (Bezerra, 2010).

Ressalta-se que esse inventário não foi utilizado como variável de entrada no modelo, mas como base para a análise dos resultados, agregando maior robustez ao modelo, ao incorporar evidências de danos reais



Estrutura de travessia	Curso d'água
P.1; P.4; P9 e P.M.3.	Arroio Bugre
P.2 e P.M.6.	Arroio Felisberta
P.3	Arroio Pedras Brancas
P.5	Arroio Tigre
P.6; P.7 e P.8.	Arroio Portela
P.10	Arroio Saracura
P.M.1; P.M.2; P.M.4 e P.M.5	Rio Soturno

Figura 06: Localização das pontes e passagens molhadas afetadas em durante evento extremo em 2024.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Atribuição dos pesos no método AHP

A atribuição dos pesos dos indicadores foi realizada com base em estudos relacionados à modelagem de suscetibilidade a inundações (Saha; Agrawal, 2020; Das, 2020; Sarkar *et al.*, 2022; Mousavi; Ataie-Ashtiani; Hosseini, 2022; Shahiri Tabarestani; Afzalimehr, 2022; Pathan *et al.*, 2022; Negese *et al.*, 2022; Mabrouk; Han, 2023; Debnath *et al.*, 2024).

A partir dessa etapa, foi aplicada a matriz de comparação pareada do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), proposto por Saaty (1980), com o objetivo de formalizar a ponderação dos critérios. As comparações entre os indicadores foram realizadas com base na importância relativa previamente identificada na revisão da literatura, utilizando a escala fundamental de Saaty, de 1 a 9. Todos os critérios foram considerados no mesmo nível hierárquico, sendo diretamente comparados entre si. A matriz resultante foi normalizada para obtenção do vetor de pesos, representando a contribuição relativa de cada indicador no modelo de suscetibilidade. A consistência das comparações foi avaliada por meio da Razão de Consistência (CR), que verifica a coerência nas relações estabelecidas entre os critérios (Das, 2020).

Elaboração do mapa de suscetibilidade

O método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*) consiste em uma técnica de análise multicritério utilizada em estudos ambientais, especialmente por possibilitar a hierarquização de alternativas com base na proximidade em relação a uma solução ideal e no distanciamento de uma solução indesejável (Pathan *et al.*, 2022).

No presente estudo, as alternativas correspondem a cada um dos pixels da área de estudo, avaliados a partir dos indicadores previamente definidos e processados em ambiente SIG. Inicialmente, foi construída a matriz de decisão, seguida da normalização dos dados para eliminar diferenças de escala entre os critérios. Em seguida, a matriz foi ponderada utilizando os pesos obtidos pelo método AHP. Posteriormente, foram determinadas as soluções ideais e calculado o índice de proximidade relativa (C_i) para cada pixel e classificados como muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta suscetibilidade a inundações. Mais detalhes sobre o procedimento metodológico do TOPSIS podem ser consultados em Hwang e Yoon (1981).

Avaliação da suscetibilidade a inundações com base em ocorrências de danos em pontes

Para a avaliação do mapa de suscetibilidade a inundações no município de Nova Palma, foi utilizado como referência o inventário das pontes e passagens molhadas afetadas durante o evento extremo de 2024.

Foi realizada a sobreposição em SIG entre o inventário com dados de registros reais e o mapa de suscetibilidade a inundações elaborado, tornando possível identificar a classe de suscetibilidade associada a cada estrutura afetada. Esse procedimento permitiu analisar a distribuição das ocorrências de danos em relação às diferentes classes de suscetibilidade, verificando se as estruturas impactadas se concentram em áreas classificadas como de maior suscetibilidade a inundações.

Dessa forma, o inventário das estruturas afetadas foi utilizado como base para a validação dos resultados do modelo, permitindo avaliar sua capacidade de representar adequadamente as áreas mais propensas à ocorrência de inundações.

Resultados e Discussão

Os pesos dos indicadores obtidos a partir do método AHP refletem a importância relativa das variáveis na modelagem da suscetibilidade a inundações. Os resultados estão mostrados na Tabela 01. A matriz de comparação apresentou CR = 0,05, valor inferior ao limite de 0,1 estabelecido por Saaty (1980), indicando consistência adequada nas comparações realizadas.

Critério	DRIO	DDREN	DECL	TWI	LULC	SOLO	ALT	CURV	GEO	Peso (%)
DRIO	1	2	3	2	3	3	3	5	7	22,8
DDREN	1/2	1	2	2	3	3	3	5	7	18,3
DECL	1/3	1/2	1	2	3	3	3	5	7	15,0
TWI	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	4	5	12,3
LULC	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	2	3	4	8,9
SOLO	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1	2	3	4	7,2
ALT	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1	2	3	5,8
CURV	1/5	1/5	1/5	1/4	1/3	1/3	1/2	1	2	3,4
GEO	1/7	1/7	1/7	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1	2,1

Tabela 01: Matriz de comparação AHP e pesos finais de cada indicador analisado.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A análise da suscetibilidade a inundações foi inicialmente realizada considerando a bacia de contribuição previamente delimitada (com área de aproximadamente 2.545 km²), com o objetivo de compreender a resposta hidrológica da bacia frente à geração e propagação das cheias. Em seguida, a avaliação foi aplicada ao limite administrativo do município de Nova Palma (RS) (com área aproximada de 315 km²), conforme exposto na Figura 07.

Os resultados para a bacia indicam o predomínio das classes de suscetibilidade baixa (41,40%) e moderada (41,70%), evidenciando que a maior parte da bacia apresenta condições intermediárias de suscetibilidade à ocorrência de inundações. As classes alta (8,81%) e muito alta (3,82%) totalizam aproximadamente 12,63% da área e concentram-se principalmente em regiões de menor declividade e maior proximidade à rede de drenagem, onde o acúmulo e a convergência do escoamento superficial favorecem a ocorrência de inundações.

Para o município de Nova Palma, observa-se padrão semelhante ao identificado na bacia de contribuição, com predomínio das classes baixa (45,64%) e muito baixa (41,12%), totalizando aproximadamente 86,76% da área municipal. As classes de moderada (7,05%), alta (2,76%) e muito alta suscetibilidade (2,37%) apresentam menor representatividade espacial, indicando que, embora grande parte do território possua baixa propensão à ocorrência de inundações, existem áreas específicas mais críticas que demandam atenção no planejamento territorial e na gestão de riscos.

A validação dos resultados foi realizada por meio da sobreposição espacial entre o mapa de suscetibilidade gerado e a localização das estruturas de travessia de cursos d'água (pontes e passagens molhadas) afetadas durante o evento extremo de 2024. Observa-se que a maior parte dessas estruturas está inserida em áreas classificadas como de alta e muito alta suscetibilidade, o que indica coerência entre as áreas identificadas pelo modelo e as regiões onde ocorreram danos reais. Dessa forma, a correspondência espacial entre as manchas de maior suscetibilidade e os pontos de ocorrência de danos reforça a capacidade do modelo em representar adequadamente as áreas mais propensas a inundações, evidenciando sua aplicabilidade como ferramenta de apoio ao planejamento e à gestão de riscos hidrológicos.

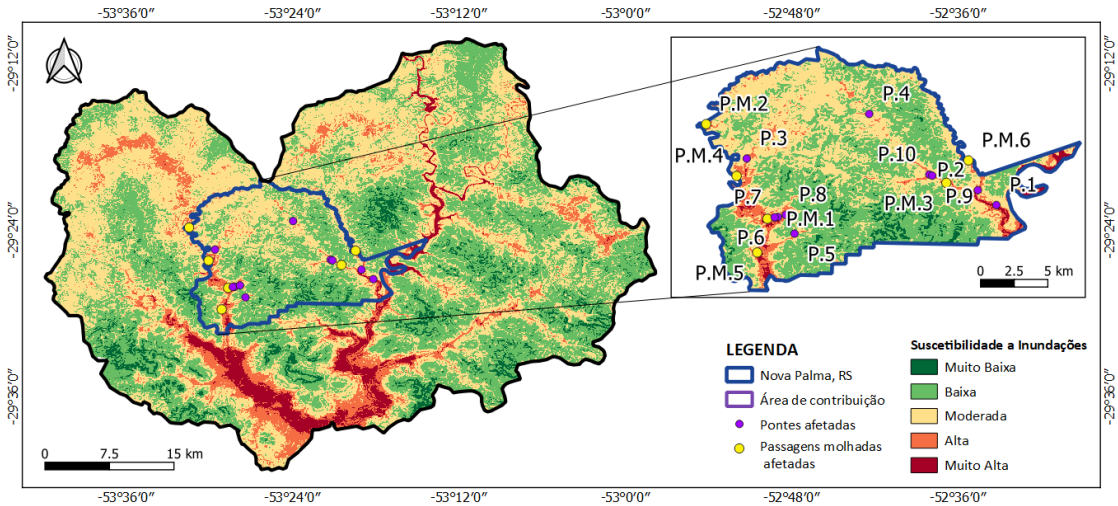


Figura 07: Mapa de suscetibilidade a inundações na área de contribuição analisada.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Comentários finais

O presente estudo teve como objetivo mapear a suscetibilidade a inundações no município de Nova Palma (RS) por meio da integração dos métodos AHP e TOPSIS em ambiente SIG. Os resultados indicaram o predomínio das classes de baixa e moderada suscetibilidade, com áreas críticas de alta e muito alta suscetibilidade concentradas principalmente em regiões próximas à rede de drenagem e com menor declividade. A validação dos resultados, realizada a partir da sobreposição com estruturas de travessia afetadas durante o evento extremo de 2024, evidenciou boa correspondência espacial com as classes de maior suscetibilidade, reforçando a consistência e aplicabilidade do modelo. Como perspectiva futura, destaca-se a incorporação de dados hidrodinâmicos e informações estruturais das obras, visando aprimorar a precisão das análises e o suporte à gestão de riscos hidrológicos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e, também, pelas bolsas de Produtividade em Pesquisa - Processos nº 310073/2025-1 e 305384/2025-2. Agradece-se também ao grupo de pesquisa Ecotecnologias do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal de Santa Maria (PPGECAM/UFSM) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BEZERRA, M. B. Impactos de passagens molhadas na morfodinâmica fluvial do baixo curso do rio Jaguaribe: uma análise a partir da Barragem das Pedrinhas em Limoeiro do Norte – Ceará. Fortaleza, 2010. 114 p.

BUNMI MUDASHIRU, R.; SABTU, N.; ABDULLAH, R.; SALEH, A.; ABUSTAN, I. Optimality of flood influencing factors for flood hazard mapping: An evaluation of two multi-criteria decision-making methods. **Journal of Hydrology**, v. 612, p. 128055, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128055

CHEN, Y.; WANG, D.; ZHANG, L.; GUO, H.; MA, J.; GAO, W. Flood risk assessment of Wuhan, China, using a multi-criteria analysis model with the improved AHP-Entropy method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 42, p. 96001–96018, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-023-29066-8

CHICHERIT, Y. S.; MARTIN, V. T.; PICCILLI, D. G. A.; TASSI, R.; PEREIRA, S.; PACE, R. G. D.; ARAUJO, G. S. ANÁLISE PRELIMINAR DOS IMPACTOS DAS INUNDAÇÕES EXTREMAS DE 2024 EM DUAS PONTES NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO. *In*: XXVI SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS2025, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: *[s. n.]*, 2025.

DAS, S. Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100379, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100379

DEBNATH, J. *et al.* Modelling on assessment of flood risk susceptibility at the Jia Bharali River basin in Eastern Himalayas by integrating multicollinearity tests and geospatial techniques. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 10, n. 2, p. 2393–2419, 2024. https://doi.org/10.1007/s40808-023-01912-1

EKMEKCIOĞLU, Ö.; KOC, K.; ÖZGER, M. Towards flood risk mapping based on multi-tiered decision making in a densely urbanized metropolitan city of Istanbul. **Sustainable Cities and Society**, v. 80, p. 103759, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103759

ESCOBAR-SILVA, E. V. *et al.* Water-related disasters in Brazil: an assessment from 1991 to 2024. **Environmental Research Letters**, v. 21, n. 7, p. 074015, 2026. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae5991

GHALENO, M. R. D.; MESHRAM, S. G.; ALVANDI, E. Pragmatic approach for prioritization of flood and sedimentation hazard potential of watersheds. **Soft Comput**, v. 24, n. 20, p. 15701-15714, 2020.https://doi.org/10.1007/s00500-020-04899-4

HWANG, C.-L.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems). v. 186. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9. Acesso em: 26 abr. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. CIDADES E ESTADOS DO BRASIL. 2022. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/nova-palma/panorama. Acesso em: 26 abr. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. Cambridge University Press, 2023. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1017/9781009325844. Acesso em: 23 abr. 2026.

KIA, M. B. *et al.* An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. **Environmental Earth Sciences**, v. 67, n. 1, p. 251–264, 2012. https://doi.org/10.1007/s12665-011-1504-z

KOBIYAMA, M. *et al.* Sugestões às comunidades locais sobre a gestão de risco de desastres com base em experiências in situ durante a tragédia de 2024 no Rio Grande do Sul. *In*: **Do local ao global : mudanças climáticas e gestão de risco de desastre**. 1. ed. Centro Paula Souza, 2025.

LAIPELT, L. *et al.* ANADEM: A Digital Terrain Model for South America. **Remote Sensing**, v. 16, n. 13, p. 2321, 2024. https://doi.org/10.3390/rs16132321

LOLI, M.; KEFALAS, G.; DAFIS, S.; MITOULIS, S. A.; SCHMIDT, F. Bridge-specific flood risk assessment of transport networks using GIS and remotely sensed data. **Science of The Total Environment**, v. 850, p. 157976, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157976

MABROUK, M.; HAN, H. Urban resilience assessment: A multicriteria approach for identifying urban flood-exposed risky districts using multiple-criteria decision-making tools (MCDM). **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 91, p. 103684, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103684

MANFIO, V. Enchentes na pequena cidade de Nova Palma, RS, Brasil: uma análise de 1941 a 2024. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, n. 45, p. 28–45, 2025.

MOUSAVI, S. M.; ATAIE-ASHTIANI, B.; HOSSEINI, S. M. Comparison of statistical and MCDM approaches for flood susceptibility mapping in northern Iran. **Journal of Hydrology**, v. 612, p. 128072, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128072

NEGESE, A.; WORKU, D.; SHITAYE, A.; GETNET, H. Potential flood-prone area identification and mapping using GIS-based multi-criteria decision-making and analytical hierarchy process in Dega Damot district, northwestern Ethiopia. **Applied Water Science**, v. 12, n. 12, p. 255, 2022. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01772-7

PATHAN, A. I.; GIRISH AGNIHOTRI, P.; SAID, S.; PATEL, D. AHP and TOPSIS based flood risk assessment- a case study of the Navsari City, Gujarat, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 7, p. 509, 2022. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10111-x

PREFEITURA MUNICIPAL DE NOVA PALMA. **Nova Palma decreta Situação de Emergência após chuvas intensas**, 2024a. Disponível em: https://www.novapalma.rs.gov.br/midias/noticias/nova-palma-decreta-situao-de-emergncia-aps-chuvas-intensas/4407. Acesso em: 23 abr. 2026.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NOVA PALMA. **Relatório - pontes a reconstruir em Nova Palma**, 2024b. Disponível em: https://www.novapalma.rs.gov.br/midias/noticias/relatrio-pontes-a-reconstruir-em-nova-palma/4432. Acesso em: 23 abr. 2026.
SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1980.

SAHA, A. K.; AGRAWAL, S. Mapping and assessment of flood risk in Prayagraj district, India: a GIS and remote sensing study. **Nanotechnology for Environmental Engineering**, v. 5, n. 2, p. 11, 2020. https://doi.org/10.1007/s41204-020-00073-1

SARKAR, S. K. *et al.* Developing Robust Flood Susceptibility Model with Small Numbers of Parameters in Highly Fertile Regions of Northwest Bangladesh for Sustainable Flood and Agriculture Management. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 3982, 2022. https://doi.org/10.3390/su14073982

SEMA – SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. G070 - Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí. 2018. Disponível em: https://sema.rs.gov.br/g070-bh-baixo-jacui. Acesso em: 26 abr. 2026.

SHAHIRI TABARESTANI, E.; AFZALIMEHR, H. A comparative assessment of multi-criteria decision analysis for flood susceptibility modelling. **Geocarto International**, v. 37, n. 20, p. 5851–5874, 2022. https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1923834

SUAREZ, G.; BELLO, O.; CAMPBELL, J. **Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul**. 2024. https://doi.org/10.18235/0013254.

ZHANG, G.; LIU, Y.; LIU, J.; LAN, S.; YANG, J. Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 9, n. 3, p. 388–406, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.12.003

METODOLOGIA DO VALOR INFORMATIVO (VI) PARA DETERMINAÇÃO DE CARTA DE SUSCETIBILIDADE A DESASTRES HIDROLÓGICOS

1 Tamara Vieira Pascoto Lenhatti, 2 Simone Andrea Furegatti, 3 Anna Silvia Palcheco Peixoto
1 Universidade Estadual Paulista, e-mail: tamara.pascoto@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista, e-mail: simone.furegatti@unesp.br; 3 Universidade Estadual Paulista, e-mail: anna.peixoto@unesp.br

Palavras-chave: Fatores condicionantes; Alagamentos; Enxurradas.

Resumo

Desastres de origem hidrológica, incluindo enchentes, inundações, alagamentos, transbordamento de rios e enxurradas, configuram-se como algumas das principais ameaças à segurança da sociedade contemporânea. Tais eventos acarretam severas perdas humanas, danos materiais vultosos e prejuízos de ordem econômica e ambiental, sendo frequentemente intensificados por processos de urbanização desordenada e pela ocupação de áreas naturalmente vulneráveis. A suscetibilidade a esses desastres refere-se à propensão intrínseca de uma área ser afetada, um fenômeno condicionado pela complexa interação entre fatores naturais e antrópicos. Entre os principais condicionantes físicos e ambientais, destacam-se a geologia, a geomorfologia, a declividade e o Índice Topográfico de Umidade (TWI). O presente trabalho tem como objetivo analisar de forma integrada os fatores condicionantes da suscetibilidade a desastres hidrológicos em quatro regiões administrativas do estado de São Paulo: Registro, Baixada Santista, São Paulo e São José dos Campos. A escolha dessas áreas justifica-se pela alta recorrência de eventos extremos, fruto de suas características geofísicas peculiares e do uso intensivo do solo. A metodologia utilizada foi a do Valor Informativo (VI), muito consolidade para desenvolver cartas de suscetibilidade a movimentos de massa. Os resultados obtidos indicam que o fator de maior influência na determinação da suscetibilidade é o uso e ocupação do solo, seguido por geologia, geomorfologia, declividade e elevação. Observou-se que a dinâmica de cobertura do solo possui a correlação mais estreita com os registros históricos de desastres, evidenciando o peso da intervenção humana na modificação dos regimes hidrológicos locais. Conclui-se que o uso e a ocupação do solo constituem um elemento central no mapeamento de suscetibilidade e risco, por sintetizarem a interface entre processos naturais e pressões antrópicas, fornecendo subsídios fundamentais para o planejamento territorial e a mitigação de desastres. Ademais, os resultados demonstram que o método do Valor Informativo apresenta elevado potencial de aplicação na análise da suscetibilidade a desastres hidrológicos, ampliando seu uso para além dos estudos tradicionais voltados a desastres de origem geológica.

Introdução

Os desastres de origem hidrológica configuram-se entre os eventos naturais mais frequentes e impactantes no mundo contemporâneo. Em 2024, mais de 36% dos desastres de grande porte ocorridos são de são de origem hidrológica (142 dos 393 totais). Esse tipo de desastre também integra o ranking dos 10 desastres com mais mortes, com mais pessoas afetadas e com as maiores perdas econômicas do mundo. As enchentes em CHAD levaram a óbito 576 pessoas e na Nigéria 396. As enchentes da Índia afetaram em torno de 8 milhões de pessoas, enquanto em Bangladesh foram mais de 10,9 milhões levando em consideração os desastres de agosto e de junho e julho de 2024. Em perdas econômicas as enchentes da Espanha no ano de 2024, acarretaram 11 bilhões de dólares desperdiçados, enquanto no Brasil foram em torno de 7 bilhões (CRED, 2025).

Parte desse prejuízo no cenário brasileiro está relacionado ao maior desastre da história do Rio Grande do Sul, que ocorreu entre abril e maio de 2024. Por mais que a região sul seja a região com maior projeção de aumento de cheias pelas mudanças climáticas (ANA, 2025), outras regiões também sofrem com esses desastres e merecem atenção. A região Sudeste, por exemplo, no ano de 2025 concentrou 43% de todas as ocorrências de desastres do país (CEMADEN, 2026).

Os desastres de origem hidrológica englobam as enchentes, alagamentos, inundações, transbordamento de rios e enxurradas (BRASIL, 2020). A definição desses termos costuma ser conflitante a depender da literatura. As inundações são caracterizadas pelo transbordamento de água da calha dos rios (BRASIL, 2019; GATICA HERRERA *ET AL.*, 2019; ROJAS *ET AL.*, 2014), ou pela acumulação de água por drenagem deficiente (BRASIL, 2019). As enxurradas diferem das inundações devido ao menor tempo de ocorrência do evento e devido a velocidade do escoamento (CASTRO, 1998; SIRANGELO, 2014). Os alagamentos são definidos como a água acumulada nas ruas com sistemas de drenagens deficientes por precipitações pluviométricas intensas (BRASIL, 2019).

Diante desse contexto, o estudo dos desastres de origem hidrológica torna-se fundamental para a redução de riscos e para o planejamento territorial. A compreensão dos mecanismos que levam à sua ocorrência permite o desenvolvimento de estratégias de prevenção, mitigação e adaptação, contribuindo diretamente para a proteção da população e para a gestão sustentável do espaço urbano e rural. Nesse sentido, o mapeamento da suscetibilidade a esses desastres é uma ferramenta essencial, pois possibilita identificar áreas mais propensas à ocorrência desses eventos, subsidiando políticas públicas, sistemas de alerta e ações de ordenamento territorial.

A suscetibilidade a desastres hidrológicos está diretamente relacionada a um conjunto de fatores condicionantes, que incluem características físicas do meio e intervenções antrópicas. Estudos recentes em diferentes partes do mundo destacam a

importância de variáveis como geologia (OLIVEIRA CHAVES ET AL., 2021; ZZAMAN *ET AL.*, 2021; ÇELIK *ET AL.*, 2012), geomorfologia (CAMAPUM DE CARVALHO, 2010), declividade (OUMA E TATEISHI, 2014), uso e ocupação do solo (RAMESH E IQBAL, 2020; SUPPAWIMUT, 2021; OLIVEIRA CHAVES ET AL., 2021; MOJADDADI *ET AL.*, 2017; RAHMATI, POURGHASEMI E ZEINIVAND, 2016), elevação (MIRANDA *ET AL.*, 2019; DAS E PARDESHI, 2018; KALANTAR ET AL., 2021) e índice topográfico de umidade (TWI) (KHOSRAVI *ET AL.*, 2016) na determinação dessas áreas suscetíveis.

É comum na literatura a análise desses fatores por meio de estatística multivariada (OLIVEIRA CHAVES ET AL., 2021; RAMESH E IQBAL, 2020; SUPPAWIMUT, 2021; RAHMATI, POURGHASEMI E ZEINIVAND, 2016; KHOSRAVI *ET AL.*, 2016) entretanto, não foi encontrado nenhuma análise que propusesse o uso da metodologia do Valor Informativo, proposto por Yin e Yan (1988) para isso. Esse método é bem consolidado para análise dos fatores de desastres de origem geológica (Hader, 2021; Sandes, 2023), onde é levado em consideração a área de cada desastre. Desse modo, para os escorregamentos, por exemplo, a quantidade de pixels dos desastres é proveniente da somatória da área escorregada de cada desastre.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a importância de diferentes fatores condicionantes na suscetibilidade a desastres de origem hidrológica por meio do método do Valor Informativo. Para tal, foram utilizados dados das regiões administrativas de Registro, Baixada Santista, São José dos Campos e São Paulo, áreas que apresentam elevada recorrência desses eventos e que constituem importantes cenários para a análise integrada entre fatores naturais e antrópicos na determinação da suscetibilidade.

Área de Estudo

Para desenvolver a pesquisa, foi utilizado parte do estado de São Paulo, a qual compreendem as regiões administrativas de São Paulo, Registro, Baixada Santista e São José dos Campos (Figura 1). A escolha dessa área, com 38.672,7 Km² de extensão, deu-se devido a apenas essa região ter apresentado 43,1% de todos os desastres de origem hidrológico do estado de São Paulo entre os anos de 1996 a 2020 (PASCOTO *et al.*, 2022).

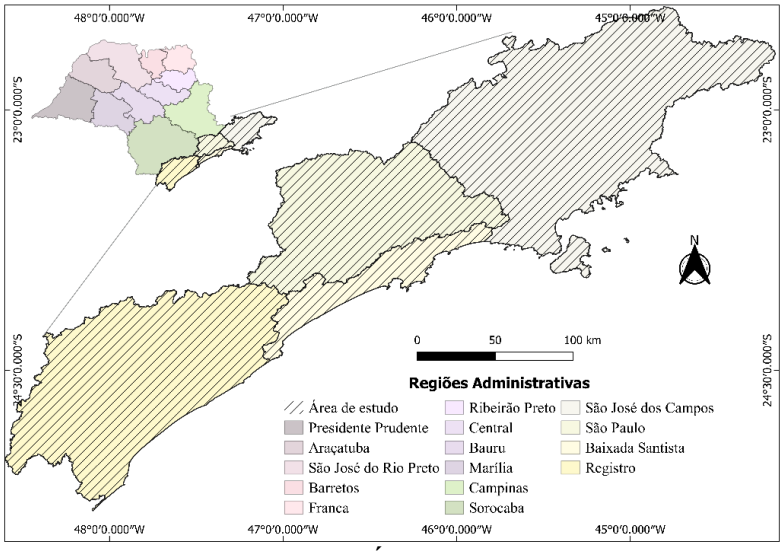


Figura 6 - Área de estudo

Material e Métodos

O inventário dos desastres utilizados para essa pesquisa foi o mesmo utilizado por Pascoto *et al.* (2024). Para os fatores analisados, o uso e ocupação, geologia e declividade também foram utilizados os mapas desenvolvidos por Pascoto *et al.* (2024), uma vez que esse estudo compreende a mesma área de estudo e é embasado no mesmo inventário de desastres. O mapa geomorfológico utilizado foi o desenvolvido pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) (IPT, 1981) na escala de 1:1.100.000.

A elevação e o TWI foram provenientes do modelo digital de elevação (MDE) disponível no Portal do DataGeo do Sistema Ambiental Paulista, na escala de 1:50.000, com curvas de nível a cada 5 metros.

O inventário foi dividido, de maneira aleatória, em 70% para o grupo de treino e 30% para o grupo de teste. Para cada classe de cada fator condicionante do grupo amostral de treino foi calculado o Valor Informativo (VI), de acordo com a equação 1:

$$VI_i = log \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (1)$$

Em que: VI_i é o Valor Informativo para a classe i; S_i é a quantidade de pixels de desastres em uma classe i do fator condicionante; N_i é a quantidade de pixels em uma classe i; S é a quantidade total de pixels com desastres na área total de estudo; e N é a quantidade total de pixels da área total de estudo. Devido ao tamanho amostral e às limitações dos dados disponíveis no

inventário de desastres, cada evento foi representado por um único pixel, uma vez que não há informações sobre a área diretamente afetada de cada desastre.

Valores positivos de VI_i indicam que a classe do fator condicionante analisado é suscetível à ocorrência de desastres, enquanto valores negativos sugerem baixa suscetibilidade (Jade e Sarkar, 1993). Para as classes em que não houve registro de desastres ($S_i = 0$), adotou-se o menor valor de VI observado para o respectivo fator, considerando a impossibilidade de se calcular o logaritmo de zero.

Para avaliar a representatividade dos fatores condicionantes, foram construídas curvas ROC (Receiver Operating Characteristic) e realizada a análise de sensibilidade. A sensibilidade expressa a capacidade do modelo em identificar corretamente as áreas suscetíveis, enquanto a especificidade indica a capacidade de reconhecer áreas não suscetíveis.

A importância relativa dos fatores condicionantes foi analisada por meio da área abaixo da curva ROC (AAC), sendo considerados mais relevantes aqueles que apresentaram maiores valores de AAC.

Todos os fatores foram espacializados com base nos valores de Valor Informativo (VI) atribuídos a cada classe. Após a análise individual, foram elaborados três modelos distintos de suscetibilidade: (i) um modelo completo, incluindo todos os fatores analisados (geologia, geomorfologia, uso e ocupação do solo, elevação, declividade e TWI); (ii) um modelo com os cinco fatores de maior influência; e (iii) um modelo com os quatro fatores mais influentes. A definição do número de fatores em cada modelo baseou-se nos valores de AAC, buscando-se manter índices superiores a 0,65 para todos os grupos de desastres.

Os modelos foram desenvolvidos por meio de álgebra de mapas no QGIS e validados utilizando curvas de sucesso e de predição. As curvas de sucesso foram geradas com dados da amostra de treinamento, enquanto as curvas de predição utilizaram dados independentes da amostra de teste. Em ambos os casos, a área abaixo da curva (AAC) foi calculada, servindo como critério para a seleção do modelo mais adequado.

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta parte dos valores de Valor Informativo (VI) calculados para a geologia, uso e ocupação e geomorfologia, enquanto a Tabela 2 apresenta parte dos valores de VI para a declividade, elevação e TWI. Ressalta-se que valores negativos de VI indicam classes com menor suscetibilidade aos desastres, enquanto valores positivos correspondem a classes mais suscetíveis. Nas tabelas, esses contrastes são evidenciados por meio de destaque em verde (menor suscetibilidade) e vermelho (maior suscetibilidade), uma vez que apenas os valores extremos positivos e negativos da análise estão ilustrados.

Tabela 1 - Valor informativo (VI) para a geologia, uso e ocupação e geomorfologia

Geologia			Uso e Ocupação		Geomorfologia	
Classe	Descrição	VI	Descrição	VI	Descrição	VI
PIs	Formação Setuva	1,716	Aquicultura, Silvicultura e Restinga Herbácea	-2,680	Tabuleiros	1,468
ϵογa	Fracies Graciosa	-3,175	Mangue, Campo alagado e área pantanosa	-2,680	Colinas amplas	1,182
Kα3	Corpo Alcalino do Litoral Norte, Cananeia, Passa quatro e Ponte Nova	-3,180	Cana, Soja, Café, Citrus e Outras Lavouras Perenes	-2,680	Colinas pequenas com espigões locais	1,930
Qa	Sedimentos Aluvionares	1,235	Mineração e afloramento rochoso	-2,680	Montanhas	-3,324
TQis	Cobertura Cenozóica Indiferenciadas correlatas à Formação SP	-3,180	Praia, Duna e Areal	1,339	Morros em áreas de sumidouros	-3,330
TQs	Formação São Paulo	2,307	Área Urbanizada	2,517		
			Apicum	2,830		

No que se refere à geologia, as classes mais suscetíveis à ocorrência de desastres foram TQs (Formação São Paulo), com um VI de 2,307, PIs (Formação Setuva) com 1,716 e Qa (Sedimentos Aluvionares) com VI de 1,235 (Tabela 1). A elevada suscetibilidade atribuída à Formação São Paulo pode estar relacionada à sua constituição por sedimentos fluviais, bem como à sua localização na Região Metropolitana de São Paulo, onde há grande concentração de registros desse tipo de evento. Situação semelhante pode ser observada na classe de Sedimentos Aluvionares (Qa), possivelmente em razão da elevada incidência de desastres registrados nessa unidade. Contudo, destaca-se que a classe Qa apresenta uma extensão territorial significativamente superior à TQs: enquanto os Sedimentos Aluvionares (Qa) abrangem 8,79% da área total, a Formação São Paulo (TQs) corresponde a apenas 1,78%.

Em relação ao uso e ocupação do solo, as maiores suscetibilidades foram observadas nas classes de apicum com VI de 2,830, nas áreas urbanizadas, com VI de 2,517, e praias, dunas e areais com VI de 1,339 (Tabela 1). Esperava-se que as áreas urbanizadas apresentassem os maiores valores informativos, tanto em função da elevada concentração populacional — que resulta em maior número de registros e impactos — quanto das alterações antrópicas no meio físico. Nesse sentido, o escoamento superficial e a infiltração da água no solo estão diretamente condicionados ao uso e ocupação da terra (Karymbalis *et al.*, 2021). Assim, áreas urbanas tendem a apresentar maior suscetibilidade a desastres de origem hidrológica, devido à intensa impermeabilização, que reduz a infiltração e intensifica o escoamento superficial (Olii *et al.*, 2021).

Entretanto, a classe de apicum foi a que apresentou o maior valor informativo. Essas áreas, caracterizadas como ambientes adjacentes a manguezais e com elevada salinidade, geralmente possuem cobertura vegetal pouco densa (Ucha *et al.*, 2008), o que pode contribuir para o aumento da suscetibilidade. Além disso, o alto valor observado não se deve apenas à ocorrência de desastres — que foi relativamente baixa (apenas três registros) —, mas também à sua reduzida representatividade espacial, correspondendo a apenas 0,01% da área total, o que amplifica seu peso relativo na análise.

Por sua vez, na classe de praias, dunas e areais, a elevada suscetibilidade está associada principalmente à baixa cobertura vegetal. A ausência de vegetação compromete a estabilidade do solo e favorecem a rápida saturação durante eventos de chuva intensa (Dias *et al.,* 2002), aumentando, assim, a propensão à ocorrência de movimentos de massa.

Para a geomorfologia, destacaram-se como mais suscetíveis as classes de colinas pequenas com espigões locais (VI = 1,930), tabuleiros (VI = 1,468) e colinas amplas (VI= 1,182) (Tabela 1). A unidade de colinas pequenas com espigões locais caracteriza-se por apresentar densidade de drenagem de média a baixa, indicando escoamento superficial pouco expressivo e maior potencial de infiltração de água no solo. No entanto, por se localizar em áreas com elevada concentração populacional, o uso e a ocupação do solo podem ter promovido a impermeabilização da superfície, reduzindo a infiltração. Essa condição, associada ao baixo escoamento superficial, tende a aumentar a propensão à ocorrência de desastres de origem hidrológica.

Quanto à declividade, as classes plano (0–3%), suave ondulado (3–8%) e ondulado (8–20%) apresentaram valores positivos de VI (Tabela 2). As áreas mais planas (0–3%) destacaram-se como as mais suscetíveis (VI = 2,037), resultado já esperado, uma vez que superfícies com baixa inclinação favorecem o acúmulo de água e, consequentemente, aumentam a propensão a inundações (Campioli e Vieira, 2019; Pessoa Neto *et al.,* 2023). Em contrapartida, áreas com maiores declividades mostraram-se menos propensas à ocorrência de desastres hidrológicos, corroborando estudos que indicam menor suscetibilidade em terrenos mais inclinados (Ouma e Tateishi, 2014).

Tabela 2 - Valor informativo (VI) para a declividade, elevação e TWI

Declividade			Elevação		TWI	
Classe	Descrição	VI	Classe	VI	Classes	VI
0 a 3	Plano	2,037	500-600	0,353	<3	-2,18
3 a 8	Suave Ondulado	1,794	700-800	1,081	9 a 10	0,656
8 a 20	Ondulado	1,048	1200-1300	-3,72	11 a 12	0,866
20 a 45	Forte Ondulado	-0,563	1300-1400	-3,72	16 a 17	-2,18
45 a 75	Montanhoso	-1,385	1400-1500	-3,72	17 a 18	1,127
75 a 100	Escarpado	-1,277	>1800	-3,72	> 18	-2,18

No que diz respeito à elevação, as classes com maior suscetibilidade concentram-se nas faixas de 500–600 m e 700–800 m, enquanto as menores suscetibilidades foram registradas entre 1200–1300 m, 1300–1400 m, 1400–1500 m e acima de 1800 m (Tabela 2). A elevada suscetibilidade observada entre 700 e 800 m pode ser explicada pela presença de importantes centros urbanos da Região Metropolitana de São Paulo, como São Paulo, Osasco, Barueri, Guarulhos, Santo André, Itaquaquecetuba e Franco da Rocha. Trata-se da área com maior concentração populacional da região de estudo, o que resulta em maior número de registros de ocorrências pela Defesa Civil. Além disso, essas cidades apresentam elevados níveis de impermeabilização decorrentes da intensa urbanização, fator que potencializa a ocorrência de desastres, especialmente em situações de falhas nos sistemas de captação e drenagem pluvial urbana.

Por sua vez, as altitudes entre 500 e 600 m estão associadas, em grande parte, às áreas adjacentes à rodovia BR-116, o que também contribui para sua classificação de suscetibilidade intermediária. Nesses locais, a influência antrópica é significativa, uma vez que o crescimento urbano ao longo da rodovia, aliado ao intenso fluxo de veículos, promove alterações nas características naturais do ambiente (Sandes, 2023), podendo influenciar o aumento da suscetibilidade a desastres.

Por fim, em relação ao Índice Topográfico de Umidade (TWI), as classes acima de 18, abaixo de 3 e entre 16 e 17 apresentaram valores negativos de VI, indicando baixa suscetibilidade à ocorrência desses eventos (Tabela 2). Em geral, valores elevados de TWI estão associados a fundos de vale, caracterizados por relevo mais plano e maior capacidade de acumulação e saturação de água no solo, o que pode favorecer sua instabilização (Siefert, 2012). Dessa forma, esperava-se uma maior ocorrência de desastres em áreas com altos valores de TWI, em função da elevada saturação (Maganhotto *et al*., 2016). No entanto, esse comportamento foi observado apenas na faixa entre 17 e 18, não se estendendo às demais classes de TWI elevado.

As curvas ROC dos fatores condicionantes foram geradas a partir do inventário de desastres (Figura 2). O uso e ocupação do solo destacou-se como o fator de maior influência (AAC = 0,919), seguido pela geomorfologia (AAC = 0,795). A geologia (AAC = 0,790) e a elevação (AAC = 0,766) ocuparam a terceira e quarta posições, respectivamente. A declividade apresentou AAC de 0,744, enquanto o TWI obteve o menor desempenho entre os fatores analisados (AAC = 0,682).

Com base nos valores de AAC, foram elaborados os modelos de suscetibilidade (Figura 3). No primeiro modelo, foram considerados todos os fatores condicionantes, uma vez que todos apresentaram valores de AAC superiores a 0,5, limiar recomendado pela literatura (Beguería, 2006). O segundo modelo foi construído com a exclusão do fator TWI, enquanto o terceiro modelo desconsiderou os fatores TWI e declividade, priorizando apenas aqueles com maior desempenho individual.

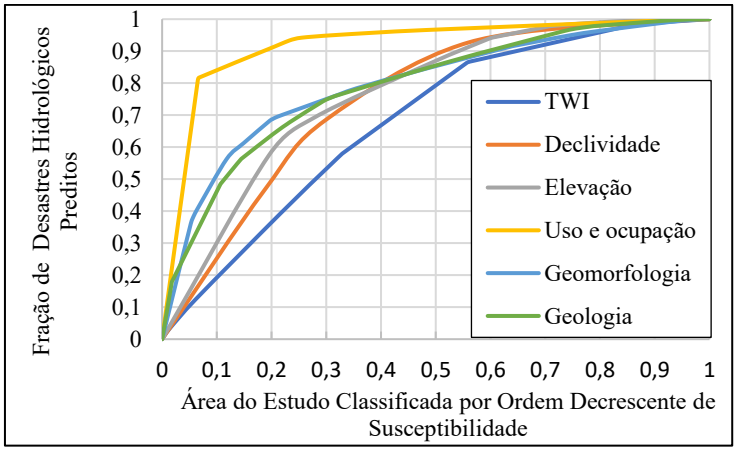


Figura 2 - Curva ROC para os fatores condicionantes dos desastres de origem hidrológico

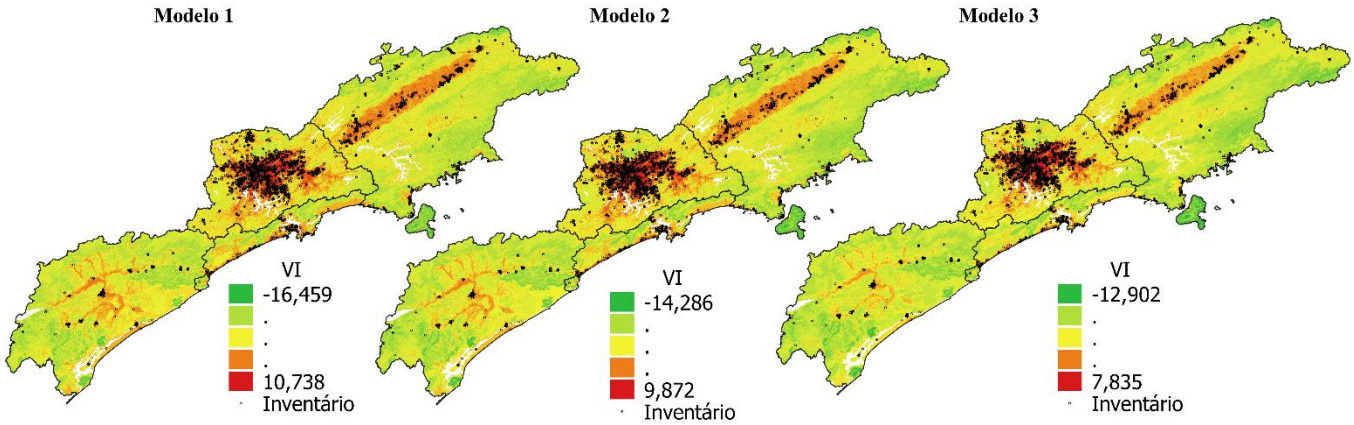


Figura 03 – Modelos de suscetibilidade gerados pelo método do Valor Informativo

A validação dos modelos foi realizada por meio de curvas de sucesso, obtidas a partir do conjunto de treinamento, e de curvas de predição, geradas com o conjunto de teste. Observou-se que as curvas de sucesso e de predição apresentaram comportamentos muito semelhantes entre os modelos, o que dificultou sua distinção e, consequentemente, a seleção do modelo mais adequado com base apenas na análise visual. Dessa forma, a avaliação da acurácia foi conduzida por meio do cálculo da área abaixo da curva (AAC) para cada modelo.

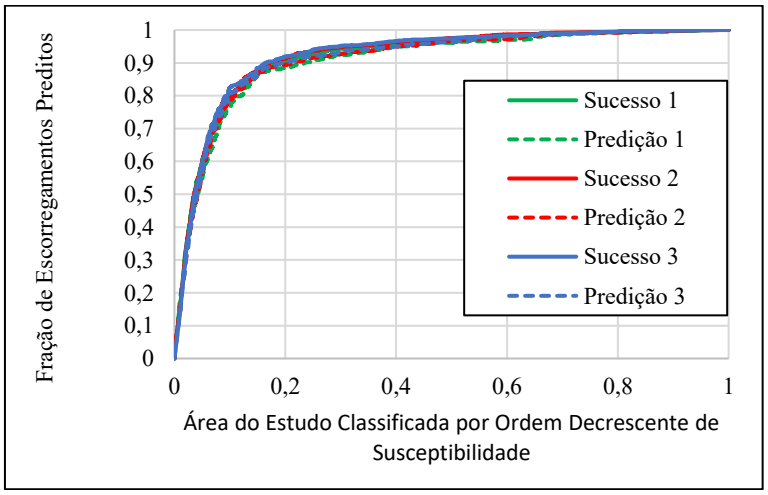


Figura 04 - Curvas de sucesso e predição dos três modelos para os desastres

Para o Modelo 1, a acurácia foi de 0,919 para a curva de sucesso e 0,907 para a curva de predição. No Modelo 2, os valores foram de 0,922 (sucesso) e 0,911 (predição). Por fim, o Modelo 3 apresentou os maiores índices entre os modelos avaliados, com 0,923 para a curva de sucesso e 0,913 para a curva de predição. Contudo, observa-se que a diferença entre os Modelos 2 e 3 é pouco expressiva.

Embora o Modelo 3 apresente maior simplicidade operacional, devido ao menor número de fatores condicionantes, optou-se pela utilização do Modelo 2 na elaboração da carta de suscetibilidade. Essa escolha se justifica pela relevância potencial da declividade na ocorrência de desastres hidrológicos. Assim, o Modelo 2 foi espacializado, e os resultados de suscetibilidade foram classificados em cinco classes de igual intervalo: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta suscetibilidade (Figura 5).

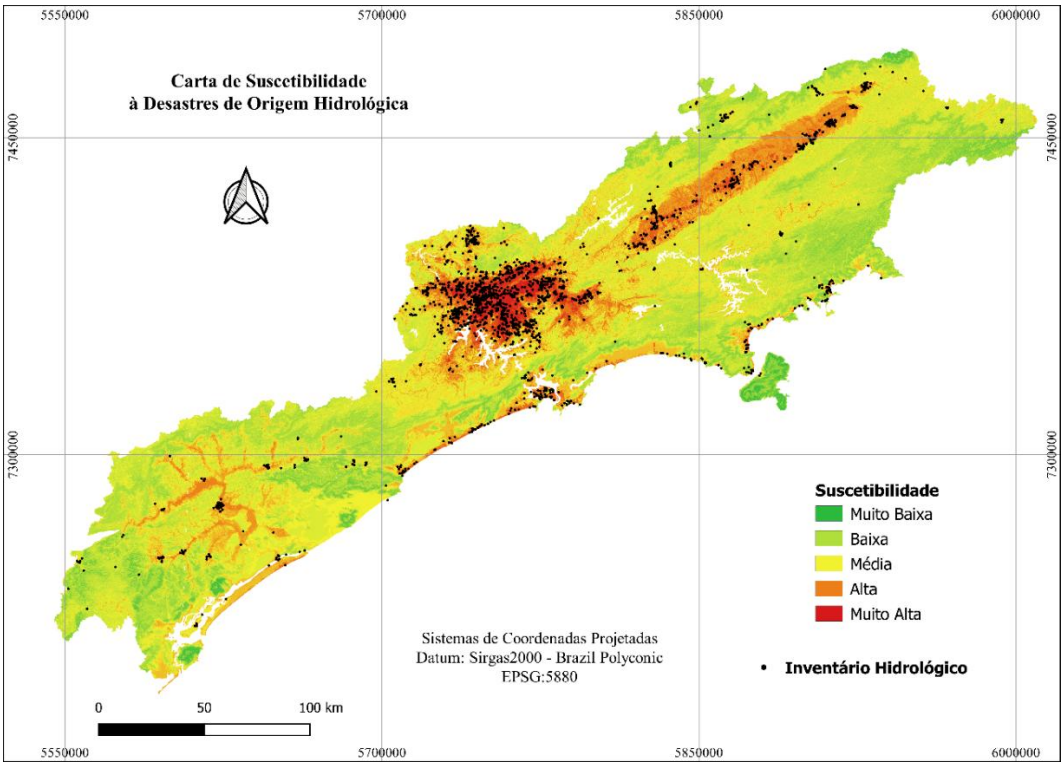


Figura 05 - Carta de suscetibilidade a desastres de origem hidrológica

As áreas classificadas como de baixa e muito baixa suscetibilidade correspondem a 42,37% da área de estudo, concentrando apenas 1,92% dos desastres registrados no período analisado. As áreas de suscetibilidade média ocupam 38,16% da área total e concentram 7,41% dos eventos. Por sua vez, as classes de alta e muito alta suscetibilidade, embora representem apenas 19,47% da área de estudo, concentram 90,67% dos desastres ocorridos. Esses resultados indicam um bom desempenho da carta de suscetibilidade, uma vez que a maior parte dos eventos está associada às áreas classificadas como mais suscetíveis, apesar de sua menor extensão espacial.

Comentários finais

Os resultados obtidos evidenciam que o uso e a ocupação do solo constituem o principal fator condicionante da suscetibilidade a desastres hidrológicos, seguido por geologia, geomorfologia, declividade e elevação. A forte correlação entre a dinâmica da cobertura do solo e os registros históricos de desastres, expressa pelo elevado valor de AAC (0,919), reforça o papel determinante das intervenções antrópicas na modificação dos regimes hidrológicos locais. Nesse sentido, o uso e a ocupação do solo consolidam-se como elementos centrais no mapeamento da suscetibilidade e do risco, ao sintetizarem a interação entre processos naturais e pressões humanas, fornecendo subsídios essenciais para o planejamento territorial e a mitigação de desastres.

Adicionalmente, a adaptação do método do Valor Informativo para a análise de desastres de origem hidrológica mostrou-se satisfatória, com todos os modelos apresentando valores de AAC superiores a 0,9. Esses resultados indicam o elevado potencial da metodologia, ampliando sua aplicabilidade para além dos estudos tradicionalmente voltados a desastres de origem geológica.

De modo geral, a abordagem metodológica adotada demonstrou-se eficiente para a determinação da suscetibilidade ambiental na área de estudo. Contudo, ressalta-se que, para sua aplicação em outras regiões, pode ser necessária a adequação das classes dos fatores condicionantes de forma a melhor representar as especificidades locais e aprimorar a capacidade preditiva dos modelos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pela bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor.

Referências Bibliográficas

ANA (2025). As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Brasília - DF, 57p.

BEGUERÍA, S. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. **Natural Hazards**, v. 37, n. 3, p. 315–329, mar. 2006.

BRASIL (2020). Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE). Defesa Civil. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes /protecao-e-defesa-civil-sedec/DOCU_cobrade2.pdf

BRASIL (2019). **Manual técnico da defesa civil: para gestão de riscos e desastres relacionados a intensas precipitações pluviométricas**. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/boas-praticas/Manual2019finaltamanhomenor.pdf

CAMAPUM DE CARVALHO, J. Gestão de riscos e encostas: implicações geotécnicas da ocupação e uso do solo e sua relação com a educação ambiental, com as limitações das normas técnicas e com a falta de efetividade das normas administrativas e jurídicas. Em: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG).** Gramado: 2010

CAMPIOLI, P. F.; VIEIRA, C. V. Flood Risk Assessment in the Cubatão do Norte River Basin, Joinville/Santa Catarina – Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Fisica**, v. 12, n. 1, p. 124–138, 2019.

CASTRO, A. L. C. DE. **Glossário de Defesa Civil: Estudos de riscos e medicina de desastres**. Ministério do Planejamento e Orçamento Secretaria Especial de Políticas Regionais. Departamento de Defesa Civil. 1998.

ÇELIK, H. E.; COSKUN, G.; CIGIZOGLU, H. K.; AĞIRALIOĞLU, N.; AYDIN, A.; ESIN, A. I. The analysis of 2004 flood on Kozdere Stream in Istanbul. **Natural Hazards**, v. 63, n. 2, p. 461–477, 2012.

CEMADEN (2026). Estado do clima, extremos de clima e desastres no Brasil em 2025. Volume 2. São José dos Campos: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/estado-do-clima-extremos-de-clima-e-desastres-no-brasil/estado-do-clima-extremos-de-clima-e-desastres-no-brasil-02-2026/relatorioclimaextremosdesastresbrasil2025.pdf

CRED (2025). Disasters Year in Review 2024. Cred Crunch, n. 78. Disponível em: https://www.preventionweb.net/publication/cred-crunch-newsletter-issue-no-78-may-2025-disaster-year-review-2024

DAS, S.; PARDESHI, S. D. Morphometric analysis of Vaitarna and Ulhas river basins, Maharashtra, India: using geospatial techniques. **Applied Water Science**, v. 8, n. 6, p. 1–11, 2018.

DIAS, F. P.; LÚCIA, M.; HERRMANN, P. Susceptibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis - SC. **Caminhos de Geografia**, v. 6, p. 57–73, 2002.

GATICA HERRERA, M.; SALAMANCA, F. P.; RAMÁN, H. C.; VALENZUELA, L. D. El territorio fluvial como instrumento de prevención del riesgo de inundación en la rivera sur del Río Laja, en la Comuna de Laja. **Revista Latinoamericana de Estudiantes de Geografía**, n. 6, p. 64–73, 2019.

HADER, P. R. P. **Metodologia para avaliação de perigo de movimentos de massa considerando fatores socionaturais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021.

IPT, I. DE P. T. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. Volumes I e II**, 1981.

JADE, S.; SARKAR, S. Statistical models for slope instability classification **Engineering Geology**.v. 36, p.91-98, 1993.

KALANTAR, B.; UEDA, N.; SAEIDI, V; JANIZADEH, S.; SHABANI, F.; AHMADI, K.; SHABANI, F. Deep neural network utilizing remote sensing datasets for flood hazard susceptibility mapping in Brisbane, Australia. **Remote Sensing**, v. 13, n. 13, 2021.

KARYMBALIS, E.; ANDREOU, M.; BATZAKIS, D. V.; TSANAKAS, K.; KARALIS, S. Integration of GIS-Based Multicriteria Decision Analysis and Analytic Hierarchy Process for Flood-Hazard Assessment in the Megalo Rema River Catchment (East Attica, Greece). **Sustainability**, v13. n18. 2021.

KHOSRAVI, K.; NOHANI, E.; MAROUFINIA, E.; POUGHASEMI, H. R. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between Frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. **Natural Hazards**, v. 83, n. 2, p. 947–987, 2016.

MAGANHOTTO, R. F.; LOHMANN, M.; SOUZA, L. C. P.; SANTOS, L. J. C. Os índices de representação do relevo como suporte para

o zoneamento ambiental de unidades de conservação – Estudo de caso da Floresta Nacional de Irati. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 20, n. 3, p. 168, 29 dez. 2016.

MIRANDA, N. M. G.; CAPRARIA, J.; MARTINI, L. C. P.; FINORRI, A. Hierarchical analytical process (AHP) in spatial modeling of flood vulnerability in mixed environments **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 4, p. 172–181, 2019.

MOJADDADI, H.; PRADHAN, B.; NAMPAK, H.; AHMAD, N.; GHAZALI, A. H. B. Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1080–1102, 2017.

OLIVEIRA CHAVES, H. L.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S.; ALMEIDA, T.; CICERELLI, R. E. Mapeamento De Suscetibilidade À Inundação Utilizando O Método Da Razão De Frequência Aplicado À Bacia Do Riacho Fundo - Distrito Federal. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, n. 2018, p. 148–166, 2021.

OLII, M. R.; OLII, A.; PAKAYA, R. The integrated spatial assessment of the flood hazard using AHP-GIS: The case study of gorontalo regency. **Indonesian Journal of Geography**, v. 53, n. 1, p. 126–135, 2021.

OUMA, Y. O.; TATEISHI, R. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment. **Water (Switzerland)**, v. 6, n. 6, p. 1515–1545, 2014.

PASCOTO, T. V.; MACARI, R.; PEIXOTO, A. S. P. Análise da suscetibilidade a desastres de origem hidrológica para as regiões metropolitanas de São Paulo, Litoral Sul e Vale do Paraíba. In: **Congresso Internacional de Engenharia Ambiental**, 3º, 2024, Porto Alegre/RS. Anais [...], Espanha: IAHR Publishing, 2024.

PESSOA NETO, A. G.; SILVA, S. R. DA; BARBOSA, I. M. B. R. Mapeamento das áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica do rio Tejipió, em Pernambuco, Brasil. **Entorno Geográfico**, n. 26, p. e22413055, 2023.

RAMESH, V.; IQBAL, S. S. Urban flood susceptibility zonation mapping using evidential belief function, frequency ratio and fuzzy gamma operator models in GIS: a case study of Greater Mumbai, Maharashtra, India. **Geocarto International**, v. 0, n. 0, p. 1–26, 2020.

ROJAS, O.; MARDONES, M.; ARUMI, J. L.; AGUAYO, M. Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: Causas, recurrencia y efectos geográficos. **Revista de Geografia Norte Grande**, v. 192, n. 57, p. 177–192, 2014.

SANDES, M. DOS S. **Mapeamento de risco de movimentos de massa em corredores rodoviários: estudo de caso na BR-116 entre os municípios de Jacareí e Queluz (SP)**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia de Bauru, 2023.

SIEFERT, C. A. C. **Delimitação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem de processos e da relação solo-vegetação em ambientes hidromórficos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná (UFPR), Setor de Ciências da Terra, 2012.

SIRANGELO, F. R. **Relação entre a ocorrência de inundações e enxurradas e os índices morfométricos das sub-bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, 2014.

SUPPAWIMUT, W. GIS-Based Flood Susceptibility Mapping Using Statistical Index and Weighting Factor Models. **Environment and Natural Resources Journal**, v. 19, n. 6, p. 1–13, 2021.

UCHA, J. M.; HADLICH, G. M.; CELINO, J. J. Apicum: Transição entre solos de encostas e de manguezais. **Revista E.T.C. Educação, tecnologia e cultura.** , v. 5, p. 58–63, 2008.

YIN, K. L.; YAN, T. Z. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. **Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides**, p. 1269–1272, 1988.

ZZAMAN, R. U.; NOWREEN, S.; BILLAH, M. Flood hazard mapping of Sangu River basin in Bangladesh using multi-criteria analysis of hydro-geomorphological factors. **Journal od Flood Risk Management**, p. 19, 2021.

OCUPAÇÃO DE ENCOSTAS NA SERRA DO MAR: AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA E IMPLICAÇÕES AO PLANEJAMENTO TERRITORIAL

1 Brenno Augusto Marcondes Versolatto, 2 João Alexandre Paschoalin Filho
1 Universidade Nove de Julho (UNINOVE), e-mail: brennoversolatto@uni9.edu.br; 2 Universidade Nove de Julho, e-mail: jalexandre@uni9.pro.br

Palavras-chave: uso e ocupação do solo; vulnerabilidade ambiental; governança urbana.

Resumo

A Serra do Mar apresenta elevada suscetibilidade a processos de instabilização de encostas, decorrente do relevo escarpado, presença de solos residuais e coluvionares e regime pluviométrico intenso. Este estudo analisa a implantação de um empreendimento residencial de alto padrão localizado em São Sebastião/SP, por meio de estudo de caso com base em análise técnico-documental de projetos executivos, sondagens a percussão, levantamentos topográficos e memoriais de cálculo geotécnico. A caracterização do meio físico indicou a presença de colúvios superficiais de baixa resistência sobre solos residuais heterogêneos, associados a elevadas declividades e condições de elevada saturação hídrica. As análises de estabilidade, conduzidas por métodos de equilíbrio limite conforme a ABNT NBR 11682, indicaram redução significativa dos fatores de segurança em cenários de saturação, com aproximação à condição limite de estabilidade. As soluções adotadas mostraram-se tecnicamente adequadas, porém de caráter corretivo, evidenciando incompatibilidade entre a ocupação implantada e as condicionantes geológico-geotécnicas do terreno. Evidencia-se a necessidade de incorporar critérios geotécnicos e de gestão de riscos ao planejamento territorial e ao licenciamento ambiental.

Introdução

A Serra do Mar constitui uma das principais unidades geomorfológicas do território brasileiro, caracterizada por relevo acentuado, elevada pluviosidade e predominância de solos residuais e coluvionares, intrinsecamente suscetíveis a processos de instabilização. A literatura geotécnica estabelece que a combinação entre elevadas declividades, materiais de baixa coesão e regimes pluviométricos intensos favorece a ocorrência de deslizamentos em encostas tropicais (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; GERSCOVICH, 2016; DUNCAN; WRIGHT, 2005).

Estudos demonstram que, em ambientes tropicais úmidos, a variabilidade dos perfis de intemperismo e a heterogeneidade hidráulica dos solos exercem papel determinante no controle dos mecanismos de ruptura, tanto superficiais quanto profundos (SIDLE; OCHIAI, 2021; HUANG; FAN, 2022). Nesses contextos, a infiltração de água e o consequente aumento das pressões neutras constituem fatores críticos de redução da resistência ao cisalhamento, sendo intensificados por eventos pluviométricos extremos (ARTAXO et al., 2022; IPCC, 2023).

No litoral norte do estado de São Paulo, o município de São Sebastião apresenta recorrência de escorregamentos associados a eventos de precipitação intensa. A ocupação de encostas sem a devida consideração das condicionantes geotécnicas tende a aumentar a instabilidade dos taludes, especialmente em situações que envolvem supressão da cobertura vegetal e alterações no regime de drenagem (BOSCOV, 2008; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Intervenções antrópicas inadequadas, como cortes, aterros e processos de impermeabilização, modificam o comportamento hidrológico do maciço, favorecendo a elevação das pressões neutras e a redução da sucção matricial (ZHANG et al., 2021; WU et al., 2023). Adicionalmente, as mudanças climáticas têm contribuído para o aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos, ampliando a suscetibilidade à instabilização em regiões serranas (ARTAXO et al., 2022; IPCC, 2023; NOBRE et al., 2023).

Diversos autores destacam a necessidade de abordagens hidrogeotécnicas capazes de incorporar a variabilidade temporal das chuvas e os processos de infiltração no maciço na análise de áreas de risco (SIDLE; OCHIAI, 2021; HUANG; FAN, 2022; LI et al., 2023). Nesse sentido, a conformidade com parâmetros urbanísticos ou ambientais isolados mostra-se insuficiente para garantir a estabilidade das encostas, sendo imprescindível a incorporação de critérios geotécnicos desde as fases iniciais de planejamento.

Embora tradicionalmente associados a ocupações informais, os processos de instabilização também se manifestam em empreendimentos formalizados, incluindo aqueles de alto padrão implantados em áreas de encosta. A vulnerabilidade a desastres está diretamente relacionada à incompatibilidade entre o uso do solo e as características geotécnicas do terreno, independentemente do perfil socioeconômico (CHOWDHURY; FLOSS; BHANDARI, 2010; TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Estudos indicam que empreendimentos de alta renda têm sido implantados em áreas ambientalmente sensíveis, nas quais as condicionantes naturais impõem restrições significativas à estabilidade (SANTOS; MOREIRA, 2022; KLEIN; BERRETA, 2023; WANG et al., 2022). Nesse contexto, a ausência de integração entre planejamento territorial e engenharia geotécnica configura-se como fator crítico na geração e ampliação do risco.

A expansão de empreendimentos de alto padrão em áreas ambientalmente sensíveis evidencia limitações nos processos de planejamento e licenciamento ambiental. A pressão por desenvolvimento imobiliário pode comprometer a qualidade das análises técnicas e reduzir a efetividade dos instrumentos de controle territorial (SANTOS; MOREIRA, 2022; BACHI; RIBEIRO, 2023).

Em cenários de valorização imobiliária, observa-se a flexibilização de critérios técnicos, com consequente subavaliação dos riscos geotécnicos (LEÃO; CASTRILLON, 2024; MACÊDO et al., 2024), ampliando a exposição a eventos extremos.

O ordenamento territorial e a fiscalização constituem atribuições centrais do poder público; contudo, sua efetividade depende da integração entre planejamento, monitoramento e políticas ambientais, bem como da incorporação de ferramentas técnicas de avaliação de risco (TRAVASSOS, 2024; JÚNIOR; ANDRADE, 2024). Abordagens recentes ressaltam a importância de sistemas de monitoramento contínuo, modelagem preditiva e uso de geotecnologias na gestão de encostas em cenários de mudanças climáticas (UNDRR, 2022; IPCC, 2023). A ausência desses instrumentos limita a atuação preventiva, particularmente em empreendimentos previamente licenciados.

Diante desse contexto, identifica-se uma lacuna na literatura, caracterizada pela predominância de estudos voltados a assentamentos precários, em detrimento da análise de empreendimentos formalizados implantados em áreas de encosta. A regularidade urbanística e a disponibilidade de recursos não eliminam a suscetibilidade geotécnica do terreno. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as condicionantes geotécnicas e os mecanismos de instabilização associados à implantação de empreendimento residencial de alto padrão em São Sebastião/SP, discutindo suas implicações para o planejamento territorial e a gestão de riscos.

Material e método

O presente estudo foi desenvolvido por meio de abordagem de estudo de caso aplicada a um empreendimento residencial de alto padrão localizado na Praia do Camburi, no município de São Sebastião/SP, inserido em área de encosta associada à Serra do Mar, caracterizada por relevo acentuado, elevada pluviosidade e forte interação entre processos naturais e antrópicos. O empreendimento consiste em um conjunto residencial horizontal fechado, composto por unidades unifamiliares distribuídas em lotes com tipologias variadas, apresentando infraestrutura interna compatível com seu padrão, incluindo sistema viário, áreas comuns, equipamentos de lazer e controle de acesso. O entorno é caracterizado por ocupação predominantemente horizontal, baixa verticalização e presença de residências de médio a alto padrão, inseridas em área de elevada atratividade paisagística. A Figura 1 evidencia a ocupação em encosta com elevada declividade, condição diretamente associada à instabilidade observada



Figura 01: Vista geral da área de estudo, evidenciando a ocupação em encosta.
Fonte: Google Earth (2023)

A base de dados utilizada compreendeu a análise integrada de projetos executivos, memoriais de cálculo geotécnico, resultados de sondagens a percussão, levantamentos planialtimétricos, registros fotográficos, inspeções técnicas de campo, dados pluviométricos associados aos eventos extremos ocorridos no início de 2023 e normas técnicas brasileiras aplicáveis, com destaque para a ABNT NBR 11682:2009 e ABNT NBR 16920:2021, além de literatura técnica especializada. Esses dados subsidiaram a caracterização do meio físico e a análise das condições de estabilidade dos taludes, permitindo a compreensão dos mecanismos de instabilização e a avaliação das soluções adotadas.

A investigação geotécnica baseou-se na interpretação de sondagens a percussão distribuídas ao longo da área de estudo, possibilitando a identificação das unidades estratigráficas, das profundidades investigadas e da posição do nível d'água. As profundidades prospectadas variaram aproximadamente entre 0,50 m e 6,82 m, com ocorrência pontual de nível d'água em torno de 2,50 m em setores específicos da encosta. A análise dos dados permitiu a definição das condições geotécnicas locais e a identificação de materiais com comportamentos mecânicos distintos, fundamentais para a modelagem das análises de estabilidade. A Figura 3 apresenta o perfil geotécnico interpretado da encosta, evidenciando a presença de camada coluvionar superficial sobre solos de alteração de rocha, condição determinante para o desenvolvimento dos mecanismos de ruptura identificados.

O evento de instabilidade analisado corresponde a escorregamento ocorrido em encosta de elevada declividade, desencadeado por chuvas intensas registradas no início de 2023, que promoveram a saturação do maciço e a elevação das poropressões. O mecanismo predominante foi do tipo translacional superficial, associado à mobilização de solos coluvionares

ao longo de interfaces de contraste geotécnico, com evolução local para fluxo de detritos. O material mobilizado atingiu edificações situadas a jusante, ocasionando danos estruturais severos e caracterizando um evento típico de instabilidade em encostas urbanizadas sob condições críticas de saturação. As Figuras 2 e 3 ilustram o escorregamento ocorrido, evidenciando a exposição do material de base e os danos às estruturas existentes.



Figura 02: Vista superior da ruptura principal.
Fonte: Autor (2023).



Figura 03: Vista frontal da ruptura ocorrida.
Fonte: Autor (2023).

A metodologia adotada baseou-se na integração de dados de campo, investigações geotécnicas e análises numéricas, sendo estruturada de forma a permitir a caracterização do maciço, a definição dos parâmetros geotécnicos e a avaliação das condições de estabilidade em diferentes cenários. As análises foram conduzidas pela empresa Geoconceito Engenharia Consultiva Ltda., responsável pela interpretação dos dados, definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e desenvolvimento das modelagens geotécnicas.

As análises de estabilidade foram realizadas com base em métodos de equilíbrio limite, utilizando o método generalizado de Morgenstern-Price, conforme preconizado pela ABNT NBR 11682, com auxílio do software Slide 6.0. Foram consideradas superfícies potenciais de ruptura compatíveis com a geometria dos taludes e com as interfaces entre os materiais, sendo avaliados diferentes cenários representativos do comportamento do maciço, incluindo condições naturais e estados críticos associados à saturação, de modo a avaliar a influência da elevação das pressões neutras na redução da resistência ao cisalhamento e na diminuição dos fatores de segurança.

Adicionalmente, foram avaliadas as soluções de estabilização propostas para a área, incluindo a execução de sistema de solo grampeado, proteção superficial com geomantas e implantação de dispositivos de drenagem superficial e subsuperficial. A análise considerou a interação entre os elementos de reforço, as condições hidrogeológicas do maciço e os mecanismos de ruptura identificados, permitindo avaliar a eficiência das intervenções na melhoria das condições de estabilidade. A Figura 4 apresenta uma seção típica da solução adotada, evidenciando a disposição dos elementos de reforço e sua interação com o maciço. Conforme indicado na literatura técnica, a eficácia dessas soluções está diretamente relacionada à compatibilidade com a geometria do talude, à adequada interpretação dos mecanismos de instabilização e à capacidade de redução das pressões neutras no interior do maciço.

Resultados e Discussão

A análise integrada dos dados geotécnicos demonstra que a instabilidade dos taludes na área de estudo está diretamente associada à combinação entre elevada declividade, presença de materiais superficiais de baixa resistência, heterogeneidade dos solos de alteração de rocha e influência determinante das condições hidrológicas no comportamento do maciço. A camada coluvionar superficial configura-se como o principal elemento de fragilidade, apresentando baixa resistência ao cisalhamento e elevada sensibilidade à variação de umidade, favorecendo o desenvolvimento de superfícies de ruptura rasas, especialmente ao longo das interfaces com os solos residuais subjacentes.

A interpretação da estratigrafia das sondagens permitiu definir um perfil geotécnico típico constituído por camada coluvionar com espessura variando entre 1,5 m e 3,0 m, sobreposta a solos de alteração de rocha com maior resistência relativa e presença de topo rochoso em profundidades superiores a 5,0 m. Os parâmetros geotécnicos adotados, apresentados na Tabela 1, evidenciam o contraste mecânico entre os materiais, com destaque para os baixos valores de coesão e ângulo de atrito dos materiais coluvionares, que explicam a elevada suscetibilidade à ruptura sob condições de saturação.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade.

Material	Nspt (golpes/30cm)	Peso específico natural (kN/m^3)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
CO_{ag}	1 - 4	17	15	15
SM	3 - 8	18	5	28
SAR_{siar}	7 - 20	19	15	28
Topo Rochoso	> 50	30	200	45

Onde: CO – Colúvio; SM – Sedimento marinho; SAR – Solo de alteração de rocha; Ag – Argila; Ar – Areia; Si – Silte.

A Figura 4 apresenta a análise de estabilidade da seção crítica na condição pós-ruptura, evidenciando a geometria da superfície crítica e sua coincidência com a interface entre o colúvio e o solo residual. Os resultados indicam que, sob condição de saturação, o fator de segurança atinge valores próximos à unidade, sendo obtido FS = 1,24, inferior ao mínimo recomendado pela ABNT NBR 11682, caracterizando condição de instabilidade global do maciço. A superfície de ruptura apresenta geometria rasa e compatível com o mecanismo translacional observado em campo, sendo fortemente condicionada pela presença da camada coluvionar.

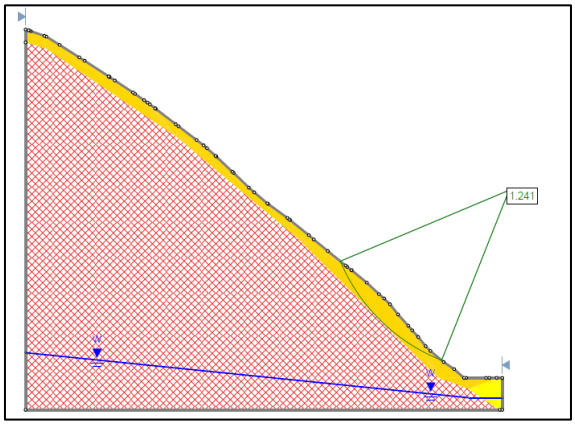


Figura 04: Análise de estabilidade justificativa da ruptura ocorrida.
Fonte: Autor (2023).

A redução do fator de segurança está diretamente associada à elevação das pressões neutras decorrente da infiltração de água, resultando na diminuição da resistência ao cisalhamento em função da perda de sucção matricial nos solos superficiais, conforme descrito pelo critério de Mohr-Coulomb. Esse comportamento explica a sensibilidade do maciço a eventos pluviométricos intensos e a rápida evolução dos processos de instabilização.

Com base nesse diagnóstico, foi proposta solução de estabilização composta por sistema de solo grampeado, associado à proteção superficial e à implantação de dispositivos de drenagem. A solução, ilustrada nas Figuras 5 e 6, apresenta os croquis de implantação e a seção típica, evidenciando sua adaptação à geometria da encosta. A solução foi dimensionada considerando a geometria do talude, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e os mecanismos de ruptura identificados, sendo constituída por barras de aço CA 50, com diâmetro nominal de 16 mm, espaçamento médio de 1,5 m x 1,5 m e comprimentos variando entre 4,0 m e 6,0 m.

O sistema atua por meio da mobilização de esforços de tração nos grampos, promovendo o aumento da resistência global do maciço e restringindo os deslocamentos, enquanto os dispositivos de drenagem contribuem para a redução das pressões neutras.

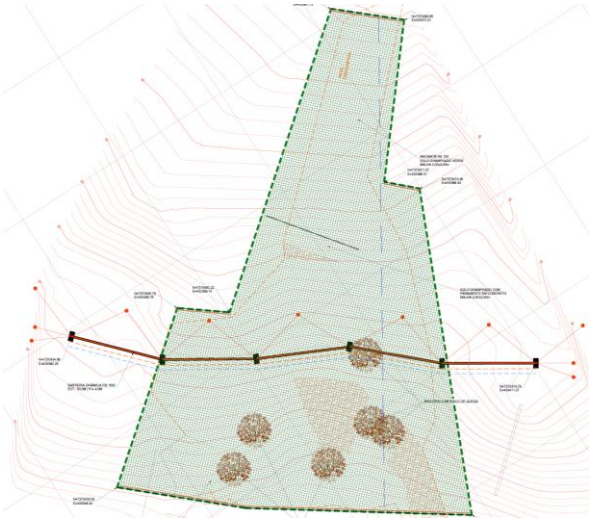


Figura 05: Croqui de implantação da solução utilizada.
Fonte: Autor (2023).

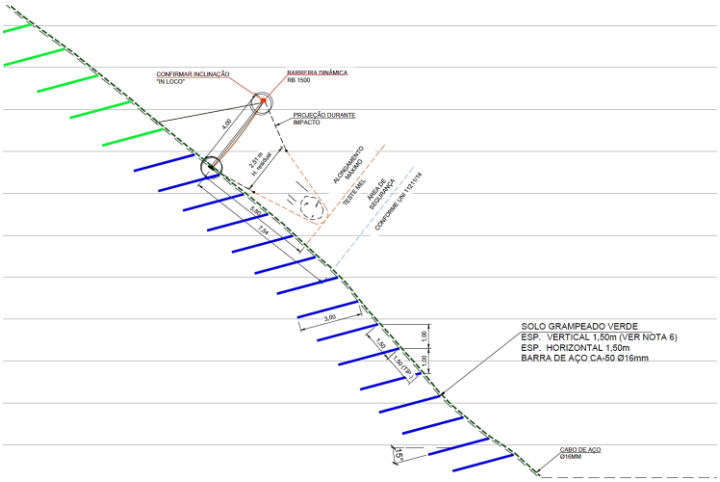


Figura 06: Seção transversal da solução utilizada.
Fonte: Autor (2023).

A Figura 7 apresenta os resultados da análise de estabilidade após a implantação da solução, indicando elevação do fator de segurança para aproximadamente FS = 1,43, valor compatível com os critérios normativos. O incremento observado decorre da atuação conjunta do reforço estrutural e da melhoria das condições de drenagem, resultando na redução das poropressões e no aumento da resistência mobilizada ao longo das superfícies potenciais de ruptura.

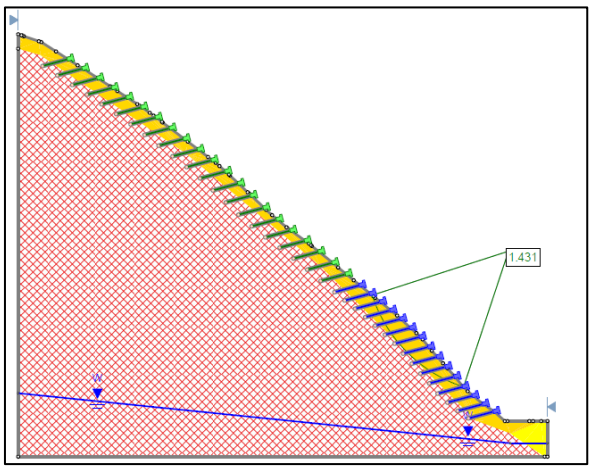


Figura 07: Análise de estabilidade da solução implantada.
Fonte: Autor (2023).

Os resultados evidenciam que a estabilidade do maciço é controlada pela interação entre geometria, propriedades mecânicas dos materiais e condições hidrológicas. A presença de camadas superficiais pouco resistentes e de interfaces geotécnicas bem definidas condiciona a ocorrência de escorregamentos rasos, com potencial de evolução para processos mais complexos sob condições críticas de saturação.

Os eventos pluviométricos extremos registrados em 2023 desempenharam papel determinante na deflagração dos escorregamentos, promovendo a saturação do maciço e o aumento das poropressões, comportamento amplamente descrito na literatura clássica e contemporânea. Esse cenário é agravado no contexto de mudanças climáticas, que têm ampliado a frequência e a intensidade desses eventos, aumentando a vulnerabilidade de encostas ocupadas.

A análise das soluções adotadas demonstra que sua eficácia está diretamente relacionada à adequada interpretação dos mecanismos de ruptura e à compatibilidade com as características geotécnicas do terreno. A combinação entre solo grampeado, proteção superficial e drenagem mostrou-se tecnicamente eficiente, corroborando abordagens consolidadas na engenharia geotécnica que destacam a necessidade de atuação integrada entre reforço estrutural e controle hidráulico.

Entretanto, destaca-se que a solução adotada apresenta caráter predominantemente corretivo, tendo sido implementada após a ocorrência do evento de instabilidade. Esse aspecto evidencia a insuficiente consideração das condicionantes geotécnicas nas fases iniciais de planejamento do empreendimento, resultando na necessidade de intervenções posteriores mais complexas e onerosas. Nesse sentido, os resultados reforçam a importância da incorporação de análises geotécnicas detalhadas desde as etapas preliminares de projeto, bem como da consideração de cenários críticos de saturação no dimensionamento de obras em encostas.

Por fim, ressalta-se que as análises de estabilidade envolvem incertezas inerentes à variabilidade dos materiais e às limitações das investigações geotécnicas. O fator de segurança deve, portanto, ser interpretado como uma estimativa do comportamento do sistema, sendo recomendada a adoção de abordagens complementares, como análises probabilísticas e monitoramento contínuo. Os resultados obtidos demonstram que a instabilidade observada decorre diretamente da incompatibilidade entre a ocupação implantada e as características geotécnicas do terreno, não se tratando de evento excepcional, mas de comportamento esperado sob condições críticas de saturação.

Considerações Finais

Os resultados demonstram que a ocupação de encostas na Serra do Mar por empreendimentos de alta renda pode gerar condições significativas de instabilidade geotécnica e vulnerabilidade ambiental, contrapondo a percepção de que tais problemáticas estariam restritas a contextos socioeconômicos desfavoráveis. A exposição ao risco está diretamente associada à incompatibilidade entre o uso do solo e as condicionantes geológico-geotécnicas do terreno, independentemente do perfil econômico dos ocupantes.

A análise do caso em São Sebastião/SP indica que a ausência de compreensão adequada das características do maciço, associada a fragilidades nos processos de licenciamento e à eventual flexibilização de critérios técnicos, pode resultar na implantação de empreendimentos em áreas intrinsecamente instáveis. Nessas condições, a suscetibilidade a escorregamentos aumenta significativamente, sobretudo sob eventos pluviométricos intensos, evidenciando a necessidade de incorporação sistemática da análise geotécnica no planejamento territorial.

Verifica-se que a estabilidade dos taludes é fortemente condicionada pela presença de solos coluvionares superficiais de baixa resistência, materiais residuais heterogêneos, elevadas declividades e regime pluviométrico intenso. A não consideração adequada desses fatores nas etapas de planejamento e implantação conduz à necessidade de intervenções corretivas complexas, incluindo estruturas de contenção, sistemas de drenagem e reforço do maciço.

As soluções de estabilização adotadas são tecnicamente consistentes, porém apresentam caráter predominantemente corretivo. Sua implementação após a ocorrência de instabilidades evidencia uma abordagem reativa, reforçando a necessidade de integração da engenharia geotécnica às fases iniciais de concepção dos empreendimentos, de modo a orientar decisões relativas à implantação, movimentação de terra, drenagem e preservação da cobertura vegetal.

Do ponto de vista institucional, os resultados indicam que a vulnerabilidade em encostas decorre da insuficiente integração entre conhecimento geotécnico, planejamento territorial e instrumentos de governança. Empreendimentos formalmente regularizados podem apresentar níveis elevados de vulnerabilidade quando não há adequada compatibilização entre o projeto e as características do terreno. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de fortalecimento dos instrumentos de ordenamento territorial, licenciamento ambiental e fiscalização, com incorporação de análises geotécnicas como elemento estruturante dos processos decisórios.

Adicionalmente, observa-se que intervenções corretivas, embora tecnicamente viáveis, implicam maior complexidade e custos elevados, reforçando a superioridade de abordagens preventivas sob os pontos de vista econômico, ambiental e social. A atuação da engenharia deve, portanto, priorizar a antecipação dos problemas por meio da adequada caracterização do meio físico e da compatibilização entre projeto e terreno.

Como limitação, destaca-se que o estudo foi desenvolvido com base na análise de um único empreendimento, o que restringe a generalização dos resultados. Ainda assim, o caso contribui para ampliar a discussão sobre vulnerabilidade em áreas de alta renda e indica a necessidade de estudos comparativos em outros empreendimentos implantados em serras costeiras tropicais, com incorporação de abordagens quantitativas e probabilísticas.

Conclui-se que a gestão de instabilidades em encostas deve ser conduzida de forma integrada, envolvendo investigação geotécnica, planejamento territorial, licenciamento ambiental, fiscalização e monitoramento contínuo. Essa abordagem é essencial para reduzir a ocorrência de desastres, garantir a segurança das ocupações e preservar os ecossistemas associados à

Serra do Mar. Os resultados corroboram princípios fundamentais da engenharia geotécnica, segundo os quais a estabilidade de taludes depende da adequada compatibilização entre características do terreno, condições de carregamento e intervenções antrópicas (GERSCOVICH, 2016; TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Geoconceito Engenharia Consultiva Ltda. pela disponibilização das informações técnicas relativas ao estudo de caso, bem como pelo fornecimento de dados sensíveis que subsidiaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, L. F. et al. Análise de risco geotécnico em áreas urbanas de encosta. Revista Brasileira de Geotecnia, São Paulo, v. 46, n. 2, p. 85-102, 2023.

ARTAXO, P. et al. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

BACHI, L.; RIBEIRO, M. Planejamento urbano e vulnerabilidade ambiental em áreas costeiras. Revista de Gestão Urbana, Curitiba, v. 15, n. 1, p. 55-72, 2023.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARNEIRO, R. M. Ocupação urbana e riscos geotécnicos em áreas de encosta. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

CHOWDHURY, R.; FLOSS, R.; BHANDARI, R. Slope stability analysis and stabilization: new methods and insight. Hoboken: Wiley, 2010.

CODUTO, D. P.; KITCH, W. A.; YEUNG, M.-C. R. Foundation design: principles and practices. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2011.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. Soil strength and slope stability. Hoboken: Wiley, 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Soil nail walls reference manual. Washington, DC: FHWA, 2015.

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The landslide handbook: a guide to understanding landslides. Reston: U.S. Geological Survey, 2008.

HUANG, R.; FAN, X. The role of hydrology in landslide initiation: recent advances and perspectives. Earth-Science Reviews, Amsterdam, v. 226, p. 103942, 2022.

HUNT, R. E. Geotechnical engineering investigation handbook. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2023: synthesis report. Geneva: IPCC, 2023.

JÚNIOR, A. P.; ANDRADE, T. Governança urbana e gestão de riscos ambientais no Brasil. Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 58, n. 1, p. 120-138, 2024.

KLEIN, A.; BERRETA, J. Riscos ambientais e planejamento urbano em áreas sensíveis. Revista Ambiente & Sociedade, Campinas, v. 26, e01234, 2023.

LEÃO, M.; CASTRILLON, P. Expansão urbana e conflitos socioambientais em áreas de risco. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, São Paulo, v. 26, e20240015, 2024.

LEROUEIL, S.; HIGHT, D.; BURLAND, J. Behaviour and mechanics of soils. London: ICE Publishing, 2012.

LI, X. et al. Hydro-mechanical coupling effects on slope stability under extreme rainfall. Engineering Geology, Amsterdam, v. 317, p. 106998, 2023.

MACÊDO, J. P. et al. Planejamento territorial e vulnerabilidade a desastres naturais. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 76, n. 1, p. 45-63, 2024.

NOBRE, C. A. et al. Mudanças climáticas e riscos ambientais no Brasil: desafios contemporâneos. Estudos Avançados, São Paulo, v. 37, n. 108, p. 45-62, 2023.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, R.; MOREIRA, F. Ocupação de áreas de risco e planejamento urbano no Brasil. Revista Cidades, Presidente Prudente, v. 19, n. 2, p. 210-230, 2022.

SIDLE, R. C.; OCHIAI, H. Landslides: processes, prediction, and land use. 2. ed. Washington: American Geophysical Union, 2021.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. 3. ed. New York: Wiley, 1996.

TRAVASSOS, L. Gestão de riscos e políticas públicas urbanas no Brasil. São Paulo: Annablume, 2024.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR). Global assessment report on disaster risk reduction 2022. Geneva: UNDRR, 2022.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Engineering and design: slope stability. Washington, DC, 2003.

WANG, F. et al. Landslide risk assessment in rapidly urbanizing mountainous regions. Natural Hazards, Dordrecht, v. 112, p. 1235-1256, 2022.

WESLEY, L. D. Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils. Hoboken: Wiley, 2010.

WU, Y. et al. Rainfall infiltration and slope failure mechanisms in tropical regions. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 620, p. 129456, 2023.

ZHANG, L. et al. Effects of land use change on slope stability in humid regions. Catena, Amsterdam, v. 203, p. 105302, 2021.

ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CHEIAS CALIBRADOS A PARTIR DE DIFERENTES ABORDAGENS: O CASO DO RIO HERCÍLIO EM IBIRAMA/SC

1 Ana Carla da Silva, 2 Bárbara Rafaela Mohr, 3 João Marcos Bosi Mendonça de Moura
1 Universidade do Estado de Santa Catarina, e-mail: ana.silva2026@edu.udesc.br; 2 Universidade do Estado de Santa Catarina, e-mail: barbara.mohr@edu.udesc.br; 3 Universidade do Estado de Santa Catarina, e-mail:joao.moura@udesc.br.

Palavras-chave: previsão de cheias; hidrograma; modelagem.

Resumo

Este artigo compara o desempenho de modelos empíricos de previsão de cheias para o rio Hercílio, localizado no município de Ibirama, Santa Catarina, calibrados a partir de duas abordagens: (1) utilização do hidrograma completo (trechos de ascensão e recessão) de eventos de cheia pretéritos; e (2) utilização apenas do trecho de ascensão desses mesmos eventos extremos, todos ocorridos em 2023. Foram desenvolvidos modelos com horizontes de previsão de 2, 3 e 4 horas, os quais, posteriormente, foram validados com base em dados de outros eventos extremos registrados em 2023. Os dados de precipitação e nível d'água foram obtidos em estações hidrometeorológicas da Secretaria de Estado da Proteção e Defesa Civil de Santa Catarina. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio do coeficiente de determinação (R^2). Os resultados indicaram uma leve superioridade dos modelos calibrados com o hidrograma completo, os quais apresentaram valores de R^2 sempre superiores aos modelos calibrados apenas com a ascensão do hidrograma. Ainda assim, ambas as abordagens proporcionaram a concepção de modelos com valores de R^2 superiores a 0,874, evidenciando bom desempenho. Dessa forma, os modelos desenvolvidos mostram-se potencialmente aplicáveis à gestão de risco de desastres no município, contribuindo para o fortalecimento do sistema de alerta local e para a redução de impactos negativos das cheias sobre a sociedade.

Introdução

A previsão de cheias em tempo real constitui uma componente importante para que os sistemas de alerta possam apoiar ações de preparação frente aos riscos de desastres (Medeiros *et al.*, 2025). Nesse contexto, o monitoramento, a previsão, a comunicação e a resposta precisam atuar de forma integrada para que a informação técnica resulte em ação antecipada efetiva (World Metereological Organization, 2025). Na modelagem hidrológica, a busca por métodos rápidos e compreensíveis permanece estratégica para aplicações em tempo real, principalmente em escalas locais e com restrição de coleta e processamento de dados (Zhao *et al.*, 2024).

De acordo com Medeiros et al. (2025), modelos relativamente simples, desde que confiáveis e atualizados em tempo real, podem ter elevado valor operacional. Em eventos críticos, previsões emergenciais de nível de rio já foram empregadas como suporte direto à interpretação de cenários e à comunicação do risco, enquanto estruturas simplificadas de alerta têm demonstrado utilidade em pequenos cursos d'água quando associadas a limiares verificáveis e atualização contínua (Cheong *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a escolha da estratégia de calibração interfere diretamente no desempenho e na robustez de um modelo hidrológico, uma vez que a métrica e o procedimento adotados na calibração podem alterar a qualidade de previsão (Araya *et al.*, 2023; Astagneau *et al.*, 2024). Em aplicações de previsão de nível de rio, comparações entre modelos físicos e orientados por dados reforçam que o desempenho deve ser analisado com base em indicadores que permitam avaliar, de forma objetiva, o quanto a série simulada acompanha a série observada ao longo do evento (Frisk; Johansson, 2024).

Diversos são os modelos que podem ser utilizados como base na previsão de cheias, conforme demonstram Zhao *et al.* (2024). Diante disso, o coeficiente de determinação - R^2 é um parâmetro utilizado em estudos de previsão de cheias, especialmente quando o objetivo é avaliar e comparar o desempenho de diferentes modelos (Zhang et al., 2025). A comparação de diferentes modelos, concebidos a partir de diferentes premissas ou abordagens, é importante para a escolha de estratégicas técnicas que ofereçam melhores condições para a tomada de decisão de gestores públicos em eventos críticos (Xu et al., 2024).

Apesar de avanços no que se refere à previsão de cheias, ainda existe uma lacuna importante na previsão precisa de eventos de extremos necessária para a mitigação e gestão de riscos em locais com escassez de dados (Okacha et al., 2024). Desta forma, é importante também, comparar modelos de previsão de cheias em casos em que não se há dados completos referentes a nível de curso d'água ou chuva, testando sua acuracidade frente a situações extremas e que exijam decisões rápidas.

Deste modo, a restrição do uso do trecho de ascensão do hidrograma na etapa de calibração pode ser adequada em situações de ajuste e concepção de modelos durante eventos de cheia, ou ainda quando há lacunas de dados no trecho de recessão do hidrograma, comum em pequenas bacias hidrográficas (Okacha *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a comparação proposta neste estudo se justifica sob o ponto de vista científico, ao permitir a avaliação da robustez metodológica diante de diferentes condições de disponibilidade e qualidade dos dados, para uma mesma bacia. Diante do apresentado, o presente estudo compara modelos empíricos de regressão linear múltipla para previsão de nível do rio Hercílio, localizado no município de Ibirama, em Santa Catarina, nos quais foram concebidos a partir de duas abordagens diferentes na etapa de calibração. A primeira abordagem considerou o uso do hidrograma completo (ascensão e recessão) dos

eventos de cheia pretéritos e, o segundo, com o uso apenas da ascensão do hidrograma desses mesmos eventos extremos pretéritos, todos ocorridos no ano de 2023.

Materiais e métodos

O presente artigo foi estruturado a partir da análise de dados numéricos hidrometeorológicos, buscando identificar relações entre variáveis e desenvolver modelos de previsão do nível do rio Hercílio para o município de Ibirama/SC. A área de estudo corresponde ao município de Ibirama, localizado no Alto Vale do Itajaí, em Santa Catarina. O município é cortado pelo rio Hercílio, também conhecido também como Rio Itajaí do Norte, afluente do rio Itajaí-Açu, conhecida como uma bacia hidrográfica com histórico de eventos hidrológicos extremos (Mohr, 2025). Para este artigo, foi considerado como objeto de estudo o episódio de chuvas intensas de 2023, em que houve uma rápida elevação do nível do rio e evidenciou a necessidade de modelos preditivos acessíveis às autoridades locais.

Para a confecção dos modelos empíricos (regressão linear múltipla), foram utilizados dados hidrometeorológicos provenientes da Defesa Civil de Santa Catarina. Os dados foram consistidos e as falhas preenchidas por técnicas estatísticas. As estações consideradas no estudo localizam-se nos municípios de José Boiteux e Ibirama. As estações da Defesa Civil foram utilizadas principalmente por apresentarem maior frequência de atualização e telemetria dos dados, características consideradas mais adequadas para aplicações de modelos em tempo real (Tabela 01).

Estação	Município	Finalidade
DCSC-00020	Ibirama/SC	Medir nível de rio (Ib)
DCSC-00021	José Boiteux/SC	Medir nível de rio (Jb)

Tabela 01: Estações hidrometeorológicas consideradas para o estudo.
Fonte: Autores (2026).

Para desenvolvimento dos modelos de previsão de cheias, foram selecionados cinco eventos de cheia registrados entre os dias 03 de outubro e 06 de novembro de 2023, período marcado por episódios sucessivos de precipitação e resposta hidrológica bem caracterizada com continuidade nas medições e representatividade dos diferentes padrões de chuva que influenciaram o comportamento do rio em Ibirama (Tabela 02). Os eventos foram enumerados por ordem cronológica e utilizados para calibração e validação dos modelos: os Eventos 1 e 3 foram utilizados para calibração, enquanto os Eventos 2, 4 e 5 foram utilizados para validação.

Evento	Período	Aplicação
1	03-10-2023 a 06-10-2023	Calibração
2	06-10-2023 a 11-10-2023	Validação
3	11-10-2023 a 15-10-2023	Calibração
4	27-10-2023 a 01-11-2023	Validação
5	01-11-2023 a 06-11-2023	Validação

Tabela 02: Período das cheias utilizadas para a calibração e validação dos modelos.
Fonte: Autores (2026).

A etapa de calibração teve como finalidade ajustar os modelos de regressão linear múltipla com base nos eventos considerados adequados para representar o comportamento do nível do rio. Os Eventos 1 e 3 foram escolhidos por apresentarem registros consistentes e resposta hidrológica bem definida frente às variações de precipitação. Essa etapa permitiu estimar os coeficientes das variáveis explicativas utilizadas nos modelos.

A validação foi realizada com os Eventos 2, 4 e 5. Nessa etapa, os coeficientes obtidos anteriormente foram aplicados diretamente aos eventos de validação, comparando-se os níveis previstos com os níveis observados. Essa comparação teve como finalidade verificar a aderência dos modelos à realidade, identificar desvios e avaliar se a estrutura calibrada era capaz de representar novos cenários hidrológicos.

A previsão do nível do rio foi realizada por meio de regressão linear múltipla. Os modelos foram estruturados para prever o nível do rio em tempo real com antecedência de duas (t+2), três (t+3) e quatro horas de antecedência (t+4). As variáveis consideradas incluíram o nível atual do Rio Hercílio em Ibirama, diferenças entre níveis anteriores em Ibirama e diferenças defasadas do nível em José Boiteux (município a montante), conforme a estrutura de cada grupo. Os modelos foram calibrados a partir de duas abordagens: (1) utilização do hidrograma completo (trechos de ascensão e recessão) dos eventos 1 e 3; e (2) utilização apenas do trecho de ascensão desses mesmos eventos 1 e 3. A eficiência dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação R^2.

Para comparação da eficiência dos modelos, os valores de R^2 foram organizados por modelo, por evento de validação e por estratégia de construção do modelo, com cálculo de médias simples por horizonte de previsão e da diferença absoluta entre as duas estratégias de calibração. A interpretação foi conduzida de modo comparativa e aplicada, buscando identificar em que medida a simplificação da modelagem afeta a confiabilidade do ajuste e em quais horizontes essa perda permanece compatível com usos operacionais de apoio ao alerta de órgãos como a Defesa Civil.

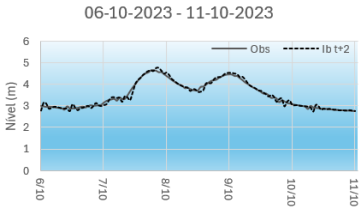
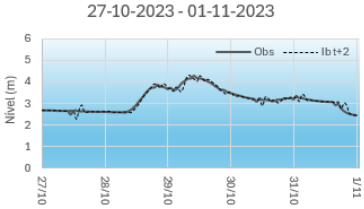
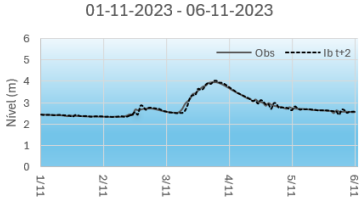
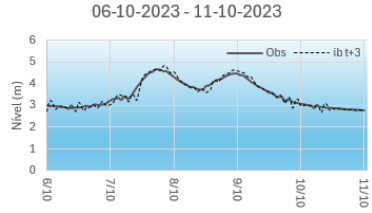
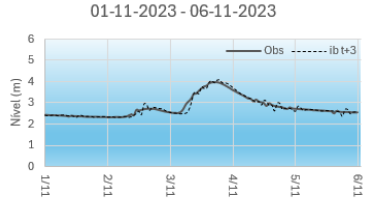
Resultados e discussões

A Tabela 03 apresenta os modelos de previsão de nível do Rio Hercílio em Ibirama/SC, obtidos por regressão linear múltipla, considerando a estratégia de calibração com o hidrograma completo e a estratégia de calibração apenas com os dados de ascensão do hidrograma.

Modelos	Calibração com hidrograma completo	Calibração com dados de ascensão do hidrograma
1.1	$Ib_{t+2} = Ib_t + b \times (Ib_t - Ib_{t-2}) + c \times (Jb_{t-3} - Jb_{t-5})$ a) 0,999803465 b) 0,907358088 c) -0,11933372	$Ib_{t+2} = Ib_t + 1{,}290 \times (Ib_t - Ib_{t-2}) - 0{,}410 \times (Jb_{t-3} - Jb_{t-5})$ a) 1,002107192 b) 1,290842631 c) -0,410347415
1.2	$Ib_{t+3} = Ib_t + b \times (Ib_t - Ib_{t-2}) + c \times (Jb_{t-3} - Jb_{t-5})$ a) 1,000242535 b) 1,429242052 c) -0,305942556	$Ib_{t+3} = Ib_t + 1{,}924 \times (Ib_t - Ib_{t-2}) - 0{,}628 \times (Jb_{t-3} - Jb_{t-5})$ a) 0,994648215 b) 1,929112224 c) -0,628943977
1.3	$Ib_{t+4} = Ib_t + b \times (Ib_t - Ib_{t-2}) + c \times (Jb_{t-3} - Jb_{t-5})$ a) 1,000673675 b) 1,926003785 c) -0,521383013	$Ib_{t+4} = Ib_t + 2{,}525 \times (Ib_t - Ib_{t-2}) - 0{,}869 \times (Jb_{t-3} - Jb_{t-5})$ a) 0,984062346 b) 2,525614418 c) -0,869988913

Tabela 03: Estrutura dos modelos de previsão de nível do rio em Ibirama/SC calibrados com o hidrograma completo e com dados de ascensão do hidrograma. Nota: Ib_t = nível do rio em Ibirama no tempo presente; Ib_{t+2} = nível do rio previsto para Ibirama com duas horas de antecedência; Ib_{t+3} = nível do rio previsto para Ibirama com 3 horas de antecedência; Ib_{t+4} = nível do rio previsto para Ibirama com 4 horas de antecedência; Jb_{t-3} = nível do rio em José Boiteux há 3 horas; Jb_{t-5} = nível do rio em José Boiteux há 5 horas.
Fonte: Autores (2026)

A Figura 01 apresenta a comparação entre os níveis de cheia observados e modelos a partir da estratégia de calibração considerando o hidrograma completo, possibilitando observar a aderência entre os valores estimados e observados ao longo dos horizontes t+2, t+3 e t+4.

Modelo	Evento 2	Evento 4	Evento 5
Modelo 1.1 (t+2)	 $R^2 = 0{,}977$	 $R^2 = 0{,}970$	 $R^2 = 0{,}979$
Modelo 1.2 (t+3)	 $R^2 = 0{,}958$	 $R^2 = 0{,}940$	 $R^2 = 0{,}957$

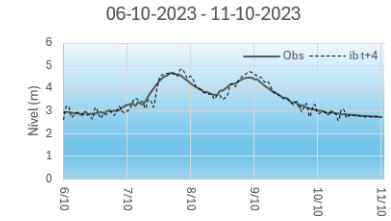
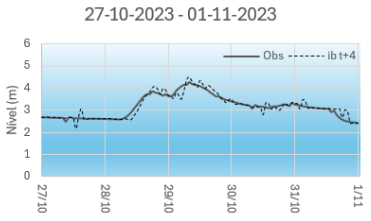
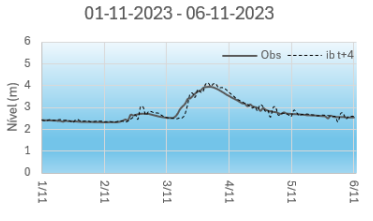
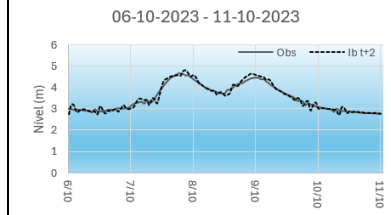
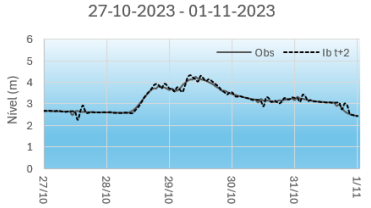
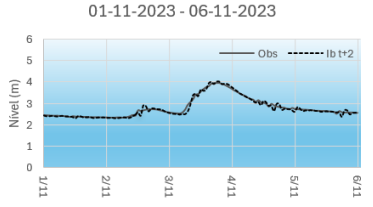
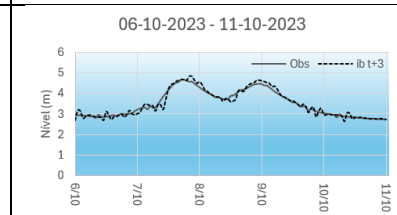
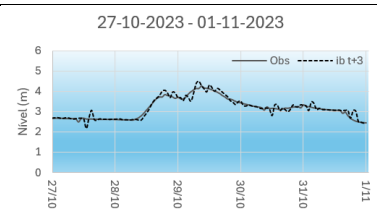
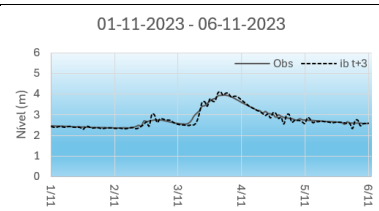
Modelo 1.3 (t+4)	 R² = 0,926	 R² = 0,899	 R² = 0,923

Figura 01: Validação dos modelos calibrados com o hidrograma completo de cheia.
Fonte: Autores (2026).

Os resultados da Figura 01 mostram modelos calibrados com hidrograma completo apresentaram valores de R² elevado em todos os modelos e em todos os eventos de validação. Esse comportamento indica que a incorporação do hidrograma completo proporciona boa aderência e acuracidade ao comportamento do curso hídrico ao longo do tempo. Os resultados indicam que os modelos com 2 e 3 horas de antecedência apresentam potencial para incorporação ao sistema de alerta municipal. Embora o horizonte de previsão seja relativamente curto, esses modelos ainda se mostram úteis para apoiar a preparação da população diante de eventos de cheia. O modelo com 4 horas de antecedência demonstrou desempenho inferior; entretanto, as diferenças nos níveis previstos são pouco significativas para a operação do sistema de alerta do município de Ibirama/SC. Nesse contexto, torna-se fundamental explicitar aos tomadores de decisão e à população as incertezas e limitações inerentes a essas previsões, de modo a fortalecer a percepção e risco da população.

A Figura 02 apresenta a comparação entre os níveis de cheia observados e modelos a partir da estratégia de calibração considerando apenas a ascessão do hidrograma dos eventos extremos, possibilitando observar a aderência entre os valores estimados e observados ao longo dos horizontes t+2, t+3 e t+4.

Modelo	**Evento 2**	**Evento 4**	**Evento 5**
Modelo 1.1 (t+2)	 R² = 0,968	 R² = 0,957	 R²= 0,973
Modelo 1.2 (t+3)	 R² = 0,943	 R² = 0,921	 R² = 0,947

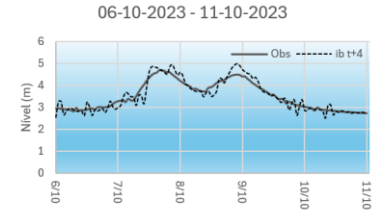
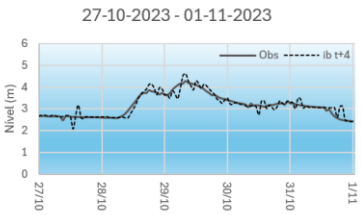
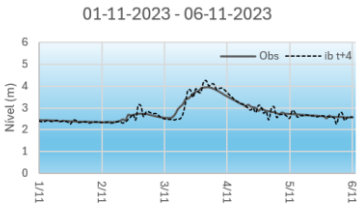
Modelo 1.3 (t+4)	 $R^2 = 0,938$	 $R^2 = 0,874$	 $R^2 = 0,910$

Figura 02: Validação dos modelos calibrados com apenas a ascensão do hidrograma de cheia.
Fonte: Autores (2026).

Observa-se que os modelos calibrados com hidrograma restrito à ascensão apresentaram valores elevados de R^2 em todos os modelos e eventos de validação (Figura 02). De forma semelhante ao observado nos modelos anteriores (Figura 01), os resultados indicam que as previsões com 2 e 3 horas de antecedência possuem potencial para aplicação no sistema de alerta municipal. Entretanto, diferentemente do modelo calibrado com hidrograma completo, a previsão de nível com 4 horas de antecedência apresentou desempenho insatisfatório, com diferenças significativas entre os valores observados e simulados. Nesse contexto, seu uso tende a ser mais limitado, uma vez que discrepâncias expressivas podem comprometer a confiabilidade do sistema junto à população e aos tomadores de decisão.

Considerações Finais

Os modelos desenvolvidos neste estudo apresentaram robustez e boa aderência na previsão de cheias para o município de Ibirama/SC, especialmente nos horizontes de t+2, t+3 e t+4. De modo geral, os modelos calibrados com dados de hidrograma completo alcançaram valores mais elevados de R^2 quando comparados àqueles calibrados apenas com a fase de ascensão do hidrograma.

Entretanto, não foram observadas diferenças significativas na aplicação das estratégias de calibração propostas, com exceção dos modelos com antecedência de 4 horas, nos quais o desempenho foi inferior quando utilizada apenas a fase de ascensão. Nesse contexto, conclui-se que, para a área de estudo, a ausência de dados referentes à fase de recessão do hidrograma — e, consequentemente, a calibração baseada apenas na ascensão — não compromete de forma relevante o desempenho dos modelos para previsões com 2 e 3 horas de antecedência.

Destaca-se, nesse contexto, a relevância prática dos modelos com 2 e 3 horas de antecedência para a Defesa Civil, gestores públicos e a sociedade do município de Ibirama/SC. Mesmo com horizonte de previsão relativamente curto, esses modelos fornecem informações fundamentais para a emissão de alertas, mobilização de equipes, adoção de medidas preventivas e redução de riscos e danos associados a eventos de cheia. Além disso, contribuem para o aumento da capacidade de resposta institucional e para o fortalecimento da cultura de prevenção junto à população.

Como desdobramento desta pesquisa, recomenda-se a realização de estudos que incluam a avaliação de diferentes abordagens de modelagem, incluindo técnicas de aprendizado de máquina e modelos híbridos, bem como a integração de variáveis hidrometeorológicas adicionais, como precipitação em tempo real, umidade do solo e previsões meteorológicas. Outra frente relevante consiste na aplicação e validação dos modelos em outras bacias hidrográficas com características distintas, permitindo verificar sua transferibilidade. Por fim, destaca-se a importância de estudos voltados à comunicação do risco e à integração dos modelos com sistemas operacionais de alerta, visando aprimorar a tomada de decisão por parte da Defesa Civil e aumentar a efetividade das ações junto à população.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), do Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e da Secretaria de Estado da Proteção e Defesa Civil de Santa Catarina. Agradecemos também o apoio financeiro do Governo do Estado de Santa Catarina realizado via Função da Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) por meio da concessão de bolsa à primeira autora.

Referências Bibliográficas

ARAYA, Diego; MENDOZA, Pablo A.; MUÑOZ-CASTRO, Esteban; MCPHEE, James. Towards robust seasonal streamflow forecasts in mountainous catchments: impact of calibration metric selection in hydrological modeling. Hydrology and Earth System Sciences, v. 27, p. 4385-4408, 2023. DOI: 10.5194/hess-27-4385-2023. Disponível em:

https://hess.copernicus.org/articles/27/4385/2023.
Acesso em: 20 abr. 2026.

ASTAGNEAU, Paul C.; BOURGIN, François; ANDRÉASSIAN, Vazken; PERRIN, Charles. Lead-time-dependent calibration of a flood forecasting model. Journal of Hydrology, v. 644, art. 132119, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132119.

CHEONG, Tae-Sung; KIM, Seojun; KOO, Kang-Min. Development of flood early warning framework to predict flood depths in unmeasured cross-sections of small streams in Korea. Water, v. 17, n. 10, art. 1467, 2025. DOI: 10.3390/w17101467. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/17/10/1467
Acesso em: 20 abr. 2026.

FRISK, Fredrik; JOHANSSON, Ola. Comparative evaluation of water level forecasting using IoT sensor data: hydrodynamic model SWMM vs. machine learning models based on NARX framework. Water, v. 16, n. 19, art. 2776, 2024. DOI: 10.3390/w16192776. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/16/19/2776
Acesso em: 20 abr. 2026.

MEDEIROS, Matheus Sampaio; FAN, Fernando Mainardi; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de. Emergency forecasts for water levels in the Guaíba River during the 2024 unprecedented flood in South Brazil. RBRH, v. 30, 2025. DOI: 10.1590/2318-0331.302520250025. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbrh/a/74F5ZgMCwcpFVyTMJfJwq5n/.
Acesso em: 20 abr. 2026.

MOHR, Bárbara Rafaela. Modelos de previsão de nível de rio em tempo real para o município de Ibirama/SC. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Ibirama, 2025.

OKACHA, Abdelmonaim; SALHI, Adil; BOUCHOUOU, Mounir; FATTASSE, Hamid. Enhancing flood forecasting accuracy in data-scarce regions through advanced modeling approaches. Journal of Hydrology, v. 645, parte B, art. 132283, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132283.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO and the Early Warnings for All Initiative. Geneva: WMO, 2025. Disponível em: https://wmo.int/activities/early-warnings-all/wmo-and-early-warnings-all-initiative.
Acesso em: 20 abr. 2026.

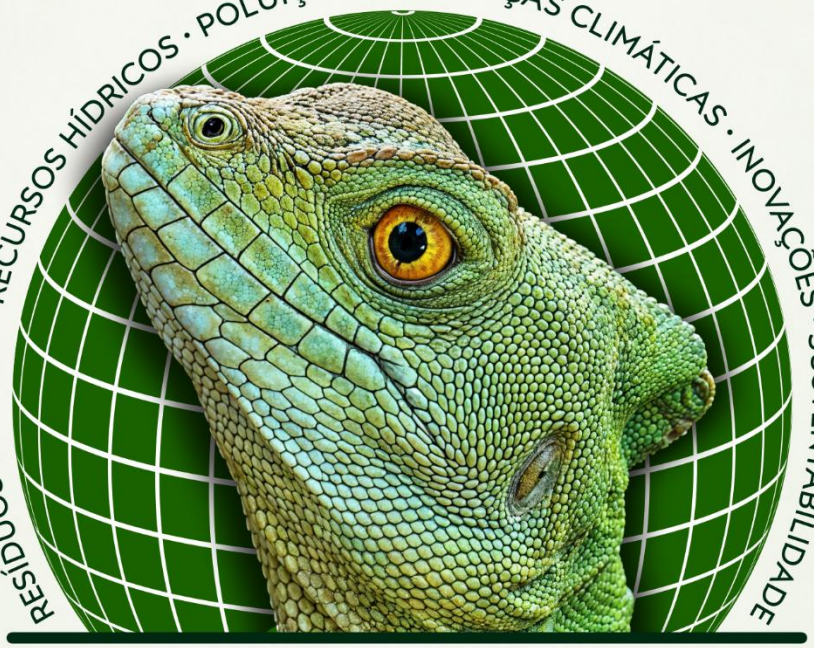
XU, Yang; HU, Cheng; WU, Qin; JIAN, Sheng; LI, Zhen; CHEN, Yifan; ZHANG, Guoqing; ZHANG, Zhen; WANG, Shuo. Flood forecasting method and application based on deep learning. Water, v. 16, n. 5, art. 765, 2024. DOI: 10.3390/w16050765. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/16/5/765
Acesso em: 20 abr. 2026.

ZHANG, Ting; ZHANG, Ran; LI, Jianzhu; FENG, Ping. Deep learning of flood forecasting by considering interpretability and physical constraints. Hydrology and Earth System Sciences, v. 29, p. 5955-5981, 2025. DOI: 10.5194/hess-29-5955-2025. Disponível em: https://hess.copernicus.org/articles/29/5955/2025/.
Acesso em: 20 abr. 2026.

ZHAO, Xinfeng; WANG, Hongyan; BAI, Mingyu; XU, Yingjie; DONG, Shengwen; RAO, Hui; MING, Wuyi. A comprehensive review of methods for hydrological forecasting based on deep learning. Water, v. 16, n. 10, art. 1407, 2024. DOI: 10.3390/w16101407. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/16/10/1407.
Acesso em: 20 abr. 2026.

ÁREA TEMÁTICA 5

DESCARBONIZAÇÃO



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

ALÉM DA EFICIÊNCIA: O PAPEL DA INDÚSTRIA 4.0 COMO CATALISADORA DA DESCARBONIZAÇÃO GLOBAL

1 Jusicleiton Santos Pereira, 2 Giovana da Costa Borges, 3 Laura Beatriz Kappel Waechter, 4 Liane Mahlmann Kipper

1 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: jusicleiton@mx2.unisc.br; 2 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: giovanaborges4@mx2.unisc.br; 3 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: kappelbeatriz@mx2.unisc.br; 4 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: liane@unisc.br

Palavras-chave: Descarbonização; Indústria 4.0; Revisão de literatura.

Resumo

O artigo analisa a relação entre Indústria 4.0 e a transição para uma economia de baixo carbono, com o objetivo de realizar uma análise bibliométrica para identificar, organizar e analisar a integração das tecnologias da Indústria 4.0 nos processos de descarbonização em diferentes setores e contextos bem como a evolução das propostas de pesquisas futuras relacionadas ao uso das tecnologias da Indústria 4.0 para a descarbonização. O estudo parte do reconhecimento de que o setor industrial é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono (CO_2), o que torna a descarbonização um desafio central para alcançar a neutralidade de carbono. Nesse contexto, as tecnologias associadas à Indústria 4.0 (Internet das Coisas, *Big Data*, computação em nuvem, *machine learning* e *digital twins*) têm potencial para apoiar estratégias de redução de emissões por meio da otimização de processos, melhoria da eficiência energética e maior integração de dados nos sistemas produtivos. A pesquisa adota uma abordagem de análise bibliométrica, buscando identificar como essas tecnologias têm sido exploradas no contexto da descarbonização e da economia de baixo carbono. Os resultados indicam que grande parte dos estudos se concentra em aplicações voltadas à eficiência energética e à otimização operacional, enquanto abordagens mais sistêmicas relacionadas à transformação de cadeias produtivas e modelos industriais ainda são pouco exploradas. Dessa forma, o artigo evidencia a necessidade de ampliar as investigações sobre a integração das tecnologias digitais em estratégias mais abrangentes de descarbonização, contribuindo para orientar agendas futuras de pesquisa voltadas à sustentabilidade e à transição para sistemas industriais de baixo carbono.

Introdução

As revoluções industriais promoveram diversas mudanças no formato de operação da cadeia produtiva. Essas mudanças não foram sentidas apenas na forma de fazer as coisas, mas também nos impactos ambientais que cada nova revolução provocou (Ahmad; Yaqub; Lee, 2024). Um dos maiores impactos ambientais provocados pela evolução da indústria é a emissão de dióxido de carbono (CO_2) (Almeida; Correia SimõEs; Fernandes, 2025) e este é o principal responsável pelas mudanças climáticas, uma vez que 30% das emissões de gases do efeito estufa (GEE) é oriundo do setor industrial (Cao; Mei; Liu, 2025). Com isso, a descarbonização ganha destaque como um dos principais desafios da atualidade para alcançar a neutralidade em carbono (Al Khaffaf; Tamimi; Ahmed, 2024).

A Quarta Revolução Industrial, também chamada de Indústria 4.0, foi responsável pela transformação digital (Riofrio *et al.*, 2025); (Zamora Iribarren *et al.*, 2024). Essa transformação se deu com a introdução de tecnologias como *Internet of Things* (IoT), *Big Data, cloud computing, machine learning* (ML), *digital twins*, dentre outras (Moraes *et al.*, 2022). A introdução dessas tecnologias no setor industrial se revela como um direcionador potencial de mudanças nesses sistemas, focando na maximização da eficiência operacional (Varriale *et al.*, 2025). Outro ponto é o ganho em eficiência energética, redução de desperdícios, otimização de recursos naturais utilizados nos processos produtivos, bem como a redução e o monitoramento das emissões de GEE, como caminho para transformação em sistemas mais sustentáveis (Alsaoudi *et al.*, 2025).

Apesar de a literatura explorar a relação entre Indústria 4.0 e sustentabilidade, revisões recentes evidenciam que estas temáticas ainda apresentam fragmentação conceitual e ausência de sínteses específicas voltadas à descarbonização. Pesquisas como a de (Germano; Mello; Motta, 2021), afima que a contribuição das tecnologias da Industria 4.0 para sustentabilidade tende a ser geral e não se concentra especificamente na descarbonização e economia de baixo carbono. Para (Briatore *et al.*, 2025), há necessidade de mais investigação sobre o papel real dessas tecnologias na redução de emissões e na sustentabilidade das cadeias de valor.

Diante disto, esta pesquisa teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica para identificar, organizar e analisar a integração das tecnologias da Indústria 4.0 nos processos de descarbonização em diferentes setores e contextos. Para isso, foi respondida a seguinte pergunta de pesquisa: Como as tecnologias da Indústria 4.0 têm sido integradas em diferentes setores e contextos às estratégias no processo de descarbonização?

Dessa forma, foi realizada uma análise bibliométrica com *onference papers* com o objetivo de compilar os achados de múltiplos estudos sobre o impacto das tecnologias da Indústria 4.0 na descarbonização. Foi mapeado o estado da arte e a evolução temática nas bases da Scopus e da Web of Science, identificadas as tecnologias e os seus impactos no processo de descarbonização. O artigo segue a seguinte estrutura: material e métodos, resultados e discussão, conclusões e por fim o referencial bibliográfico utilizado.

Material e Métodos

A execução desta se deu com base na abordagem de condução de análise bibliométrica (Donthu *et al.*, 2021). Esta metodologia permite identificar os principais temas e relações conceituais presentes na literatura por meio da análise de coocorrência de palavras-chave. Esse tipo de análise permite mapear a estrutura temática de um campo científico a partir da frequência com que determinados termos aparecem conjuntamente nas publicações. A questão de pesquisa foi: "Como as tecnologias da Indústria 4.0 têm sido integradas às estratégias de descarbonização em diferentes setores e contextos?".

A escolha dos tipos de documentos focou nos artigos publicados em eventos científicos, por entender que o tema descarbonização é recente. Eles foram selecionados nas bases da Scopus e da Web of Science, dentro do período de 2015 a 2026. O ano de 2015 foi definido como inicial levando em consideração o Acordo de Paris (Fuglestvedt *et al.*, 2023). A *string* de busca utilizada foi *("Industry 4.0" OR "I 4.0" OR "digital technologies" OR "IoT" OR "cyber-physical systems" OR "Industry 4.0 technologies") AND ("decarbonization" OR "decarbonisation" OR "decarbonising" OR "carbon neutrality" OR "low-carbon" OR "low carbon" OR "GHG reduction")*. Os dados foram processados no *software* VOSviewer (versão 1.6.19) e SciMAT (versão 1.1.06). O VOSviewer foi utilizado para a criação de mapas de coocorrência de palavras-chave dos artigos selecionados e identificar os principais *clusters* temáticos. Ele agrupa os termos em *clusters* com base na sua relevância e conexões refletindo o número de citações daquele termo (Huang *et al.*, 2022). Já o SciMAT, para análises longitudinais dos temas estudados e diagramas estratégicos com o intuito de demonstrar a evolução de temas ao longo dos períodos delimitados (Shen *et al.*, 2023).

Os critérios de inclusão foram: estudos do tipo *Conference Paper* (Scopus) ou *Proceedings* (Web of Science), publicados a partir do ano de 2015, escritos em língua inglesa e com acesso do tipo *open access* para manter apenas artigos de acesso aberto permitindo a leitura integral, bem como a possibilidade de reprodutibilidade da revisão. Como critérios de exclusão foram adotados: estudos diferentes de *Conference Paper* ou *Proceedings*, artigos publicados antes de 2015, que não fossem escritos em língua inglesa e com o acesso diferente de *open access*. Dos artigos incluídos foram lidos o título, resumo e palavras-chave para identificar a presença dos termos indústria 4.0, tecnologias, descarbonização, economia de baixo de carbono, dentro outros relacionados (GalvãO; Pansani; Harrad, 2015). Os artigos que não possuíam os termos, foram excluídos da pesquisa.

Os resultados foram organizados da seguinte forma: (i) análise dos *clusters* temáticos (gerados no VOSviewer); (ii) mapa de evolução (gerado no SciMAT); e (iii) as lacunas de conhecimento e direções de pesquisa futura emergem na literatura. A síntese das tecnologias e seus impactos foram organizados em uma tabela para facilitar a comparação direta entre os estudos. As tabelas são compostas por setores/contexto, tecnologias e impactos. As lacunas do conhecimento e direções de pesquisas futuras seguiram o mesmo padrão de tabelas.

Resultados e Discussão

Análise de rede de relacionamento e tendências na evolução temporal (VOSviewer)

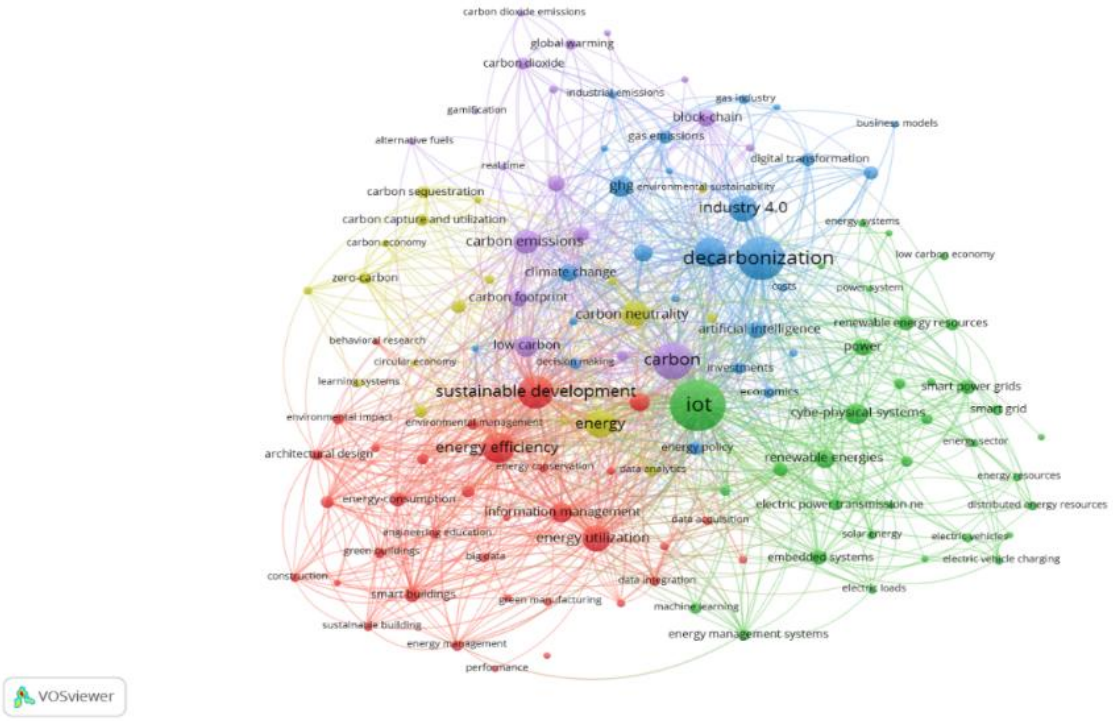


Figura 7: Apresentação dos agrupamentos temáticos. Fonte: VOSviewer (2026).

A análise de coocorrência de palavras-chave no VOSviewer (Figura 1), permitiu identificar os temas principais e as suas interrelações. Foram identificados cinco *clusters* temáticos distintos, mas que também há sobreposição destes na rede. A

rede apresenta conexões interdisciplinares entre a tecnologia digital e a sustentabilidade ambiental, com uma estrutura temática densa e com forte conexão com os termos *IoT* (como termo central), *decarbonization, Industry 4.0, carbon, carbon neutrality, energy efficiency, energy* e *sustainable development* como termos mais centrais, de onde partem as demais conexões. Essa configuração indica que a literatura aponta para uma centralidade e indica uma estrutura em torno do uso de tecnologias digitais e estratégias de descarbonização, principalmente por meio da digitalização de sistemas energéticos (Zhang *et al.*, 2017); (Mourtzis; Angelopoulos; Panopoulos, 2022); (Wijaya; Asif, 2025). Isso evidencia que o uso de tecnologias tem contribuído na transição para uma economia de baixo carbono (Kim; Jeong, 2022). Outro ponto de destaque é a presença de *clusters* bem definidos, evidenciando a existência de diferentes linhas de pesquisa, por mais que estejam interconectadas. Esses agrupamentos abordam temas relacionados à transformação digital, sistemas energéticos, gestão de carbono e sustentabilidade ambiental, reforçando a variedade de dimensões abrangidas pela temática deste estudo.

A estrutura da rede permite a análise de cinco *clusters* de forma distinta. O *cluster* 1 está relacionado à transformação digital e descarbonização industrial. O *cluster* azul é formado por termos como *Industry 4.0, blockchain, digital transformation, digital technologies* e *digitalization*. Neste *cluster* estão reunidos estudos que investigam a aplicação de tecnologias digitais em contextos industriais com foco na redução de emissões de carbono e melhoria do desempenho ambiental industrial (Mourtzis; Angelopoulos; Panopoulos, 2022); (Abdulghani; Winkler, 2025). No *cluster* verde estão os termos associados aos sistemas energéticos inteligentes (*smart grids*). Neste, destacam-se os termos *IoT, renewable energy, smart grids* e *cyber-physical systems*, evidenciando o uso das tecnologias digitais na transição para sistemas energéticos que sejam mais eficientes e ao mesmo tempo mais sustentáveis (Ng; Ghobakhloo, 2020). Outro ponto de destaque é a utilização de veículos elétricos (*electric vehicles*) como alternativa para redução nas emissões de CO_2 (Hristova, 2022); (Victoria; Muhi; Andres, 2025). O *cluster* ainda aponta para os sistemas de monitoramento em tempo real (*real time systems*) e a integração desses sistemas com fontes renováveis como sistemas de geração de energia solar (*solar power generation*) (Tangka; Suwandi, 2024).

O *cluster* vermelho é composto pelos termos referentes à eficiência energética (*energy efficiency*) e otimização de recursos (*green manufacturing*). Neste arranjo, fica evidente a utilização de tecnologias com foco em eficiência energética, como evidenciados pelos termos *big data, automation, digital twins*, *energy utilization, energy consumption* e *energy management.* Esse agrupamento revela que boa parte da literatura investiga o uso de tecnologias digitais como caminho para melhoria do desempenho energético de processos industriais e edificações, sendo evidenciado pelos termos *green manufacturing, green computing, green buildings* e *smart buildings* (Couraud et al., 2025*)*; (Ni *et al.*, 2021); (Zhang; Yang; Hao, 2024). Na Figura 2, pode-se observar a conexão entre as tecnologias e a energia.

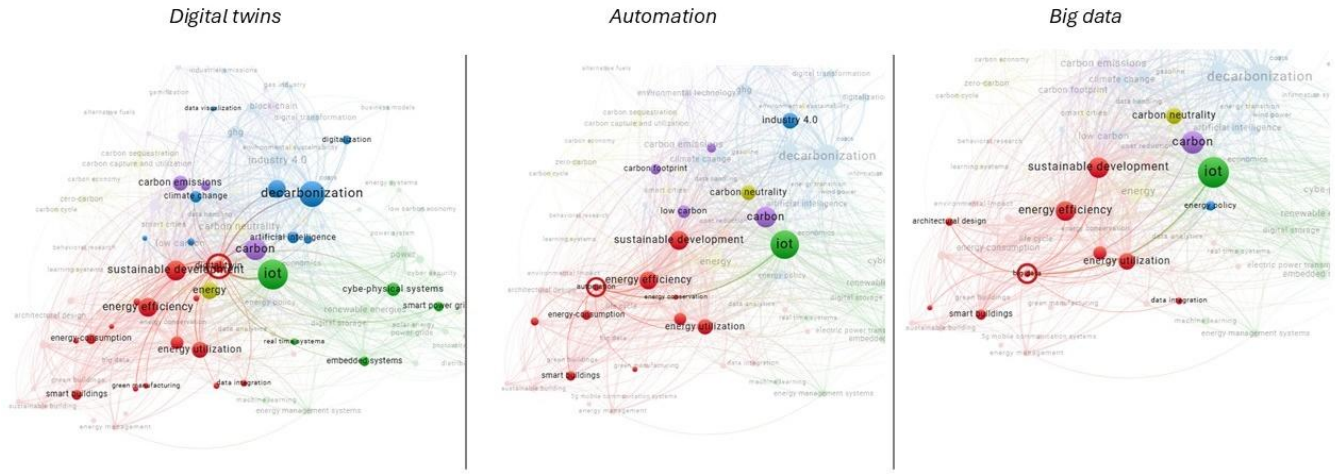


Figura 8: Principais tecnologias da Indústria 4.0 identificadas nos agrupamentos. Fonte: VOSviewer (2026).

O *cluster* roxo (Figura 1) está relacionado às mudanças climáticas e as emissões de CO_2. Termos como *carbon emissions, carbon dioxide, carbon footprint* e *global warming* retratam este direcionamento. Diferentemente dos demais *clusters*, este agrupamento não apresenta aplicações específicas, mas sim o problema ambiental que fundamenta esta pesquisa. A conexão deste *cluster* com os demais evidencia que a temática das emissões atua como um elemento que conecta tecnologias digitais, sistemas energéticos e estratégias de sustentabilidade por meio da descarbonização (Brinken; Pabsch; Behrendt, 2022); (Tanase; Croitoru, 2025). Dessa forma, a integração das tecnologias da Indústria 4.0 às estratégias de descarbonização não tem origem da agenda climática, mas sim da incorporação progressiva de soluções digitais a um campo previamente consolidado de estudos sobre emissões de carbono.

Por fim, o *cluster* amarelo contempla a temática da economia de baixo carbono combinada com estratégias de sustentabilidade por meio de práticas e uso de tecnologias para a neutralidade de carbono. Isso é evidenciado pela presença dos termos *carbon neutrality* (como termo mais central deste grupo), *carbon footprint, carbon sequestration, carbon capture, zero carbon*. Ao analisar as conexões do termo *carbon neutrality* com termos como *Industry 4.0, IoT, digital technologies, sustainable development, cyber-physical systems*, dentre outros, percebe-se a evidência do uso de tecnologias como condutores para uma economia de baixo carbono (Zegraoui *et al.*, 2025), (Gul; Wang, 2021), (Gohel; Jani; Barot, 2026). Esse *cluster* ainda apresenta

conexões de abordagens tecnológicas a discussões mais amplas sobre sustentabilidade e políticas ambientais para uma transição energética (Ali *et al.*, 2025); (Warwas, 2025). Quando analisadas as conexões do termo *energy transition* (*cluster* amarelo), percebe-se conexões com *energy policy, decarbonization, Industry 4.0, ghg, digital technologies* e *IoT*, evidenciando a existência de políticas energéticas que estão relacionadas com a transição energética na promoção da descarbonização por meio de tecnologias da Indústria 4.0 e *IoT* (Murillo-JiméNez; Centeno-AlarcóN; Buele, 2025), (Makhonko *et al.*, 2021), (Azlan *et al.*, 2023), como apresentado na Figura 3.

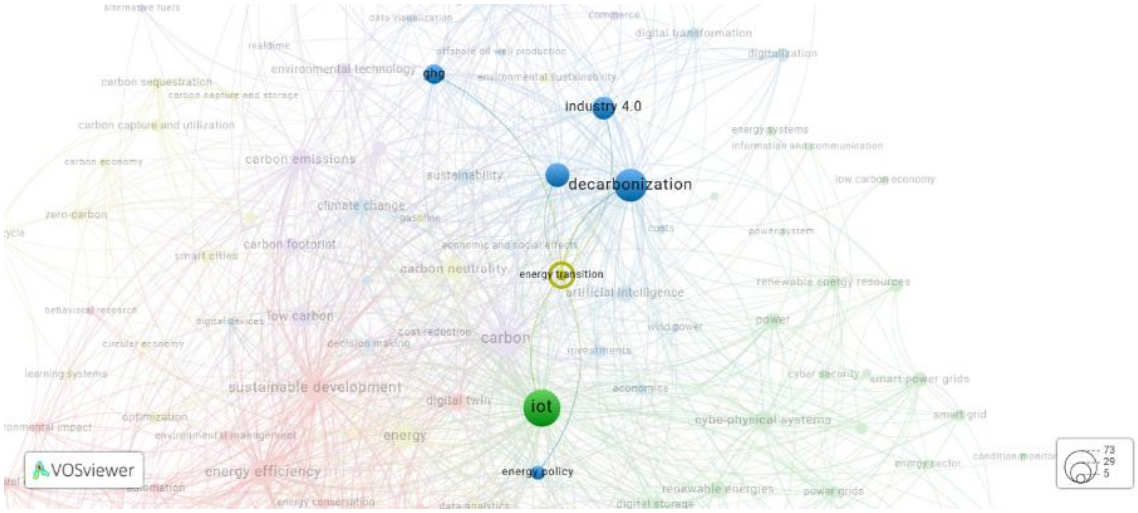


Figura 9: Conexões tecnológicas e descarbonização. Fonte: VOSviewer (2026).

Ainda sobre a configuração da rede geral (Figura 1), pode-se identificar na rede como as tecnologias da I4.0 têm sido integradas às estratégias de descarbonização em diferentes setores. Observa-se que tecnologias com *IoT* e sistemas ciberfísicos são aplicadas em sistemas energéticos, dessa forma, possibilitando o monitoramento em tempo real, a gestão de redes inteligentes, bem como a integração de fontes de energia renovável. Essa configuração indica que o setor energético é um dos principais locais de aplicação da digitalização com foco em descarbonização (Ng; Ghobakhloo, 2020), (Couraud *et al.*, 2025), (Giannino *et al.*, 2025). Outro fator importante identificado na rede é que as tecnologias digitais são utilizadas para melhoria da eficiência energética em processos industriais e em edificações (Ng; Ghobakhloo, 2020), (Azlan *et al.*, 2023). Soluções baseadas na análise de dados, automação e sistemas inteligentes são utilizadas para otimizar o consumo energético e redução de desperdícios, impactando positivamente no desempenho operacional. Tecnologias como inteligência artificial e *blockchain* têm sido utilizadas para o monitoramento e a gestão de carbono. Estas são utilizadas como meios para o rastreamento de emissões, transparência de dados e tomada de decisão voltadas para a sustentabilidade (Couraud *et al.*, 2025), (Kim; Jeong, 2022).

A rede revela padrões estruturais relevantes e um dos achados principais é que o termo *Industry 4.0* não ocupa posição central. Em contrapartida, tecnologias específicas, como *IoT*, se posicionam mais centralizadas, indicando que a literatura tende para abordagens relacionadas às tecnologias isoladas, em vez de explorar a Indústria 4.0 como uma rede integrada por diferentes tecnologias. Por outro lado, a conexão entres os *clusters* relacionados a sistemas energéticos e tecnologias digitais sugere que as estratégias de descarbonização estão predominantemente concentradas na otimização e gestão energética (Figura 4). Evidencia-se também a presença de temas emergentes, como *blockchain* e *carbon capture*, posicionados de forma mais periférica. Isso indica que essas tecnologias ainda estão em estágio inicial de aplicação no contexto da descarbonização, representando oportunidades para pesquisas futuras (Figura 1).

A análise do termo *digital technologies* revela que o termo ocupa uma posição central e articuladora no *cluster* relacionado à descarbonização (Figura 4). A sua localização próxima ao termo *decarbonization,* como a sua alta densidade de conexões permite inferir que as tecnologias digitais atuam como um elemento integrador entre essas duas temáticas, ou seja, que há o indício que as tecnologias digitais podem contribuir no processo de descarbonização.

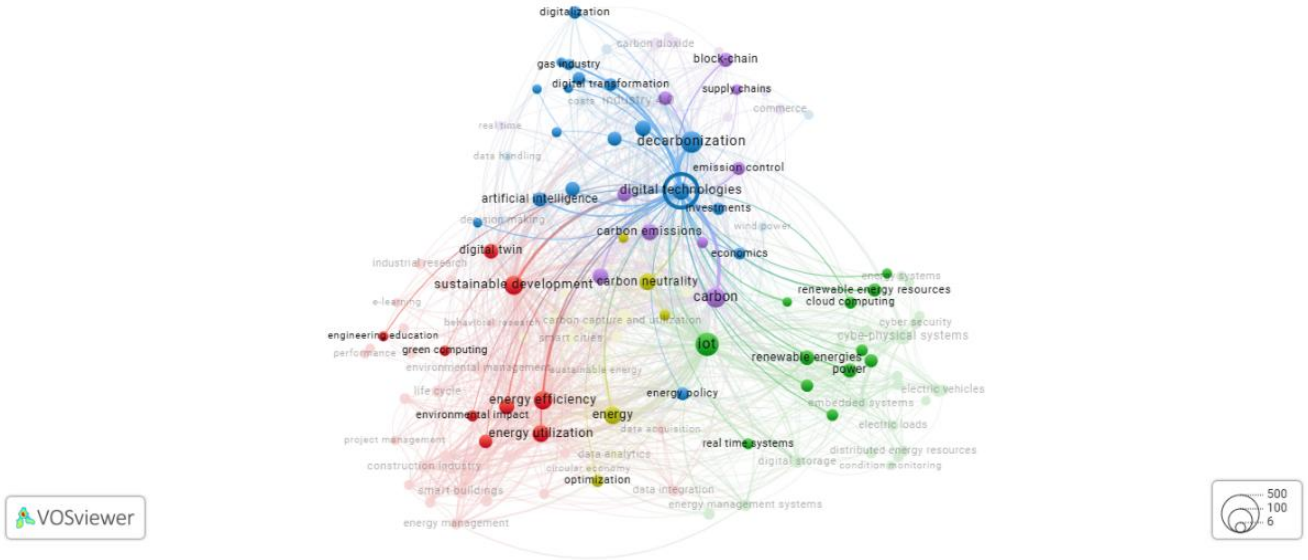


Figura 10: Integração das tecnologias digitais e agrupamentos. Fonte: VOSviewer (2026).

Pode-se observar na figura 4 que o termo *digital technologies* faz conexões diretas com termos como *artificial intelligence, Industry 4.0, digital twins, blockchain,* evidenciando que a literatura aborda as tecnologias digitais como um ecossistema tecnológico interdisciplinar. Essa interconexão sugere que a descarbonização tem sido abordada por meio da combinação de diversas tecnologias digitais, e não apenas pela aplicação de soluções individuais. Para além disso, o termo *digital technologies* tem conexões fortes com os conceitos de *carbon neutrality, carbon emissions* e *climate change,* demonstrando que as tecnologias digitais estão diretamente associadas às estratégias de controle, mitigação e monitoramento dos níveis de emissões de CO_2. Essas relações revelam que o papel delas perpassa o de melhorar a eficiência operacional, abrangendo funções de mensuração e gestão ambiental (Zegraoui *et al.*, 2025).

Outro ponto relevante é a sua conexão com termos relacionados a sistemas energéticos (*clusters* vermelho e verde), como*, energy efficiency, energy utilization, energy consumption, energy systems* e *renewable energies*. Essa relação sugere que, enquanto tecnologias mais específicas (como as de *IoT*) trabalham a nível operacional, as tecnologias digitais são utilizadas de forma mais estratégica, conectando-se a diferentes contextos e aplicações no processo de descarbonização (Couraud *et al.*, 2025). Com base nessa análise, pode-se responder à pergunta de pesquisa descrita na metodologia.

As tecnologias da I4.0 têm sido integradas às estratégias de descarbonização por meio de uma estrutura digital integrada, onde o conceito de *digital technologies* atua como ponto central conectando diferentes soluções tecnológicas (IA, *blockchain, IoT, digital twins, cloud computing, remote sensing*, dentre outras) a objetivos ambientais como redução de emissões, neutralidade de carbono e mitigação das mudanças climáticas.

Por fim, a análise realizada no SciMAT (Figura 5) complementa a interpretação dos resultados desta pesquisa ao evidenciar o grau de desenvolvimento e relevância do tema na literatura. Os resultados indicam que temas como descarbonização e eficiência energética aparecem como temas motores, ou seja, apresentam centralidade e densidade na rede, indicando que estão bem desenvolvidos na literatura e desempenham a função de termos estruturantes.

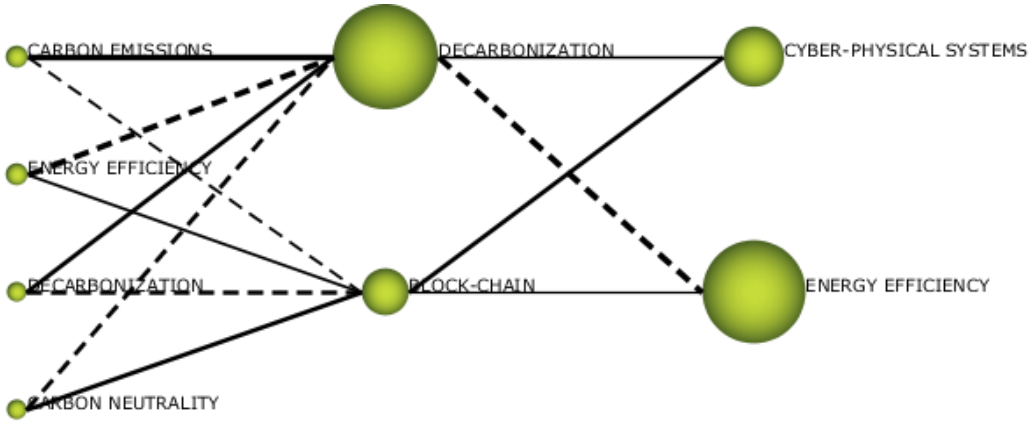


Figura 11: Evolução temática. Fonte: SciMAT (2026).

Esses temas estabelecem conexões com outros tópicos relacionados às tecnologias digitais, como sistemas ciberfísicos e *blockchain*, indicando que a literatura tem explorado a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 como suporte às estratégias de redução de emissões e otimização energética. No entanto, alguns desses tópicos tecnológicos aparecem com menor densidade ou centralidade, sugerindo que ainda estão em processo de consolidação científica. Esse padrão indica que, embora haja crescente interesse na integração entre tecnologias digitais e descarbonização, o campo ainda apresenta oportunidades para aprofundar investigações sobre como essas tecnologias podem ser aplicadas de forma mais estruturada e integrada em estratégias de transição para uma economia de baixo carbono.

Considerações Finais

Os resultados indicam que a literatura sobre Indústria 4.0 e descarbonização está evoluindo para uma abordagem mais integrada e interdisciplinar. No entanto, a predominância de estudos focados em tecnologias específicas sugere a ausência de modelos teóricos mais abrangentes que integrem as diversas soluções digitais de forma coordenada. As tecnologias da Indústria 4.0 têm sido integradas às estratégias de descarbonização principalmente por meio de uma estrutura digital integrada, no qual o conceito de *digital technologies* funciona como um ponto central que conecta diferentes soluções tecnológicas (IA, *blockchain*, *IoT*) a objetivos ambientais (redução de emissões, neutralidade de carbono e mitigação das mudanças climáticas). Além disso, o forte foco em eficiência energética indica que a literatura tem priorizado melhorias incrementais, ou seja, grande parte dos estudos encontrados na literatura se propõe a reduzir emissões melhorando a eficiência do que já existe, em vez de propor mudanças mais profundas na forma como os sistemas produtivos funcionam. Isso revela uma lacuna importante, uma vez que a descarbonização em larga escala pode exigir mudanças estruturais em cadeias produtivas, modelos de negócio e sistemas industriais. Por fim, a identificação de tecnologias emergentes com baixa centralidade reforça a existência de oportunidades de pesquisa, especialmente no que se refere à integração dessas tecnologias em estratégias mais amplas e sistêmicas de descarbonização. Como sugestão de trabalhos futuros, sugere-se a análise da sobreposição dos *cluster* temáticos encontrada na Figura 1.

Agradecimentos

Este trabalho agradece o apoio concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob o protocolo 310204/2022-4, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) sob o código 001 e processo 88881.710388/2022-01. CAPES Consolidação PDPG 13407 – Consolidação Estratégica Emergencial de Programas de Pós-Graduação em Stricto Sensu (PPGs).

Referências Bibliográficas

ABDULGHANI, T.; WINKLER, H. Transition Towards a Green Future: Upgrading a Digital Decarbonization Maturity Model. **Procedia Computer Science,** v. 253, p. 1303-1312, 2025/01/01/2025.

AHMAD, H.; YAQUB, M.; LEE, S. H. Linking the industrial revolutions and environmental impacts: a review of global trends, strategies, and future recommendations. 2024.

AL KHAFFAF, I.; TAMIMI, A.; AHMED, V. **Pathways to Carbon Neutrality: A Review of Strategies and Technologies Across Sectors**. Energies. 17**:** 6129 p. 2024.

ALI, E. *et al.* Digital Twin for Climate Resilience: Transforming Smart Cities for a Sustainable Future. In: AL MANSOORI, S.;KAUR, N.*, et al*, **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, 2025. G-2025: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. p.139-145.

ALMEIDA, D.; CORREIA SIMÕES, A.; FERNANDES, A. Exploring the impacts of Industry 4.0 technologies on the triple bottom line of sustainability in industrial companies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-15, 2025.

ALSAOUDI, T. A.; ACQUAYE, A.; SWARNAKAR, V.; KHALFAN, M. Exploring the intersection of Industry 4.0 technologies, circular economy, and sustainable performance: A systematic literature review and future research directions. **Heliyon,** v. 11, n. 12, 2025.

AZLAN, A. T. B. N. N.; MATIVENGA, P. T.; ZHU, M.; MIRHOSSEINI, N. Industry 4.0 energy monitoring system for multiple production machines. In: MPOFU, K.;SACKS, N.*, et al*, **Procedia CIRP**, 2023. Elsevier B.V. p.613-618.

BRIATORE, F. *et al.* Exploring Industry 4.0's role in sustainable supply chains: Perspectives from a bibliometric review. **Logistics,** v. 9, n. 1, p. 26, 2025.

BRINKEN, J.; PABSCH, C.; BEHRENDT, F. Decarbonization Potential of Logistic 4.0 Technologies in Apple Supply Chains. In: LONGO, F.;AFFENZELLER, M.*, et al*, **Procedia Computer Science**, 2022. Elsevier B.V. p.461-470.

CAO, K.; MEI, Y.; LIU, Y. Collaboration or competition? Low-carbon platform regulations and pricing decisions in environmental, social, and governance (ESG). **Cleaner Engineering and Technology**, p. 101044, 2025.

COURAUD, B. *et al.* A Cyber-Physical Infrastructure for Smart Energy Buildings. In: REY, G.;TIGLI, J. Y.*, et al*, **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, 2025. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. p.22-29.

DONTHU, N. *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of business research,** v. 133, p. 285-296, 2021.

FUGLESTVEDT, J. *et al.* A "greenhouse gas balance" for aviation in line with the Paris Agreement. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change,** v. 14, n. 5, p. e839, 2023.

GALVÃO, T. F.; PANSANI, T. D. S. A.; HARRAD, D. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiologia e serviços de saúde,** v. 24, p. 335-342, 2015.

GERMANO, A. X. D. S.; MELLO, J. A. V. B.; MOTTA, W. H. Contribuição das tecnologias da indústria 4.0 para a sustentabilidade: uma revisão sistemática. **Palabra clave,** v. 11, n. 1, p. 142-142, 2021.

GIANNINO, G.; MAIONE, F.; LINO, P.; MAIONE, G. DIGITALIZATION OF MARINE POWER SOURCES: FROM THEORY TO PRACTICE. In: SOLIMAN ELSELMY, A., **International Maritime Transport and Logistics Conference**, 2025. Academy Publishing Center, Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport. p.307-318.

GOHEL, G.; JANI, D.; BAROT, V. FedCarbonNet - An AI-Blockchain-IoT Framework for Carbon Footprint Management and Optimization. **Lecture Notes in Networks and Systems**, 2026. p.143-155.

GUL, H.; WANG, X. Future Industrial Energy Systems Design and Demand Side Management. **Energy Proceedings**, 2021. Scanditale AB.

HRISTOVA, T. Tracking of the battery materials of electric vehicles in the mining industry via a blockchain. In: LIU, B. e ZHEVZHYK, O., **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2022. 1: IOP Publishing Ltd.

HUANG, Y.-J.; CHENG, S.; YANG, F.-Q.; CHEN, C. **Analysis and Visualization of Research on Resilient Cities and Communities Based on VOSviewer**. International Journal of Environmental Research and Public Health. 19**:** 7068 p. 2022.

KIM, B.; JEONG, J. Real-Time Low-Carbon Prediction in Ready-Mixed Concrete Production Process for Smart Manufacturing. **Procedia Computer Science,** v. 203, p. 205-212, 2022/01/01/2022.

MAKHONKO, N. I.; BELOUSOV, S. A.; TARASOVA, E. A.; PLOTNIKOVA, Y. A. Information and communication technologies in environmental monitoring of climate change. In: GIBADULLIN, A. e STATE UNIVERSITY OF MANAGEMENT, R. A. M., **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2021. 1: IOP Publishing Ltd.

MORAES, E. B. *et al.* Integration of Industry 4.0 technologies with Education 4.0: advantages for improvements in learning. **Interactive Technology and Smart Education,** v. 20, n. 2, p. 271-287, 2022.

MOURTZIS, D.; ANGELOPOULOS, J.; PANOPOULOS, N. Development of a PSS for Smart Grid Energy Distribution Optimization based on Digital Twin. **Procedia CIRP,** v. 107, p. 1138-1143, 2022/01/01/2022.

MURILLO-JIMÉNEZ, H.; CENTENO-ALARCÓN, M.; BUELE, J. Energy Transition in Industry as a Viable Path to Sustainable Decarbonization. In: TORRES-GUTIERREZ, R.;BAZANTES-SALTOS, K.*, et al*, **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2025. 1: Institute of Physics.

NG, T. C.; GHOBAKHLOO, M. Energy sustainability and industry 4.0. In: TONG, C. W.;CHIN-TSAN, W.*, et al*, **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2020. 1: Institute of Physics Publishing.

NI, Z. *et al.* Improving energy efficiency while preserving historic buildings with digital twins and artificial intelligence. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2021. 1: IOP Publishing Ltd.

RIOFRIO, A. *et al.* A perspective on transforming fats, oil, and grease (FOG) into hydrogen: insights on steam reforming catalysts and the case study of Hong Kong using techno-economic analysis and life cycle assessment. **GREEN CHEMICAL**

ENGINEERING, v. 6, n. 4, p. 473-493, DEC2025.

SHEN, S.; WU, C.; GAI, Z.; FAN, C. Analysis of the Spatiotemporal Evolution of the Net Carbon Sink Efficiency and Its Influencing Factors at the City Level in Three Major Urban Agglomerations in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health,** v. 20, n. 2, 2023.

TANASE, A.; CROITORU, C. Optimizing building performance with Digital Twins: Pathways to energy efficiency and decarbonization. In: BODE, F. e TECHNICAL UNIVERSITY OF CIVIL ENGINEERING BUCHAREST, P. P. B. B., **E3S Web of Conferences**, 2025. EDP Sciences.

TANGKA, E. B.; SUWANDI, A. Enabling Sustainable Energy Communities in ASEAN: A Systematic Approach to P2P Energy Transactions on Matakus Island Using IoT and Blockchain. In: ABDULLAH, A.;ABIYASA, A. P.*, et al*, **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2024. 1: Institute of Physics.

VARRIALE, V.; CAMMARANO, A.; MICHELINO, F.; CAPUTO, M. Interconnected Industry 4.0 technologies: Identifying current network value and integration opportunities. **Journal of Industrial Information Integration,** v. 45, p. 100838, 2025.

VICTORIA, A. N.; MUHI, M. M.; ANDRES, G. L. Carbon Emission Reduction in Urban Transport: A Comprehensive Review of Urban Transport Challenges. **International Exchange and Innovation Conference on Engineering and Sciences**, 2025. Kyushu University. p.1444-1449.

WARWAS, I. Green vs. Digital Transformation in Poland: Strategies of Key Stakeholders. In: CHEN, Y. W.;HOWLETT, R. J.*, et al*, **Procedia Computer Science**, 2025. Elsevier B.V. p.5549-5558.

WIJAYA, E. P.; ASIF, M. Technology readiness level assessment on digital technologies for energy efficiency. **Transportation Research Procedia,** v. 84, p. 512-519, 2025/01/01/2025.

ZAMORA IRIBARREN, M.; GARAY-RONDERO, C. L.; LEMUS-AGUILAR, I.; PEIMBERT-GARCÍA, R. E. **A Review of Industry 4.0 Assessment Instruments for Digital Transformation**. Applied Sciences. 14**:** 1693 p. 2024.

ZEGRAOUI, Y.; BENNIS, I.; MANSOURI, K.; AKEF, F. A bibliometric analysis: Exploring the intersection of IA and decarbonisation. In: BENHALA, B.;EL KHAILI, M.*, et al*, **E3S Web of Conferences**, 2025. EDP Sciences.

ZHANG, C.; ROMAGNOLI, A.; ZHOU, L.; KRAFT, M. From Numerical Model to Computational Intelligence: The Digital Transition of Urban Energy System. **Energy Procedia,** v. 143, p. 884-890, 2017/12/01/2017.

ZHANG, W.; YANG, M.; HAO, T. Intelligent Green Building Design and Management Based on the Internet of Things: An Empirical Study on Low Carbon Development. In: MACINTYRE, J.;ZHAO, J.*, et al*, **Procedia Computer Science**, 2024. Elsevier B.V. p.348-355.

A IMPORTÂNCIA DA QUANTIFICAÇÃO DOS GASES DE EFEITO NAS UNIVERSIDADES DE ENSINO SUPERIOR

1 Ruth de Sousa Santos Barros, 2 Vanessa Mota Bernardes, 3 Gianlucca Wanghon de Sousa Guimarães, 4 Diego Henriques Aguiar de Melo, 5 Sandra Aparecida Lima de Moura, 6 Antônio Jorge Silva Araújo Junior

1 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: ruthyu48@gmail.com; 2 Universidade Federal do Oeste do Pará, vanessa.bernardes1998@gmail.com; 3 Universidade Federal do Oeste do Pará, gianlucca.guimaraes@gmail.com; 4 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail:diego.henriques@aluno.edu.br; 5 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: sandramoura@ufop.edu.br; Universidade Federal do Oeste do Pará, antonio.jsa@ufopa.edu.br.

Palavras-chave: Gases de Efeito Estufa; Amazônia Legal; Gestão Ambiental Universitária.

Resumo

A quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem se tornado uma ferramenta fundamental para o planejamento ambiental e a promoção de práticas sustentáveis em instituições do ensino superior. Por isso é importante realizar estudos que buscam apresentar dados que colaborarem com o desenvolvimento técnico científico e retorno socioambiental. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo estimar e analisar as emissões indiretas de GEE associadas às atividades de trabalho do público acadêmico em geral do campus de Monte Alegre da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), com foco no Escopo 3 da metodologia Internacional *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol).* A coleta de dados foi realizada *in loco* no período de 14 a 16 de maio de 2025. A metodologia foi estruturada nas seguintes etapas: definição do escopo, coleta de dados, cálculo das emissões de GEE e elaboração de possíveis práticas sustentáveis com objetivo de realizar monitoramento contínuo. Foram considerados os deslocamentos de servidores públicos vinculados às atividades institucionais, incluindo modais hidroviário, rodoviário e aéreo, no período de 2023 a 2024. Os dados de deslocamentos foram obtidos junto à gestão administrativa do campus e complementados por medições a distância realizadas por meio de ferramentas geoespaciais. Os resultados indicaram que as emissões totais do Escopo 3 foram 1.43 t CO_2equivalentes em 2023 e 0,77 tCO_2e em 2024, com destaque para o transporte hidroviário como principal fonte de emissão no período analisado. Os resultados evidenciam a importância do monitoramento sistemático das emissões de GEE em instituições de ensino superior, bem como a necessidade de implementar nos futuros editais de licitação a priorização de contratações dos serviços, das empresas que realizam a quantificação das suas emissões. Sugere-se a buscar a integração da Ufopa com a Rede UniSustentável, com objetivo de fortalecer a pegada de carbono institucional. A troca de conhecimentos com outras instituições permite debates enriquecedores de educação ambiental e pegada de carbono. A pesquisa apontou que o contingenciamento de verbas para a universidade impactou diretamente nas emissões (GEE). Conclui-se a gestão pública orçamentária e ambiental podem contribuir significativamente para o fortalecimento da pegada de carbono.

Introdução

As emissões de gases de efeitos estufa (GEE) têm aumentado ao longo dos anos: “Em 2022, as concentrações médias globais de dióxido de carbono (CO_2), estavam, pela primeira vez, 50% acima da era pré-industrial. E continuou a crescer em 2023 (CARBON REPORT, 2023). No Brasil o Observatório do Clima criou o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) que através de documentos analíticos alimentam uma plataforma digital que apresenta o ranking dos estados brasileiros considerando as emissões de (GEE). Segundo a plataforma, o estado do Pará no ano de 2023 liderou o ranking das emissões de gases (SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA, OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024). Ficou entre os dez primeiros colocados, sendo seis Estados pertencentes à Amazônia Legal. A Amazônia Legal foi um instrumento criado pelo governo federal para atrair a construção e aplicação de projetos através de políticas públicas em área consideradas primordiais para o crescimento e desenvolvimento local. Criada nos 1950 pelo governo federal, alinhada a objetivos da época de ocupação e desenvolvimento regional, considera a proteção dos ambientes e dos povos tradicionais, que contribuem com a manutenção da floresta em pé e com a regulação do clima (FAS, 2022). A Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), busca colaborar com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável na Amazônia (ODS). Este projeto de pesquisa foi desenvolvido na região do Oeste do Pará na cidade de Monte Alegre no Campus universitário da (UFOPA) financiado pela instituição em parceria com Fundação de Integração Amazônia (FIAM). A pesquisa realizada em Monte Alegre - Pará, teve como base o Plano de Desenvolvimento Institucional (PDI), o qual tem como objetivos e metas contribuir para o desenvolvimento regional e sustentável. A execução do projeto foi de suma importância e relevância tecnológica e cientifica no âmbito acadêmico e social. Realizou-se a coleta de dados visando contribuir para o monitoramento das atividades desenvolvidas pelos colaboradores, servidores públicos e discente do âmbito acadêmico em prol do desenvolvimento sustentável. Para a execução das atividades adotou-se a metodologia internacional *Greenhouse Gás Protocol (GHG PROTOCOL)* a qual é definida por três escopos, este artigo apresenta os resultados e discussões do Escopo 3 da metodologia.

Material e Métodos

Para análise definição do escopo 3, utilizou-se uma adaptação da ferramenta metodológica *GHG Protocol (Greenhouse Gás Protocol)*, que é uma norma internacionalmente utilizada para medir e gerenciar emissões de gases de efeito estufa (GEE), desenvolvido pelo *World Resources Institute (WRI) e pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* método quantitativo. Inicialmente contactou-se a direção do campus de forma remota, com objetivo de apresentar a pesquisa sua motivação ressaltando qual a importância para a universidade no que tange ao compromisso com a sustentabilidade socioambiental regional. Durante a pesquisa foi realizada uma visita *in loco* no período de 14 a 16 de maio de 2025 e posteriormente mantiveram-se diversos contatos por e-mail com os servidores que ficaram responsáveis por fazer o levantamento do quantitativos de viagens que foram realizadas no ano de 2023 e 2024 a serviço da (UFOPA). Para análise do escopo escolhido foram consideradas as emissões indiretas: a qual abrange gases de efeito estufa que ocorrem em função das atividades do campus, mas, que estão direcionadas em fontes que não são de propriedade ou controladas pelo campus, tais como: Emissões associadas à produção de bens de consumo e serviços adquiridos pela organização (como papel, equipamentos de laboratórios, serviços de empresas terceirizadas). Após a coleta de dados as informações disponíveis pela universidade foram inseridas na planilha de cálculo do excel adaptada do site da Fundação Getúlio Vargas (FGV) a qual utiliza a ferramenta *GHG PROTOCOL,* para gerar os resultados quantitativos em toneladas de dióxido de carbono equivalentes (tCO_2e). Não foi possível abranger todos os parâmetros que a ferramenta preconiza em virtude da ausência de informações nos armazenamentos do banco de dados da UFOPA, por exemplo seria necessário ter o registro de qual foi o modelo da aeronave utilizado pelos servidores durante o deslocamento a serviço da instituição, esse dado é primordial para fazer a quantificação do CH_4 gás metano nas emissões de (GEE), portanto esse é considerado um fator limitante na pesquisa. Para complementar a discussão do trabalho optou-se por realizar o levantamento de revisão bibliográfica através do banco de dados disponíveis no periódico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); *Scopus, Scielo, Web of Sciense.* No campo de busca foram inseridas as seguintes palavras-chave: Relatório de Gases de Efeito Estufa (GEE), Universidades de Ensino Superior (IES), Pegada de Carbono. A revisão bibliográfica é primordial para fazer a discussão dos resultados obtidos comparando com outras universidades de ensino superior visando a consolidação da pesquisa. Para a seleção dos trabalhos foram adotados os mecanismos de busca descritos por Gil (2017). Segundo o autor, os mecanismos de busca são os sistemas baseados no uso exclusivo de computador para a indexação das páginas da *web*.

Resultados e Discussão

Caracterização da Área de Estudo O estudo foi desenvolvido no campus de Monte Alegre da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), que é uma unidade acadêmica voltada à formação superior na região do Baixo Amazonas. Localizado no município de Monte Alegre, na região noroeste do Pará, o campus está inserido em uma área da Amazônia Oriental com clima equatorial úmido, caracterizado por precipitações sazonais e temperatura média anual de aproximadamente 26,8°C (JESUS et al., 2018). Essa dinâmica climática influencia diretamente aspectos ambientais e logísticos da região, incluindo o acesso e a mobilidade, fortemente marcados pelo uso de modais fluviais (Silva et al. 2020). A Universidade Federal do Oeste do Pará busca a expansão do âmbito acadêmico priorizando cidades interioranas do estado do Pará próxima a cidade de Santarém-Pa. Inicialmente o campus até o ano de 2025 ofertava somente o curso de bacharelado em engenharia de aquicultura, alinhado à importância socioeconômica da atividade pesqueira local, porém a partir de 2026 passou a ofertar Licenciatura em Matemática, Licenciatura em Ciências Biológicas, Bacharelado em Agronomia. A cidade de Santarém-Pa, fica situada a cerca de 116 km, sendo necessário percorrer 86,2 km por via terrestre até o porto do Tapará e, em seguida, aproximadamente 30 km de travessia fluvial por balsa ou lancha, modais disponíveis para o acesso à região. A Figura 1 abaixo representa o município da área da pesquisa.

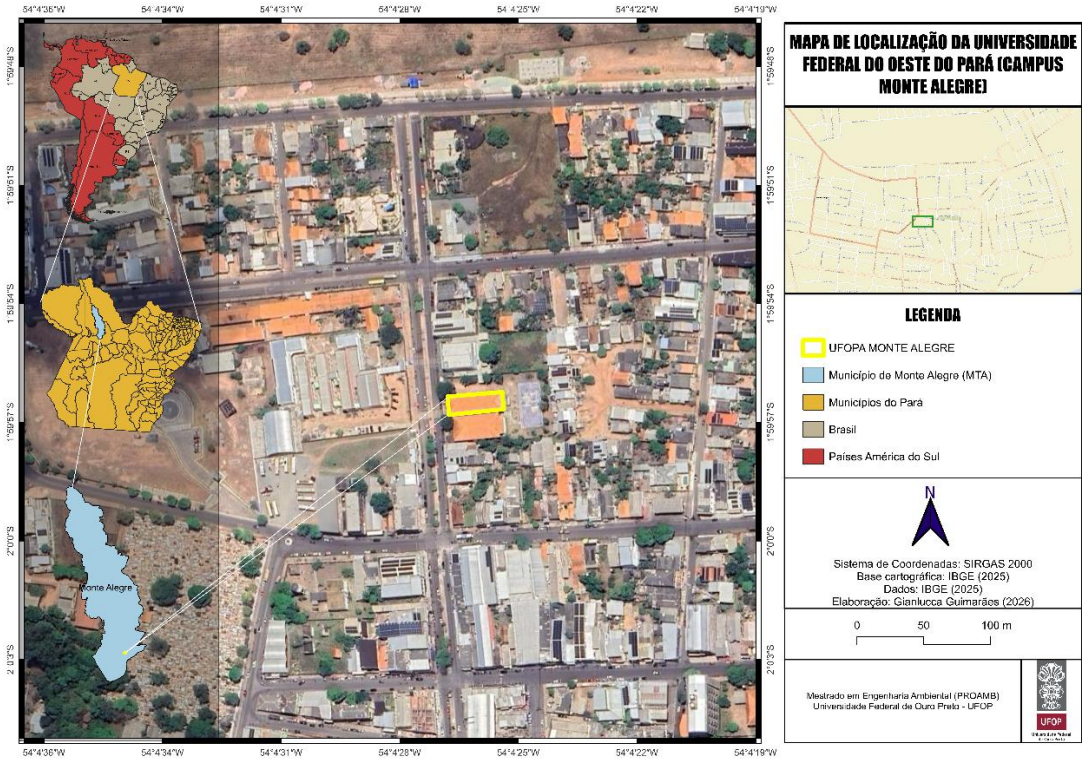


Figura 1: Localização do Município de Monte Alegre-Pa.
Fonte: Autores (2026).

E**missões de gases do efeito estufa do Escopo 3**

Para tabulação dos dados quantitativos do Escopo 3 da metodologia *GHG Protocol*, foram selecionadas as emissões indiretas pelos servidores. De forma que se considerou o trecho de travessia dos carros oficiais da universidade durante o trajeto de travessia sob o rio Amazonas, na balsa Camila Navegações, entre o trecho da cidade de Santarém-PA, saindo do terminal hidroviário Joaquim Costa da Pereira até o terminal Hidroviário de Santana do Tapará. O período anual utilizado nesta etapa foi de 2023 a 2024. Considerando o deslocamento anual decorrente de viagens a serviços. A seguir a Figura 2 representa a distância do trecho da travessia supramencionada o tempo estimado é de duas horas para o percurso habitual.

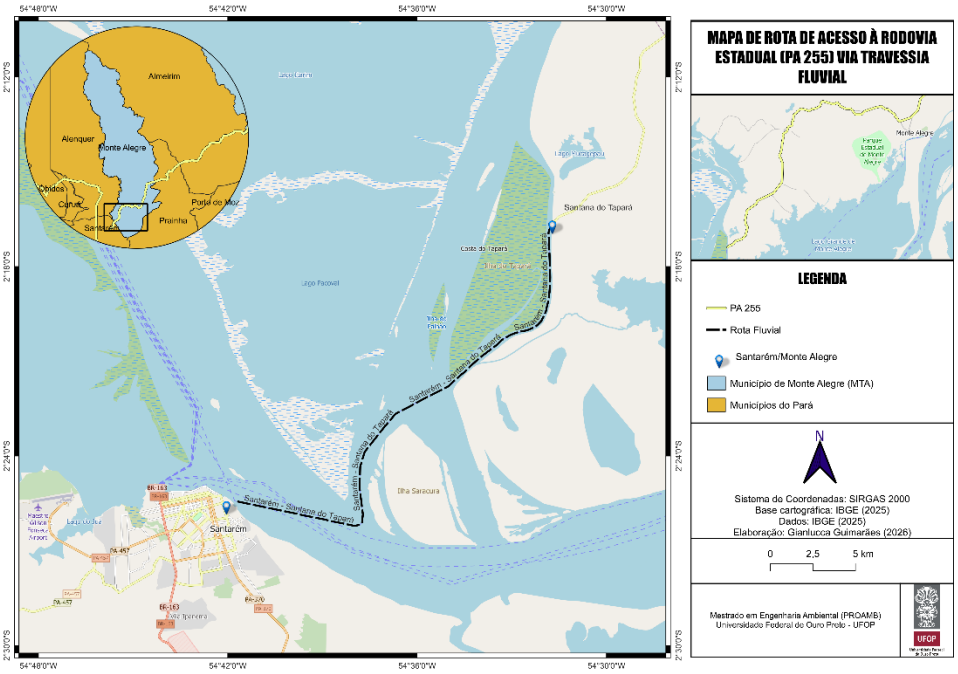


Figura 2: Percurso da balsa no trecho de Santarém ao porto de Santana do Tapará.
Fonte: Autores (2026).

Utilizou-se o Google Earth para mensurar a distância em quilômetros que a balsa percorre do porto hidroviário Joaquim da Costa Pereira até o terminal de Santana do Tapará, que é aproximadamente 31 km. Para fazer o levantamento da quantidade de viagens dos servidores, foi solicitado as informações internas administrativas da gestão do Campus de Monte Alegre. Identificou-se os números de viagens realizadas considerando o ano de 2023-2024. Para fazer o dimensionamento de cálculo das emissões de gases do efeito estufa (GEE) realizou-se inicialmente um cálculo de multiplicação de acordo com a metodologia *GHG PROTOCOL.* O cálculo considerou a distância total percorrida anualmente pela balsa e baseia-se em duas etapas. Primeiramente, multiplicou-se o número anual de viagens (64) pela distância percorrida em cada trajeto (31 km), resultando em um total de 1.984 km. Em seguida, considerou-se que cada viagem inclui um percurso de ida e volta, duplicando-se assim a quilometragem inicial (1.984 km), o que totaliza 3.968 km percorridos anualmente. Esse valor representa a distância total navegada pela balsa no período de um ano. Após obter o resultado da distância percorrida, foi inserido na planilha de domínio público da (FGV). No ano de 2023 foram realizadas sessenta e quatro viagens a serviço do campus, e em 2024 vinte e seis viagens, considerando deslocamentos intermunicipais e interestaduais o destino mais frequentado é a cidade de Santarém-Pa, onde está a sede do campus universitário da (UFOPA). Durante as viagens foram utilizados veículos não oficiais da universidade. Logo, são englobados no Escopo 3 da metodologia *GHG Protocol* por estarem vinculados indiretamente nas emissões de gases de efeito estufa. A Tabela 1, a seguir, apresenta a quilometragem percorrida e o modal de transporte utilizado e a quantidade de emissão de tCO_2e (dióxido de carbono) anual.

Ano	Distância percorrida (km)	Emissão tCO_2e
2023	3.968	0,94
2024	1.612	0,35

Tabela 1: Tráfego hidroviário dos servidores
Fonte: Autores (2025).

A emissão de 2023 foi 0,94 toneladas de carbono emitido na atmosfera pela balsa utilizada para as travessias considerando apenas os dias em que houve deslocamentos do carro do *Campus* de Monte Alegre. Em 2024 houve redução nas emissões gerando aproximadamente 0,35 CO_2 (T). Abaixo a Tabela 2 apresenta as emissões considerando os deslocamentos aéreos.

Ano	Distância percorrida (km)	Emissão tCO_2e
2023	2.848	0,3
2024	3.346	0,36

Tabela 2: Tráfego aéreo das viagens dos servidores
Fonte: Autores (2025)

Em 2023 a emissão dos gases de GEE foi de aproximadamente 0,3 tCO_2e sendo a menor emissão considerando outros modais do Escopo 3. Este resultado é devido ao baixo deslocamento aéreo dos servidores do *campus* de Monte Alegre em comparação a outros modais de transporte, observou-se que entre os modais o carro é o mais utilizado nos deslocamentos entre as regiões. Quanto a metodologia para o cálculo ela pode sofrer variações no resultado pois neste trabalho considerou-se apenas as emissões de dióxido de carbono e não as outras emissões como o metano (CH_4). Pois para quantificar esses gases é necessário maior detalhamento nas informações dos dados como por exemplo: modelo da aeronave, tipo de combustível utilizado, essas informações, e não foram armazenadas pela gestão interna do *campus*. Logo se torna inviável quantificá-los, é importante que as instituições possam guardar no seu banco de dados internos esse tipo de detalhamento para que os inventários futuros possam apresentar maior precisão das emissões dos gases de GEE. A tabela 3 abaixo apresenta a quilometragem percorrida pelos servidores considerando os carros não oficiais da universidade. Considerou-se o deslocamento dos servidores para os aeroportos e ou outros destinos a serviço.

Ano	Distância percorrida (Km)	Emissão CO_2e (t)
2023	1.276	0,19
2024	388	0,06

Tabela 3: Distâncias percorridas no tráfego terrestre durante as viagens dos servidores
Fonte: Autores (2025).

Conforme a tabela 3 a emissão dos gases de GEE são relativamente irrisórias comparadas a emissão pelos trechos de balsas. A ferramenta GHG Protocol considerou as emissões dos gases biogênicos neste parâmetro, pois a combustão da gasolina gera outros gases como monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx) e hidrocarbonetos (HC). Destaca-se que há uma diferença discrepante ao comparar o fluxo de viagens utilizando o modal hidroviário a serviço da (UFOPA), conforme supramencionado em 2023 foram 64 viagens exponencialmente superior ao ano de 2024 com apenas 26 viagens. Estima-se que está diferença pode ter correlação com os recursos orçamentários financeiros disponibilizados a universidade, pois ao considerar os gastos com a "Gestão Institucional" identificou-se uma diminuição de verba entre 2023 e 2024. De acordo com dados disponibilizados no site da (UFOPA) pela Pró-reitora de planejamento e desenvolvimento institucional (PROPLAN), em formato *"Powerbi"*, apontou que a verba orçamentária disponível em 2023 foi maior que 2024, (TESOURO GERENCIAL DO GOVERNO FEDERAL, 2026) conforme representado na figura 4 abaixo.

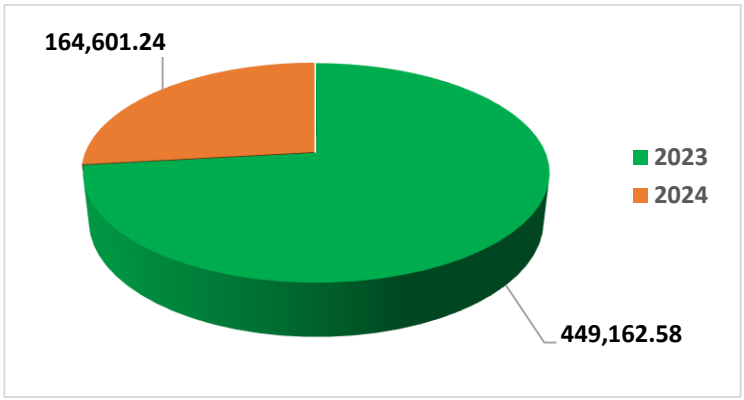


Figura 4: Valores disponíveis, em reais (R$), destinados à gestão institucional da (UFOPA).
Fonte: Autores (2026).

De acordo com o gráfico 4 o valor de quatrocentos e quarenta e nove mil e cento e sessenta de dois reais e cinquenta e oito centavos em (2023) matematicamente é 172,88% superior ao ano de (2024), pois havia disponível para a gestão institucional somente cento e sessenta e quatro mil e seiscentos e um reais e vinte e quatro centavos. Portanto, a partir desses dados pode-se inferir que a gestão financeira pública pode impactar diretamente nas reduções das emissões de (CO_2e). Observou-se que o contingenciamento de repasses da verba pública do poder executivo federal para a UFOPA refletiu na pegada de carbono da instituição. Os dados evidenciam uma peculiaridade no processo de redução do (GEE) da UFOPA, pois para o deslocamento dos servidores, na maioria das vezes irão utilizar as balsas para concluir seu trajeto, isso ocorre porque os campi da universidade estão em áreas cercadas por rios, lagos, igarapés o que torna os seus resultados diferentes de outras universidades que não utilizam o modal hidroviário com maior frequência.

Consolidação do escopo 3

No âmbito da quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do *campus* Monte Alegre da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) obteve como resultado do Escopo 3, os deslocamentos hidroviários, rodoviários e aéreos e apresentou 1,43 tCO_2equivalentes (tCO_2e) em 2023 e 0,77 tCO_2e em 2024. Ressalta-se que há uma limitação para encontrar os resultados do escopo 3 nos relatórios de GEE das universidades federais do Brasil, uma hipótese é que a ferramenta *GHG PROTOCOL* apresenta o escopo como não obrigatório sendo uma proposta voluntária a critério das instituições aplicar ou não. Porém ele deveria ser objeto de validação obrigatória, sendo critério de pontuação para contratação nas universidades, o fato de ser considerado emissões indiretas, não deveria ser uma quantificação voluntária. E sim uma motivação para que as empresas terceirizadas busquem contribuir para a redução da pegada de carbono. Pode se inferir que, se as empresas quando as não são submetidas a um critério de sustentabilidade, podendo participar livremente do processo seletivo e posterior contratação, tacitamente compreende-se a aceitação de uma lacuna que colabora para insustentabilidade ambiental no âmbito acadêmico, demostra-se contraditório nos discursos disseminados pela universidade, pois de um lado a instituição busca a redução da pegada de carbono, mas, quanto na prática por outro lado a mão de obra indireta que complementa os espaços se abstém do dever de contribuir com o meio ambiente ecologicamente equilibrado que é uma obrigação constitucional. Abaixo a figura 5 apresenta uma análise comparativa do Escopo 3, com outras universidades.

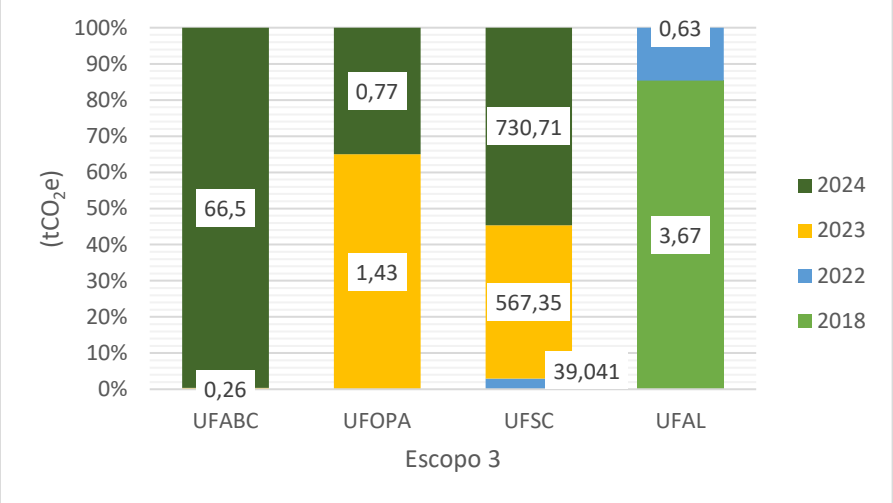


Figura 5: Comparação de (tCO_2e) com outras universidades federais de ensino superior.
Fonte: Autores (2026).

Conforme o gráfico acima das universidades que consideraram as emissões indiretas, destaca-se que apenas a Universidade Federal de Santa Catarina, (SETIC-UFSC, 2025), Universidade Federal do ABC, (COMITÊ ESTRATÉGICO DE SUSTENTABILIDADE DA UFABC, 2024), que apresenta relatórios consolidados anualmente pela instituição, as demais universidades apresentam os dados com bases em trabalho de conclusão de curso (TCC). Observa-se que a quantificação do escopo 3 nas universidades são mais difíceis de serem realizadas. De acordo com (TRINTINI, 2025, p.73) a falta de integração entre os departamentos responsáveis pelos dados de armazenamento, cadeia de suprimentos, compras, logística e finanças, é apontada por especialistas como uma das causas mais desafiadoras pela gestão e governança. Ao fazer uma análise comparativa das emissões do Escopo 3, percebe-se que cada universidade tem suas peculiaridades, há diferença no tamanho da infraestrutura e a localização geográfica a qual reflete na escolha dos modais de transporte mais utilizados, a UFOPA por exemplo tem menor emissão em relação a UFSC, uma hipótese é que a UFOPA obteve menos viagens do modal aéreo em relação a UFSC. A UFAL e a UFOPA são as universidades que mais se aproximaram em números das emissões (tCO_2e), sendo 2023 UFAL 3,67 tCO_2e e UFOPA 1,43 tCO_2e.

Os resultados demonstram a necessidade de realizar palestras no campus acadêmico visando a educação ambiental direcionado a redução da pegada de carbono, ensinar como coletar os dados, manipular e implementar uma política institucional que faça anualmente o relatório de todos os escopos da metodologia *GHG PROTOCOL.* Recomenda-se manter o trabalho iniciado do levantamento da pegada de carbono nos demais campus da UFOPA, pois isso irá reforçar e afirmar o compromisso com o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável na Amazonia. A universidade possuí um papel fundamental de retorno social através de projetos de impacto socioambiental onde ela está inserida. Com tudo embora as emissões de Gases não sejam consideradas altas, no campus de Monte Alegre em comparação com outras universidades estima-se que ainda há como reduzir a pegada de carbono.

A 15ª edição do *UI GreenMetric World University Rankings* 2024 apontou a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul sendo a 68ª universidade mais sustentável entre 1.477 instituições de todo o mundo. Esse resultado é fruto de compromissos e estratégias que a UFMS gerencia através do projeto "UFMS Carbono Zero". A universidade firmou compromissos através da realização de ações aplicadas as emissões dos gases de GEE internamente, adotou estratégias incentivando o uso de combustíveis renováveis dando preferência a maior quantidade de etanol nos veículos que são flex, realiza manutenção periódica dos veículos, promove o plantio de árvores com a finalidade do sequestro de carbono, opta por equipamentos com o selo Procel de eficiência energética e faz a elaboração e divulgação anual do inventário de emissões de GEE.

As medidas supramencionadas causam grande impacto positivo na redução dos gases de GEE e podem ser adotados pela UFOPA implementando novas metas. Além de conseguir a efetivação da redução (GEE) no âmbito institucional sugere-se que as metas sejam ampliadas nos processos seletivos de contratação com a administração pública, por exemplo: No edital incluiria como pré-requisito de seleção prioritariamente empresas que tem políticas internas direcionadas para a redução da pegada de carbono em suas atividades. O objetivo é uniformizar e ampliar as políticas de sustentabilidade em toda conjuntura da universidade. É imprescindível que o relatório anual da emissão de GEE da UFOPA seja publicado anualmente.

As boas práticas de sustentabilidade ambiental abrangem e unem grupos acadêmicos e projetos de pesquisa em todo o mundo com o objetivo comum: contribuir para a sadia e qualidade de vida na terra. No Brasil existe uma Rede de construção, contribuição e disseminação dos projetos de sustentabilidade ambiental, intitulada como Instituições de Ensino Superior para o Desenvolvimento Sustentável (UniSustentável). A rede visa promover um ambiente de cooperação comunicação e intercâmbio entre as instituições que queiram alavancar seus projetos que estimulam a sustentabilidade intra e entre as universidades. A iniciativa foi destaque no relatório final das Nações Unidas (ONU) ressaltou que a rede está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 17). A Rede foi lançada em 2023 na UFMS, sugere-se que a (UFOPA) possa buscar o diálogo com a Rede e desenvolver parcerias institucionais e tornar-se membra da Rede UniSusténtavel, as discussões proporcionam um intercâmbio de ideias e troca de saberes dentro da temática do desenvolvimento sustentável direcionado a redução da pegada de carbono e maior compreensão da utilização das ferramentas existentes já implementadas em outras universidades.

Considerações Finais

A prática individual e coletiva da pegada de carbono é essencial para a saúde ambiental do planeta. Sem a redução dos gases de efeito estufa as mudanças climáticas continuarão acontecendo e causando preocupação socioambiental. Por isso sugere-se que a universidade busque implementar o projeto de quantificação de gases do efeito estufa continuamente em todos os campi. Para o desenvolvimento da metodologia do *GHG PROTOCOL,* é importante que haja um curso de capacitação com os servidores de setores específicos da universidade no departamento que é responsável pela compra de passagens, cadeia de suprimentos, compras e logística. Pois é necessário que seja armazenado dados específicos da viagem como: modelo do veículo, combustível, modelo de aeronave, quantidade das diárias qual tipo de modal de transporte serão utilizados durante toda a viagem. As práticas da redução da pegada de carbono são de suma importância paras as universidades além de contribuir com o desenvolvimento sustentável pois proporcionam visibilidade no âmbito nacional e internacional e ajudam na captação de recursos para o desenvolvimento de projetos na comunidade acadêmica e contribuição social nos territórios.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 1.806, de 6 de janeiro de 1953. **Dispõe sobre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1953. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l1806.htm. Acesso em: 1 set. 2025.

BRASIL. Universidade Federal do Oeste do Pará. **Plano de Desenvolvimento Institucional (PDI)** 2024–2031. Aprovado pelo Conselho Universitário em 7 set. 2023. Atualizado em 8 out. 2024 (Portaria 33/2024-Proplan). Disponível em: https://pdi.ufopa.edu.br/pdi/pdi-2024-2031-1/pdi-2024-2031/. Acesso em: 1 set. 2025.

CARBON REPORT. **Concentrações globais de CO2 ficaram 50% acima da era pré-industrial pela primeira vez em 2022**. Disponível em: https://carbonreport.com.br/. Acesso em: 24 mar. 2026.
COMITÊ ESTRATÉGICO DE SUSTENTABILIDADE DA UFABC. Inventário de emissões de gases de efeito estufa da UFABC. 2024. Disponível em: <https://inventario-gee.pesquisa.ufabc.edu.br/>. Acesso em: 23 mar. 2026.

FUNDACIÓN AMAZÔNIA SUSTENTÁVEL (FAS). **Amazônia Legal: entenda sua importância.** Disponível em: https://fas-amazonia.org/amazonia-legal-entenda-sua-importancia/. Acesso em: 1 set. 2025.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa.** 6.ed. São Paulo: Atlas 2017. INESC, Logística no Médio Tapajós: O Caso de Itaituba-Miritituba. Instituto de Estudos Socioeconômicos. Disponível em: https://www.inesc.org.br/wp-content/uploads/2021/03/O-caso-de-Itaituba-Miritituba_V11.pdf. Acesso em: nov. 2022.

JESUS, Leila da Graça de; SANTOS, Marcos Ronielly da Silva; ROCHA, Nívia Cristina Vieira; MOTA, Maria Aurora Santos da. **Estudo do balanço hídrico e classificação climática para o município de Monte Alegre-PA** (*Water balance and climatic classification of Monte Alegre, Pará, Brazil*). *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 643–651, 2018.

SANTOS, Romildo Lourenço dos. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEE)**: *estudo de caso na Universidade Federal de Alagoas, Campus Sertão*. 2024. 139 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.

SETIC-UFSC. Inventário de Emissões. **UFSC Sustentável**, 3 jul. 2025. Disponível em: https://ufscsustentavel.ufsc.br/inventario-de-emissoes. Acesso em: 23 mar. 2026. '
SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA, OBSERVATÓRIO DO CLIMA. SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **SEEG**, 2024. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br. Acesso em: 30 mar. 2026.

Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia – SUDAM. **Legislação da Amazônia**. *Portal Gov.br – SUDAM*, Publicado em 13 out. 2020; atualizado em 10 mar. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/sudam/pt-br/acesso-a-informacoes/institucional/legislacao-da-amazonia. Acesso em: 1 set. 2025.

TESOURO GERENCIAL DO GOVERNO FEDERAL. PROPLAN - **Pró-Reitoria de Planejamento e Desenvolvimento Institucional**. 29 jan. 2026. Disponível em: <https://proplan.ufopa.edu.br/proplan/orcamento/execucao-orcamentaria/>. Acesso em: 23 mar. 2026.

TRINTINI, C. R. S. **Escopo 3: Desafios e Oportunidades para as Empresas Brasileiras no Reporte de Emissões de Gases de Efeito Estufa.** 2025. p. 144. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/266428. Acesso em: 20 mar. 2026.

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. **UFMS avança em *ranking* de universidades mais sustentáveis da América Latina e do mundo.** Campo Grande, 23 dez. 2024. Disponível em: https://dides.ufms.br/ufms-avanca-em-ranking-de-universidades-mais-sustentaveis-da-america-latina-e-do-mundo/. Acesso em: 1 set. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL – UFMS. **Programa UFMS Carbono Zero: Programa de Redução de Gases de Efeito Estufa**. Campo Grande: UFMS, 2021. Disponível em: https://dides.ufms.br/ufms-carbono-zero/. Acesso em: 27 set. 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. ***Greenhouse Gas concentrations hit record high. Again.*** Media Centre, 15 nov. 2023. Disponível em: https://wmo.int/news/media-centre/greenhouse-gas-concentrations-hit-record-high-again. Acesso em: 30 jul. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **The Greenhouse Gas Protocol:** A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised edition. Washington, DC: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004.

INFLUENCE OF SOLAR RADIATION ON THE CO2 DYNAMICS IN A CHAMBER WITH SPATHIPHYLLUM WALLISII

1 Thiago Schactae de Almeida, 2 Emílio Graciliano Ferreira Mercuri, 3 Steffen Manfred Noe
1 Universidade Federal do Paraná, e-mail: thiago.schactae@ufpr.br; 2 Universidade Federal do Paraná, e-mail: emilio@ufpr.br; 3Estonian University of Life Sciences, e-mail: steffen.noe@emu.ee

Keywords: Internet of Things (IoT); Photosynthesis; Respiration.

Abstract

Assessing carbon fluxes in natural environments and their influencing factors can be challenging; however, the application of technological solutions such as IoT, sensor correction, and continuous monitoring can help address this issue. In this context, this study employed a CO_2 monitoring chamber with a confined plant at a laboratory. We used SCD41 and K-30 sensors to monitor CO_2 concentrations, temperature, and relative humidity, with data transmitted, stored and visualized through a layered MQTT, InfluxDB, Node-RED and Grafana (MING) network infrastructure at a microcomputer. Solar radiation data were used to establish relationships with the observed measurements. The dataset was processed using machine-learning algorithms Random Forest, Random Forest with time lags, and multiple linear regression. The results indicated that CO_2 concentrations increase with temperature and solar radiation. The correction of SCD41 sensor data using the K-30 sensor as a reference showed a significant improvement in the obtained measurements. The Random Forest model with temporal lags had the best performance in correcting the data from the SDC41 sensors.

Introduction

To estimate the mass balance of the global carbon cycle, two main interfaces are considered: the exchange between water bodies and the atmosphere, and the exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Quantifying global-scale changes resulting from variations in the carbon cycle, particularly through CO_2 dynamics, requires knowledge of vegetation cover, land use, and the amount of carbon stored in the biosphere. Differences in carbon fluxes are observed in areas where natural vegetation has been altered for agriculture, monoculture cultivation, or energy production (HOUGHTON, 2001).

The use of sensors integrated with cloud-based storage services enables more sophisticated approaches, such as the application of machine learning techniques (VITALI; ARRU; MAGNANINI, 2023). The Internet of Things (IoT) has contributed to the development of tools for ecosystem monitoring with high accuracy, low cost, and task automation (LI et al., 2019). The combination of high-resolution data with advanced analytical methods helps overcome limitations, enables access to remote areas, improves monitoring practices, and increases the spatial and temporal resolution of data (BROWN et al., 2024).

The integration of IoT with sensor technologies allows the development of advanced strategies for monitoring and managing carbon emissions (ZHANG et al., 2024). Furthermore, techniques for CO_2 sensor calibration can be applied to improve data quality, such as the identification and removal of outliers prior to sensor calibration (OKAFOR et al., 2024). Regarding sensor selection, the use of low-cost sensors for monitoring carbon fluxes, combined with IoT integration and calibration against reference sensors, has proven effective in studies that require higher accuracy. An example includes the modeling of photosynthetic processes and plant respiration (DUC et al., 2020; CAPPELLI et al., 2024).

Within a soil chamber, CO_2 dynamics result from the balance between two opposing biological processes: respiration and photosynthesis. Soil respiration, carried out by microorganisms (through organic matter decomposition) and plant roots, continuously releases CO_2 into the chamber, increasing its concentration over time. Conversely, in the presence of photosynthetic organisms (such as mosses, algae, or plants within the chamber) and light availability, photosynthesis occurs, consuming CO_2 for biomass production and reducing its concentration. Thus, under dark conditions, CO_2 concentration tends to increase due to respiration (positive flux), whereas under illuminated conditions, a reduction or stabilization in CO_2 levels may occur, depending on photosynthetic intensity. The temporal variation of CO_2 measured within the chamber therefore reflects the net balance between these processes and is essential for estimating carbon fluxes in the soil–plant–atmosphere system (BAHN et al., 2009; LANKREIJER et al., 2009; PAUL et al., 2023).

Therefore, the main objective of this study was to monitor CO_2 concentration using a monitoring chamber in which the plant Spathiphyllum wallisii (commonly known as Peace Lily) was confined. As a specific objective, the influence of solar radiation on CO_2 dynamics was investigated by using a box to block the entry of sunlight into the chamber. To this end, three SCD41 sensors and one K-30 sensor were employed, all connected to microcontrollers that transmitted the data to a Raspberry Pi 5. The data were then sent via MQTT to the online platforms Node-RED, InfluxDB, and Grafana, through which CO_2 concentration, temperature, and relative humidity were monitored.

Materials and Methods

The experiment was divided into three distinct phases: (i) monitoring of CO_2 concentration, temperature, and relative humidity with the chamber uncovered; (ii) monitoring of these variables with the chamber covered; and (iii) monitoring of the variables after the removal of the chamber cover.

1. Chamber

A chamer with dimensions of 29 × 29 × 29 cm was constructed, corresponding to a volume of 24.389 liters. It was made of acrylic material with a thickness of 5 mm. Figures 1 and 2 illustrate the chamber setup in the laboratory, as well as the placement of sensors within the chamber and peripheral equipment, such as the Raspberry Pi, a protoboard with an Arduino Nano, and Wemos and NodeMCU microcontrollers. Sensor SCD41C is located closest to the plant and K-30 sensor is positioned in the acrylic wall.



Figure 1 – Front view of the chamber, highlighting the K-30 sensor and the Raspberry Pi.



Figure 2 – Side view of the chamber, highlighting the layout of the SCD41 sensors.

2. Equipment

Three SCD41 sensors were used (two connected to Wemos Mini microcontrollers and one connected to a NodeMCU), capable of measuring CO_2 concentration (ppm), relative humidity (%), and temperature (°C). The sensors were placed inside the chamber and identified as Sensor A, B, and C, with Sensor C corresponding to the NodeMCU. Additionally, one K-30 sensor was used to measure CO_2 concentrations simultaneously with the SCD41 sensors. The K-30 sensor was positioned at a height between 12 and 15 cm. All mentioned sensors were connected to a Raspberry Pi 5, which transmitted the data via the internet.

The SCD41 sensor belongs to the class of photoacoustic sensors, which use sound waves for gas detection, in this case, CO_2. Its detection range spans from 0 to 40,000 ppm, with an accuracy of ±40 ppm (SENSIRION, 2026). The K-30 sensor belongs to the class of Non-Dispersive Infrared (NDIR) sensors for gas detection, such as CO_2. This sensor has a detection range between 0 and 5,000 ppm, with an accuracy of ±30 ppm (SENSEAIR, 2026).

The sensors were positioned at different heights: sensor A between 23 and 24 cm, sensor B between 15 and 16 cm, sensor C at between 10 and 11 cm e K-30 between 14 and 18 cm.

3. Network Infrastructure

The MQTT, InfluxDB, Node-RED and Grafana (MING) infrastructure was employed, using the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol for data transmission, Node-RED for data reception, and the InfluxDB and Grafana platforms for data storage, visualization, and dashboard development. Figure 2 illustrates this process.

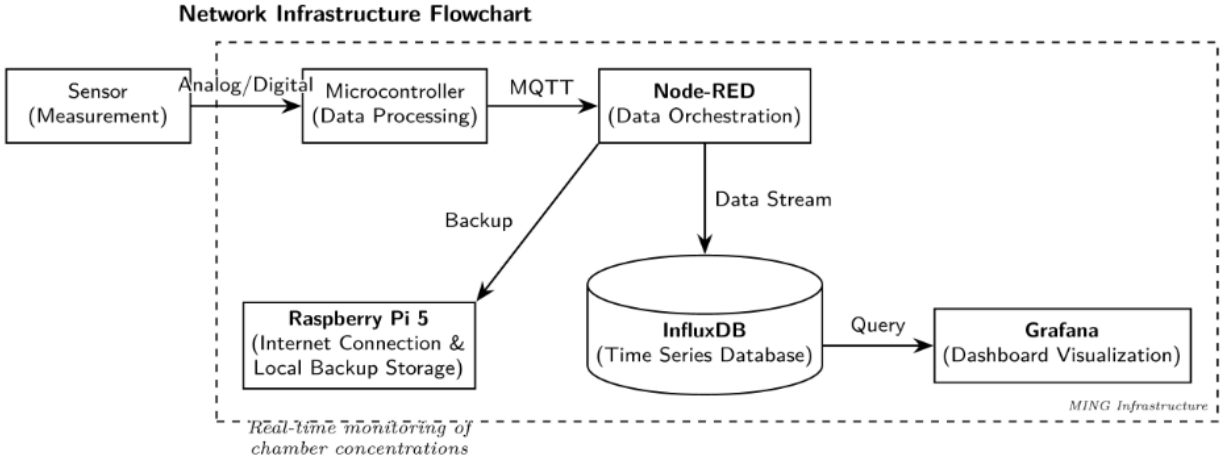


Figure 3 – Flowchart of the data pipeline of the MING framework.

4. Experimental Procedure

The plant Spathiphyllum wallisii, commonly known as Peace Lily ("Lírio-da-paz – Spathiphyllum wallisii – Laboratório de Sistemática de Plantas", 2023), was confined within the previously described chamber, and variations in temperature, relative humidity, and CO_2 concentrations were continuously monitored from 02/26/2026 to 03/28/2026. The plant was regularly irrigated (approximately once per week), during which the chamber was briefly opened. For a period of seven days (from 03/11/2026 to 03/18/2026), the chamber was covered with a cardboard box to prevent the entry of light.

Solar radiation data were obtained from the INMET website (INMET, 2026) from the automatic weather station A807, located at the Centro Politécnico of the Federal University of Paraná (UFPR), at latitude −25.4486111o and longitude −49.23055554o, at an altitude of 922.91 meters above sea level, for the period from 02/24/2026 to 03/23/2026.

5. Statistics

The collected data were preprocessed, with missing values (NaN) removed, and the variables were separated into independent and dependent groups. Subsequently, the dataset was divided into training and testing sets.

The Random Forest (RF) algorithm was applied using 1000 decision trees with a maximum depth of 12. The model was later extended by incorporating temporal lags, and a Multiple Linear Regression (MLR) was also performed for comparison purposes. The models were evaluated using the following metrics: coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean square error (MAE), standard deviation (STD) and the correlation between observed and predicted values.

A Taylor Diagram was also used to compare simulated and observed results. This approach enabled the assessment of standard deviation, correlation coefficient, and centered error. All procedures were carried out in a Python environment.

Results and Discussion

The data collected over a period of approximately one month comprise 85,818 records, obtained between February and March 2026. Table 1 presents a summary of the CO_2 concentration values during this period. It can be observed that the SCD41-A sensor exhibits the highest mean concentration among the sensors, followed by sensor C, then sensor B, and finally the K-30 sensor. It is also noted that the standard deviation follows the same decreasing order, with relatively significant values.

Table 1 – Summary of descriptive statistics for CO_2 concentrations (ppm).

	K-30	SCD41-A	SCD41-B	SCD41-C
Mean	504,60	640,24	589,87	603,62
Minimum value	285,80	372,00	380,00	380,67
Maximum value	661,87	868,00	782,00	780,53
Standard deviation	77,46	99,89	78,03	85,25

Figure 4a shows the behavior of the sensors in a time series plot. It can be observed that sensor A maintains higher concentration values throughout most of the monitoring period, with a temporary inversion relative to sensor C in the days following the removal of the chamber cover. However, after day 26, sensor A returns to its previous behavior. Sensors B and C exhibit very similar values during the period prior to chamber coverage and again after day 26. The K-30 sensor (reference sensor) consistently shows lower values compared to the other sensors throughout the monitoring period. The chamber coverage produced a notable effect on the sensor readings, inducing a stabilization of CO_2 measurements across all sensors. During this period, concentrations remained within a range of approximately 500 to 700 ppm. After the removal of the cover, the values resumed oscillation, indicating the reactivation of the plant's photosynthetic processes.

Figure 4b presents the time series of temperature data collected by the SCD41 sensors (A, B, and C). Unlike the CO_2 concentrations, the temperature values obtained from the sensors are very similar. No significant influence of the chamber coverage on temperature data can be observed. Instead, only the typical daily oscillation between minimum and maximum temperatures is evident. Table 2 summarizes the statistical analysis of the temperature data, showing the similarity between the mean values recorded by each sensor, as well as the low standard deviation among them.

Table 2 – Summary of descriptive statistics for temperature (°C).

	SCD41-A	SCD41-B	SCD41-C
Mean	25,24	25,47	24,58
Minimum value	19,18	19,57	18,64
Maximum value	33,37	32,38	33,60
Standard deviation	2,52	2,42	2,43

Figure 4c presents the time series of relative humidity for the analyzed period. A characteristic oscillation associated with temperature can be observed, as relative humidity reaches its lowest values during periods of maximum temperature and its highest values during periods of minimum temperature. The chamber coverage produced a noticeable effect on relative humidity data, with the formation of a plateau during the first two days of coverage. Subsequently, an oscillatory pattern between minimum and maximum values emerges; however, the maximum values tend to stabilize. After the removal of the cover, more pronounced oscillatory patterns are observed again. Table 3 summarizes the statistical analysis of the relative

humidity data. The values recorded by the sensors are very similar, with the SCD41-C sensor presenting, on average, the highest relative humidity values. However, the differences among the three sensors are small, and the data exhibit low dispersion, as indicated by the standard deviation.

Table 3 – Summary of descriptive statistics for relative humidity (%).

	SCD41-A	SCD41-B	SCD41-C
Mean	89,79	87,88	92,85
Minimum value	76,87	78,52	78,44
Maximum value	100,00	100,00	100,00
Standard deviation	3,37	3,38	3,10

Figure 4d shows the values of incident solar radiation during the experimental period. It can be observed that lower radiation levels occurred on days with lower temperatures; however, no clear relationship is evident between solar radiation and the CO_2 concentrations monitored during the period when the chamber was covered.

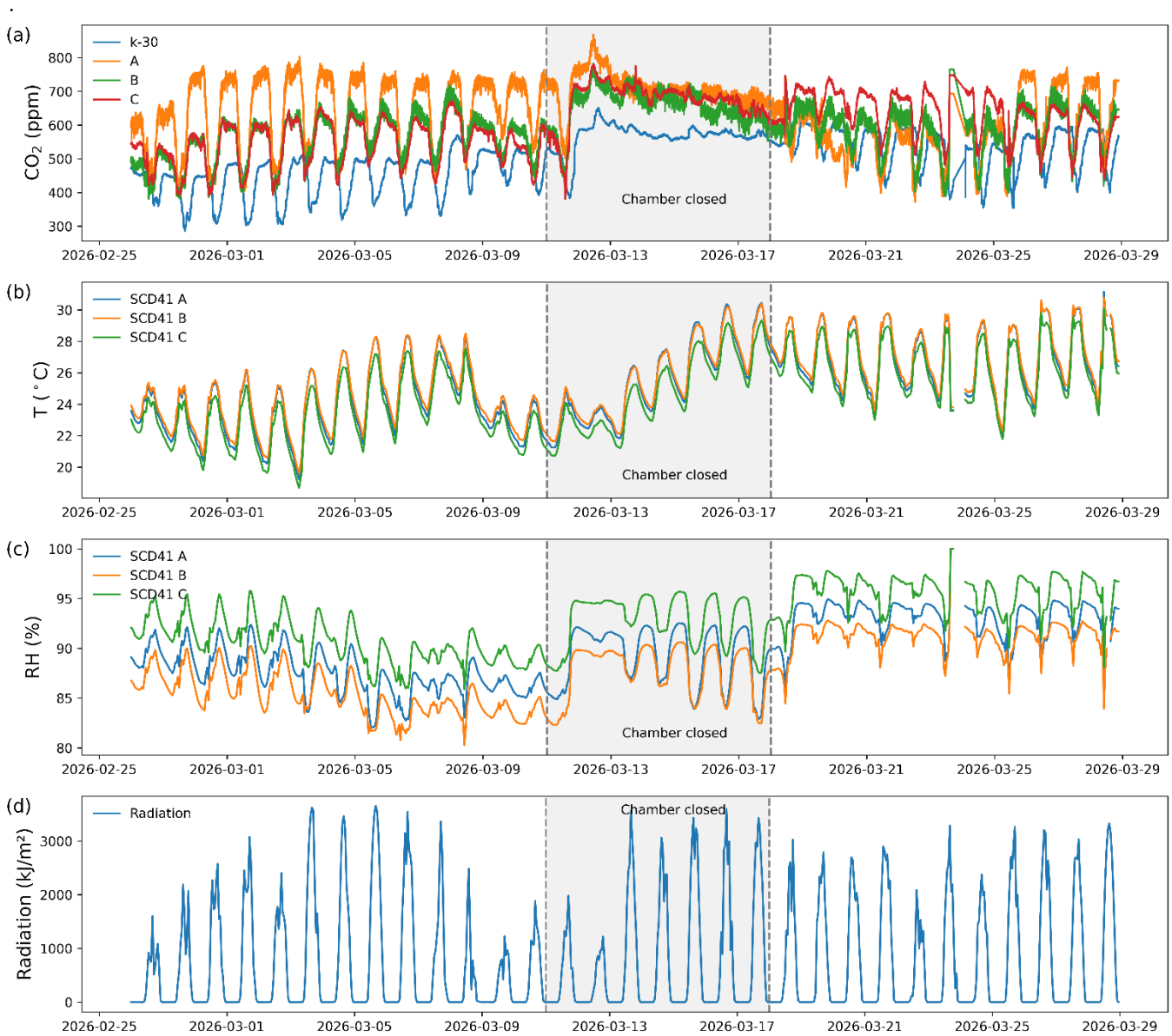


Figure 4 – (a) Time series of CO2 concentration (ppm) inside chamber for 3 SCD41 sensors and K-30 sensor. The gray shaded area indicates the period when the chamber was closed with a cardboard box. (b) Time series of temperature (°C) inside chamber for 3 SCD41 sensors. (c) Time series do relativity humidity (%) inside the chamber for 3 SCD41 sensors. (d) Time series of radiation (kJ/m²) for automatic station on polytechnic center of UFPR. Dashed vertical gray lines and shaded light gray area indicate the period from 03/11/2026 to 03/18/2026 when the chamber was covered to prevent the entry of light.

During the chamber coverage period, a reduction in photosynthetic processes was observed due to the absence of light, leading to the predominance of plant respiration. As a result, CO_2 concentrations increased and subsequently stabilized. Macagga et al. (2024) reported similar findings in experiments using low-cost sensors, including the K-30, to evaluate evapotranspiration fluxes. In their study, chamber coverage was used to block light input, resulting in an increase in CO_2 concentration until stabilization within a specific range. These findings corroborate the results obtained in the present study, demonstrating that no photosynthetic activity occurred when the plant is deprived of light. The same authors also reported that increases in temperature are associated with higher CO_2 concentrations, likely due to enhanced respiratory processes. Regarding relative humidity, it has been observed that this parameter can affect the accuracy of Photoacoustic-NDIR (Non-Dispersive Infrared) sensors; however, the K-30 sensor demonstrated reliable performance even under high relative humidity conditions, reaching values of up to 85%.

Figure 5 shows the relative importance of the studied parameters, where the most important variables are displayed at the bottom of the graph. The CO_2 concentration measured by Sensor C and solar radiation were identified as the most important features in the Random Forest model for predicting values. Temperature and humidity from Sensors B and C showed intermediate importance in the model.

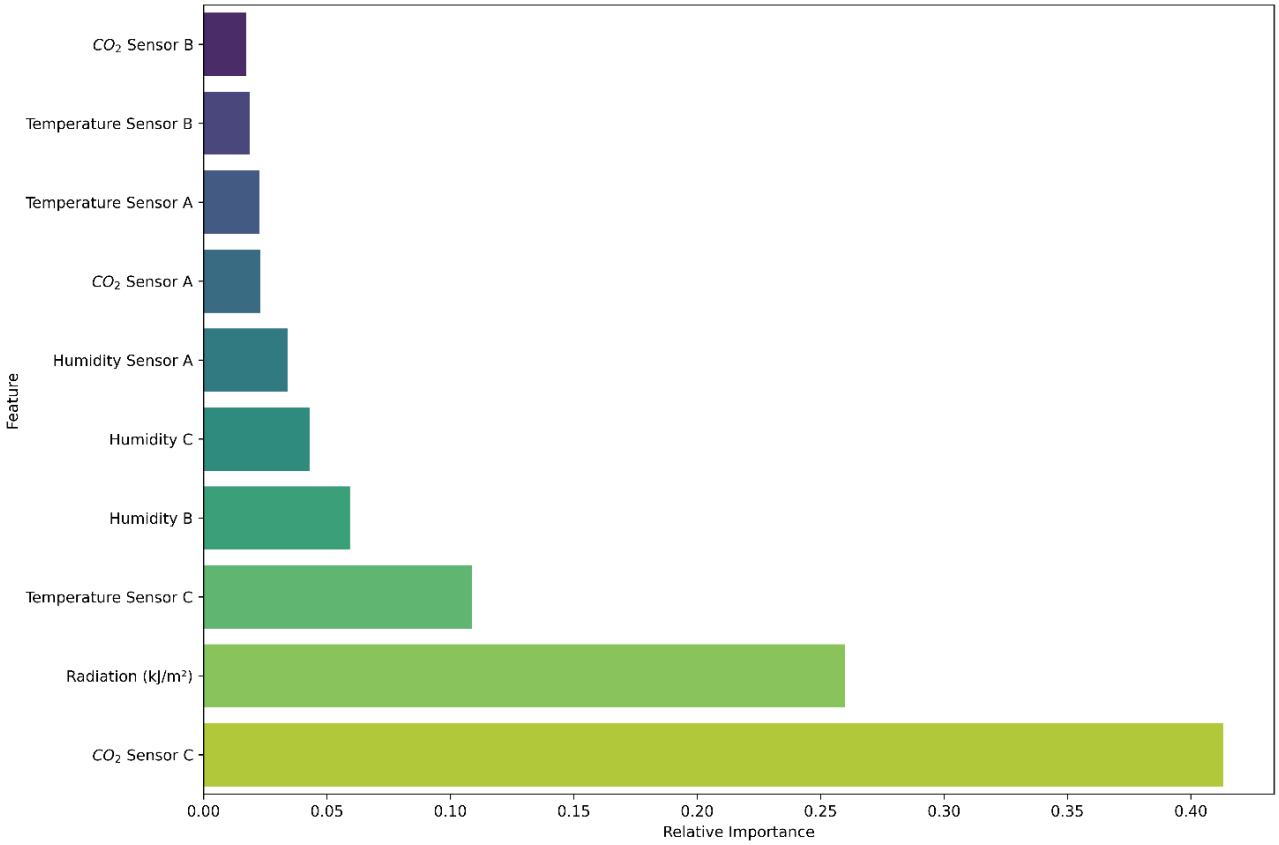


Figure 5 – Relative importance of features in the Random Forest model for Sensors A, B, C, and the K-30 sensor

Figure 6 shows the parity plot, where the correlation between the predicted values from the Random Forest model and the observed values measured by the K-30 sensor can be observed. The linear regression fit is represented by the orange line, while the red dashed line indicates the ideal agreement (y = x) between predicted and observed values. A strong correlation is observed, with $R^2 = 0.994$ and RMSE = 5.8 ppm. The linear regression equation is also displayed in the upper right corner of the figure. It can also be observed that the linear regression line and the dashed parity line (x = y) are very close to overlapping.

Cai et al. (2024) used K-30 sensors to monitor CO_2 concentrations in chambers and observed that applying sensor calibration techniques such as RMSE-based approaches incorporating factors like temperature, relative humidity, and atmospheric pressure improves the accuracy of the collected data. In their study, the data error was reduced from ±30 ppm to values ranging between 0.4 and 7 ppm. The authors' results are consistent with those obtained in the present study, as well as with the observed trend of increasing CO_2 concentration with temperature, also reported by Macagga et al. (2024), likely because of plant evapotranspiration.

Table 4 shows the metric values generated by applying the RF, RF with time lags, and MLR prediction models. It is noted that the MLR model stands out as the model with the lowest predictive capacity compared to the RF models, because MLR underestimates the variance of the observed data, as we can see in figure 7.

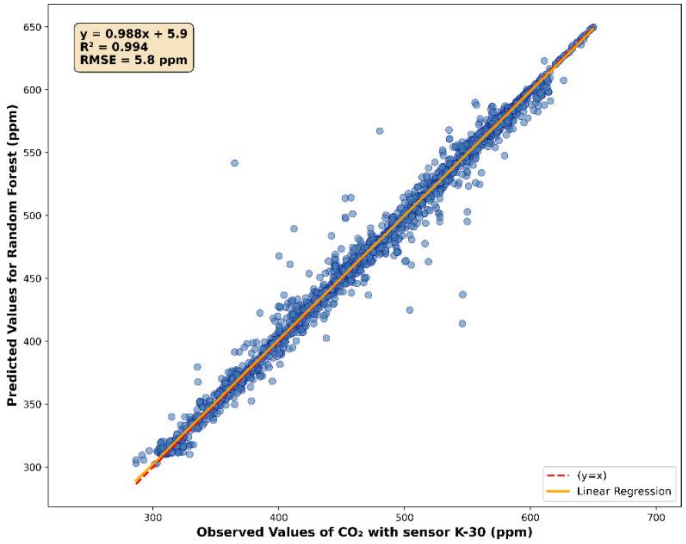


Figure 6 – Parity plot of predicted values from the Random Forest model compared to observed values from the K-30 sensor, with the linear regression fit shown as the orange line

Table 4 - Metric values of the models used: Random Forest, Random Forest with Temporal Lags, and Multiple Linear Regression.

Metrics	RF	RF with Temporal Lags	MLR
RMSE	5.833	9.049	50.445
MAE	3.451	4.523	40.148
R^2	0.994	0.988	0.638
STD Actual	83.906	83.906	83.906
STD Predicted	77.163	82.917	66.494
Correlation	0.997	0.994	0.799

Zimmerman et al. (2018) they investigated different calibration methods for low-cost sensors, employing linear regression and machine-learning-based models using RF. The authors concluded that the RF-based correction model achieved superior performance, with a relative error of 2%. Sengupta et al. (2026) they use a machine-learning algorithm based on RF and RF with the application of temporal lags. In their research, the authors included an algorithm that allowed them to observe temporal dependencies and non-linear interactions between the sensors and environmental variables. Overall, the authors observed that the technique with temporal lags outperformed the RF algorithm for the calibration of low-cost sensors.

Figure 7 presents a Taylor diagram, indicating that the RF model with temporal lags yields predictions closest to the observed values. This diagram compares the performance of the predictive models in this study against data observed by the K-30 sensor, using correlation, standard deviation, and RMSE.

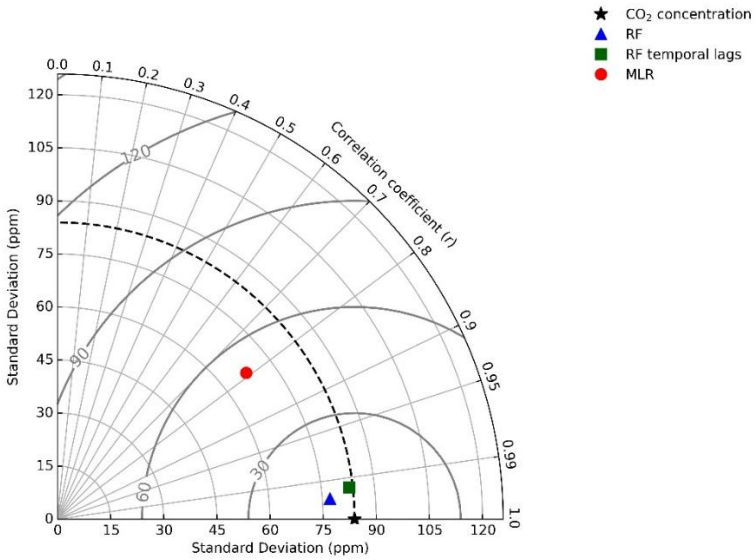


Figure 7 – Taylor diagram for CO_2 concentration, with the K-30 sensor as reference (black star), and adjusted values from the Random Forest model (blue triangle), Random Forest with temporal lags (green square), and multiple linear regression (red circle).

Final Considerations

The present study identified relationships among the variables CO_2 concentration, temperature, relative humidity, and solar radiation. It was observed that the reduction in CO_2 concentration inside the chamber occurs concurrently with increases in temperature and solar radiation. In contrast, an increase in relative humidity is associated with higher CO_2 concentrations. These results are influenced by the photosynthetic and plant respiration processes occurring inside the chamber due to the confined plant.

The Random Forest model with temporal lags showed the best predictive performance, followed by the Random Forest model without temporal lags, while the multiple linear regression model presented the lowest performance. In detail, the Random Forest with temporal lags is the most suitable model for correcting the values of low-cost sensors.

This finding demonstrates the feasibility of using low-cost sensors for air quality monitoring when data correction techniques based on reference sensors are applied. This study also highlights the integration of low-cost sensors and IoT technologies to develop air quality monitoring systems.

Studies using sensors positioned at the same height and at the same distance from the target can improve the calibration results of the SCD41 sensors.

Acknowledgments

This work was partially financed by CAPES-Brazil—Finance Code 001, the Estonian Research Council (grant PRG 1674), and the European Union's Horizon 492 2020 Research and Innovation Programme (grant agreement no. 871115) ACTRIS IMP. T.S.A. would like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for the support and funding of this research, without which this work would not have been possible.

References

BAHN, M.; SCHMITT, M.; SIEGWOLF, R.; RICHTER, A.; BRÜGGEMANN, N. Does photosynthesis affect grassland soil-respired CO2 and its carbon isotope composition on a diurnal timescale? New Phytologist, v. 182, n. 2, p. 451–460, 11 fev. 2009.

BROWN, L. E.; MAAVARA, T.; ZHANG, J.; CHEN, X.; KLAAR, M.; MOSHE, F. O.; BEN-ZUR, E.; STEIN, S.; GRAYSON, R.; CARTER, L.; LEVINTAL, E.; GAL, G.; ZIV, P.; TARKOWSKI, F.; PATHAK, D.; KHAMIS, K.; BARQUÍN, J.; PHILAMORE, H.; GRADILLA-HERNÁNDEZ, M. S.; ARNON, S. Integrating sensor data and machine learning to advance the science and management of river carbon emissions. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, p. 1–24, 24 nov. 2024.

CAPPELLI, I.; PARRI, L.; TANI, M.; VIGNOLI, V.; FORT, A. An IoT System for the Measurement and the Interpretation of the Photosynthesis-Related CO2 Fluxes. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 74, p. 1–11, 25 dez. 2024.

HOUGHTON, R. A. Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850 to 1990. OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information), 22 fev. 2001.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. 2026.

LANKREIJER, H. J. M.; LINDROTH, A.; STRÖMGREN, M.; KULMALA, L.; PUMPANEN, J. Forest floor CO2 flux measurements with a dark-light chamber. Biogeosciences Discuss, v. 6, p. 9301–9329, 2009.

LI, X.; ZHAO, N.; JIN, R.; SHAOMIN, L.; SUN, X.; WEN, X.; WU, D.; ZHOU, Z.; GUO, J.; CHEN, S.; XU, Z.; MINGGUO, M.; WANG, B.; QU, Y.; WANG, X; WU, F.; ZHOU, Y. Internet of Things to network smart devices for ecosystem monitoring. Science Bulletin, v. 64, n. 17, p. 1234–1245, set. 2019.

Lírio-da-paz – Spathiphyllum wallisii – Laboratório de Sistemática de Plantas. Disponível em: <https://sites.usp.br/jardimdabotanicausprp/lirio-da-paz-spathiphyllum-wallisii/>.

MACAGGA, R.; ASANTE, M.; SOSSA, G.; ANTONIJEVIÉ, D.; DUBBERT, M.; HOFFMANN, M. Validation and field application of a low-cost device to measure CO2 and evapotranspiration (ET) fluxes. Atmospheric Measurement Techniques, v. 17, n. 4, p. 1317–1332, 23 fev. 2024.

DUC, N. T.; SILVERSTEIN, S.; WILK, M.; CRILL, P.; BASTVIKEN, D.; VARNER, R, K. Technical note: Greenhouse gas flux studies: an automated online system for gas emission measurements in aquatic environments. Hydrology and Earth System Sciences, v. 24, n. 7, p. 3417–3430, 6 jul. 2020.

OKAFOR, N. U.; INGLE, R.; SAUNDERS, M.; DELANEY, D. T. Assessing and Improving IoT Sensor Data Quality in Environmental Monitoring Networks: A Focus on Peatlands. IEEE Internet of Things Journal, v. 11, n. 24, p. 40727–40742, 4 set. 2024.

PAUL, C.; PIEL, C.; SAUZE, J.; PASQUIER, N.; PRIÉ, F.; DEVIDAL, S.; JACOB, R.; DAPOIGNY, A.; JOSSUOND, O.; MILCU, A.; LANDEIS, A. Determination of respiration and photosynthesis fractionation factors for atmospheric dioxygen inferred from a vegetation–soil–atmosphere analogue of the terrestrial biosphere in closed chambers. Biogeosciences, v. 20, n. 5, p. 1047–1062, 16 mar. 2023.

SENGUPTA, A.; BUSH, T.; MARNER, B.; PÉREZ, J. M.; CLAINCHE, S. L. A temporal deep learning framework for calibration of low-cost air quality sensors. Disponível em: <https://arxiv.org/html/2604.21527v1>. Acesso em: 24 abr. 2026.

SENSEAIR. K30: sensor de dióxido de carbono (CO_2) baseado em tecnologia NDIR. Disponível em: https://senseair.com/product/k30/. Acesso em: 10 abr. 2026.

SENSIRION. SCD4x Datasheet: Breaking the size barrier in optical CO_2 sensing. Version 1.7. April 2025. Disponível em: https://www.sensirion.com. Acesso em: 8 abr. 2026

VITALI, G.; ARRU, M.; MAGNANINI, E. A Scalable Device for Undisturbed Measurement of Water and CO2 Fluxes through Natural Surfaces. Sensors, v. 23, n. 5, p. 2647–2647, 28 fev. 2023.

ZIMMERMAN, N.; PREST, A. A.; KUMAR, S. P. N.; GU, J.; HAURYLIUK, A.; ROBINSON, E.; ROBINSON, A. L.; SUBRAMANIAN, R. A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. Atmospheric Measurement Techniques, v. 11, n. 1, p. 291–313, 15 jan. 2018.

ZHANG, Y.; WANG, Z.; HU, J.; PU, C. Intelligent management of carbon emissions of urban domestic sewage based on the Internet of Things. Environmental research, v. 251, p. 118594–118594, 1 jun. 2024.

EXPERIÊNCIAS COM A DESCARBONIZAÇÃO DE OPERAÇÕES PORTUÁRIAS NO BRASIL

1 Andreas Friedrich Grauer, 2 Débora Lia Perazzoli, 3 Matheus Bueno Patrício
1 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: andreas.grauer@envexengenharia.com.br; 2 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail:debora.perazzoli@envexengenharia.com.br; 3 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: matheus.bueno@envexengenharia.com.br

Palavras-chave: Mitigação de emissões de GEE; Transição Energética; Net Zero.

Resumo

O setor portuário é essencial para o desenvolvimento econômico global, porém representa emissões importantes de gases de efeito estufa (GEE). Tendo em vista o compromisso do Brasil de zerar as emissões de GEE até 2050, este estudo analisou a situação de descarbonização do setor portuário brasileiro, com base em questionários enviados para 135 atores (portos públicos, terminais, empresas de energia e associações) em 2023. O objetivo foi verificar quais iniciativas de descarbonização estavam sendo executadas ou projetadas, além de identificar eventuais barreiras de natureza tecnológica, mercadológica, regulatória ou financeira. Adicionalmente, foram analisadas as ações realizadas ou projetadas reportadas em Inventários de gases de efeito estufa (GEE) e Relatórios de Sustentabilidade ou Planos de Descarbonização publicados. Este levantamento demonstrou que apenas 19% dos portos públicos tinham um inventário GEE elaborado. Dos terminais, a porcentagem era maior, 65%. Uma meta de redução foi confirmada por 7% dos portos públicos e por 26% dos terminais. São números que evidenciam uma lacuna importante entre a situação atual e a meta brasileira de zero emissão líquida em 2050. A redução necessária envolve, em primeiro lugar, as emissões de navios, uma vez que eles contribuem tipicamente com 90% ou mais das emissões totais. As medidas mais eficazes na redução das emissões de navios se resumem a duas abordagens: 1) instalação de *Onshore Power Supply* - OPS e 2) Uso de combustíveis de baixo carbono. Ambas as abordagens são caracterizadas por uma repressão de investimentos dos portos e dos demais atores como armadores, afretadores e companhias de energia, causada pelos altos valores de investimentos e sobretudo pela incerteza sobre regulamentações futuras. Portanto, é urgente que a IMO estabeleça regras para justificar os investimentos necessários nos portos brasileiros e internacionais.

Introdução

A descarbonização das economias brasileiras e mundiais está em andamento, e o que antes era uma ação voluntária, por exemplo a elaboração de inventários de gases de efeito estufa (GEE), está se tornando aos poucos uma obrigação, como estabelecido na Resolução SEDEST Nº 02/2025 do Estado do Paraná, que define o inventário de GEE como requisito no âmbito do licenciamento ambiental (PARANÁ, 2025).

Neste contexto, este trabalho faz uma abordagem sobre experiências com a descarbonização do setor portuário, a qual é essencial para o comércio global e o desenvolvimento econômico, especialmente em países como o Brasil, que dependem fortemente de cadeias de exportação e importação. A relevância dos portos vai muito além da própria descarbonização, porque esses funcionam como *hubs* de produtos estratégicos para a descarbonização da economia, incluindo combustíveis verdes e *commodities* de baixo carbono, como aço verde ou fertilizantes verdes, para os quais o Brasil tem um potencial como poucos outros países do mundo.

Neste estudo, a situação da descarbonização de operações portuárias e da navegação marítima brasileira e internacional foi analisada, identificando os principais pilares, o grau de implementação das medidas projetadas e uma análise crítica frente ao compromisso de neutralidade de emissões GEE em 2050.

Materiais e Métodos

Em parte, as informações apresentadas neste trabalho baseiam-se no "Diagnóstico sobre descarbonização no setor portuário", realizado pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) em parceria com a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), por meio do Programa Internacional de Incentivo ao Hidrogênio (H2Uppp), financiado pelo Ministério da Economia e Ação Climática (BMWK) da Alemanha. Este programa promove projetos e o desenvolvimento do mercado do hidrogênio verde em países emergentes e em desenvolvimento selecionados, como parte da Estratégia Nacional para o Hidrogênio (ANTAQ, 2023). Tal estudo foi executado em três etapas (eixos analíticos). No Eixo 1, inicialmente foi feita uma revisão da experiência internacional com a descarbonização de operações portuárias (ANTAQ, 2021). No Eixo 2, foi elaborado um levantamento da situação dos portos brasileiros através de um questionário enviado para 135 atores (portos públicos, terminais, empresas de energia e associações). O interesse deste levantamento foi verificar quais as iniciativas de descarbonização estavam sendo executadas ou projetadas junto com eventuais barreiras de natureza tecnológica, mercadológica, regulatória ou financeira (ANTAQ, 2023). No Eixo 3, última etapa, foram reportadas com mais detalhamento as experiências de 5 portos escolhidos: Portos de Itaqui, Pecém, Porto do Açu, Santos e Paranaguá, com base em visitas nas instalações e reuniões com as respectivas equipes dos portos (ANTAQ, 2025a; 2025b). Informações adicionais foram obtidas pelos diversos Inventários de GEE, Relatórios de Sustentabilidade ou Planos de Descarbonização publicados pelo Porto do Açu

(Porto do Açu Operações S.A., 2024, 2025), Itaqui (Fundación Valenciaport, 2025a), Paranaguá (Fundación Valenciaport, 2025b) e analisadas como foco em identificar as principais barreiras para ações de descarbonização.

Resultados

Contexto Legal

O processo de descarbonização do setor portuário brasileiro está alinhado às diretrizes internacionais de mitigação climática, como o Acordo de Paris (MCTI, 2021) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (NU, 2024). O compromisso do Brasil em reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 59% e 67% até 2035, em comparação aos níveis de 2005, com vistas à neutralidade de emissões até 2050 (MMA, 2024), reforça a importância de soluções para reduzir o impacto ambiental das atividades portuárias. A redução de 59% a 67% diz respeito ao país como todo, sendo subdividida entre os setores da economia, como, por exemplo, o setor de transportes, do qual o transporte aquaviário faz parte. Para cada setor, são elaborados em planos setoriais de redução de GEE. Este setor é relevante para os portos tendo em vista que a emissão de navios e rebocadores é de longe a maior emissão de GEE: representou 90,5% do total de emissões do porto de Paranaguá (Fundación Valenciaport, 2025b) e 96,9% do Itaqui (Fundación Valenciaport, 2025a). Até o momento, não há no Brasil uma porcentagem oficial de redução obrigatória para os planos setoriais, porém, temos os caminhos definidos para o setor de transportes (MMA, MCTI, MT, MPor, CC/PR, 2026) que são:

- Transporte por veículos mais eficientes;
- Uso de propulsão elétrica;
- Uso de biocombustíveis;
- Aumento do transporte coletivo, redução de transporte individual;
- Melhor logística, menos congestionamentos.

Com relação ao transporte aquaviário, existem os critérios internacionais aplicáveis para o Brasil pela Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization* – IMO), que é a agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU), responsável pela regulamentação do transporte marítimo internacional. O objetivo inicial principal da IMO era garantir a segurança e a prevenção de acidentes e da poluição do ambiente marinho que envolvam navios, mas hoje expandiu sua atuação e dispõe de parâmetros ambientais para mitigar as emissões de GEE. Alguns exemplos são o *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) e o *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP), introduzidos em 2011 e mais tarde, em 2021, pelo *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI) e *Carbon Intensity Indicator* (CII). Estes são indicadores que ajudam a diferenciar entre navios com altas emissões de GEE e outros com emissões reduzidas (Subcomitê de Combustíveis Marítimos, 2022), entretanto não renunciam a combustíveis fósseis, portanto não estabelecem uma trajetória rumo a zero emissões. A iniciativa que se aproxima mais da redução das emissões GEE são os corredores verdes (GMF, 2025), rotas comerciais específicas que facilitam a viabilidade do transporte marítimo sem emissões por meio de ações públicas e privadas, uma estratégia crucial para acelerar a transição do setor marítimo rumo ao *Net Zero* (Pacto Global Rede Brasil, 2024). Corredores verdes podem ser criados por iniciativas de governos, portos, indústrias e parcerias públicas-privadas. Atualmente há quatro corredores verdes em fase de realização (verde) e 12 na fase da preparação (azul), como ilustrado na Figura 01 (GMF, 2025).



Figura 01: Corredores verdes em fase de realização e preparação.
Fonte: GMF (2025).

O Brasil até o momento não tem um corredor verde estabelecido, porém no último relatório do *Global Maritime Forum* – GMF são citadas duas iniciativas: uma entre Brasil e Noruega e outra para rotas de Santos para destinos no Mar do Norte (GMF, 2025), dentre 68 iniciativas mundiais que se encontram atualmente nas fases iniciais ou de exploração.

O caminho da descarbonização

O caminho da descarbonização do setor portuário baseia-se em duas ferramentas principais, mostradas na Figura 02: o inventário de GEE e do plano de descarbonização. A parcela dos portos com inventário de GEE publicado foi levantada em 2023 (ANTAQ, 2023) quando um questionário foi respondido por 27 portos públicos e 66 terminais de uso privado, arrendados e de transbordo de carga. Apenas 19% dos portos públicos informaram ter um inventário GEE elaborado. Dos terminais, a porcentagem foi maior, com 65%. Sobre o plano de descarbonização a pergunta foi mais genérica: ela apenas levantava se existia uma meta de redução, o que foi confirmada por 7% dos portos públicos e por 26% dos terminais. Estes números evidenciam uma lacuna relevante entre a situação real e a meta de zero emissão líquida em 2050, tendo em vista os esforços necessários para que essa seja alcançada. Esta defasagem se explica pela necessidade dos portos e terminais projetarem investimentos pesados em infraestrutura, por exemplo a disponibilidade de energia elétrica do continente para navios atracados (*Onshore Power Supply* – OPS) e instalação de infraestrutura para futuros combustíveis de baixo carbono, que são os dois pilares principais da descarbonização do setor portuário.

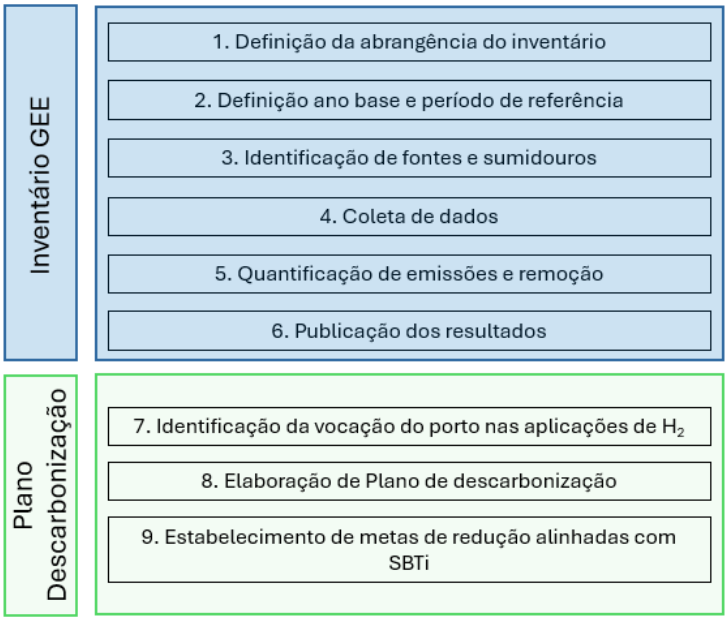


Figura 02: O caminho da Descarbonização do Setor Portuário Brasileiro.
Fonte: ANTAQ (2025b).

Os dois pilares da descarbonização de atividades portuárias

Emissões de GEE de navios e rebocadores são de longe a principal fonte de emissão em portos, contando tipicamente por mais de 90% das emissões totais (Fundación Valenciaport, 2025a, 2025b). Assim, as principais ações de descarbonização focam em duas abordagens: 1) OPS e 2) o uso de combustíveis de baixo carbono. Das 7 atividades com potencial de redução acima de 1 kt CO_2/ano identificadas no Porto de Itaqui, 6 são vinculadas com a instalação de OPS ou o uso de combustíveis de baixo carbono, e apenas uma não (Fundación Valenciaport, 2025a). Embora o uso de OPS seja uma técnica reconhecida de redução de emissões de GEE, o relatório da Agência Europeia do Meio Ambiente, em conjunto com Agência Europeia da Segurança Marítima (EEA-EMSA, 2025) publicou que ,conforme dados de 2024, havia um número muito limitado de navios prontos para o uso de OPS de alta voltagem: 33 navios apenas, sendo que 27 destes estão em uso na comunidade europeia: três porta-contêineres, nove cruzeiros e 15 navios do tipo Ro-Pax (*Roll-On/Roll-Off Passenger*) (EAFO, 2024). Há ainda um número não especificado de navios chamados "*OPS-ready*" que são embarcações onde a tecnologia OPS está parcialmente instalada e que podem ser adaptadas com relativa facilidade, uma vez que a decisão for tomada. O relatório afirma ainda que existem 44 portos com 352 berços equipados com OPS nos portos da Europa. No Brasil, sistemas de OPS foram observados nas visitas realizadas dentro do Eixo 3 do projeto da ANTAQ nos portos de Pecém, Açu e Santos para rebocadores, mas por enquanto não para navios maiores. Neste caso os obstáculos são grandes, não apenas pelo investimento, que inclui toda a adaptação da rede elétrica com subestações para a nova demanda, mas também pelo pequeno número de navios cargueiros equipados com esta tecnologia, visto que esta é a principal categoria de navios que frequenta os portos do Brasil. A tecnologia OPS encontra-se atualmente instalada basicamente em navios dos tipos carga-contêineres e cruzeiros (EEA-EMSA, 2025), (CLIA, 2023). Dessa forma, a perspectiva dos portos é de baixo uso da tecnologia OPS porque há poucos navios preparados. Por outro lado, os armadores não veem a necessidade de adquirir ou adequar seus navios enquanto há poucos portos que oferecem serviço OPS. Apesar dessas dificuldades, o porto do Itaqui estabeleceu no seu Plano de descarbonização a ação de eletrificação dos berços de granéis líquidos a partir do ano de 2027 (Fundación Valenciaport, 2025a).

A situação dos combustíveis de baixo carbono é semelhante com a situação do OPS, onde um ator aguarda a decisão de outro e enquanto nada for decidido, nenhuma ação é realizada. Esta abordagem possui o agravante que há vários tipos de combustíveis considerados como "baixo carbono", como *Fatty Acid Methyl Ester* – FAME, Biodesel, *Hydrogenated Vegetable Oil* – HVO, Etanol, Gás Natural Liquefeito – GNL, Biometano, e-Combustíveis, Metanol, Amônia e Hidrogênio. Todos eles têm vantagens e desvantagens relevantes. Dificilmente um porto vai instalar a infraestrutura para todos estes combustíveis, pois quer primeiramente saber qual destes vai se destacar e desenvolver efetivamente. A resposta poderia ser obtida analisando o mercado das encomendas de novos navios: em 2023 houve encomenda de 1.463 navios com combustíveis alternativos, correspondendo a 5,5% da arqueação bruta encomendada (ANTAQ, 2024), sendo 68% das encomendas para navios com GNL ou GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), combustíveis considerados como intermediários na rota da descarbonização. Dentro dos combustíveis renováveis, em primeiro lugar aparece o metanol, com 8% das 1.463 encomendas. O metanol se destaca pelo seu manuseio relativamente fácil em comparação com outros combustíveis sustentáveis como amônia ou hidrogênio, mas ainda apresenta desvantagem em relação ao óleo diesel, por ter apenas 40% da densidade energética (Pacto Global Rede Brasil, 2024). A preferência do mercado por GNL e metanol foi reportada também pelo portal Engine, que publicou que a frota de navios em operação usando GNL aumentou 30% em um ano, de 653 unidades em 2024 para 846 em 2025. A frota de metanol aumentou 86%, de 57 para 106 no mesmo período; já os que operam com amônia subiram de dois para três, e a frota de navios movidos a hidrogênio ficou inalterada, com quatro unidades operantes (ENGINE, 2026). Para aumentar possíveis rotas para navios com combustível alternativo e driblar a eventual indisponibilidade em portos, estes navios são tipicamente do tipo *dual-fuel*, ou seja, podem operar com metanol bem como com combustível convencional, o que aumenta o custo destes navios (Future Fuels and Technology Project, 2026), (ZFCM, 2024).

Outras possibilidades para a descarbonização

Atualmente, existe disponibilidade de equipamentos elétricos para guindastes de cais do tipo *Mobile Harbor Crane* (MHC, ou Guindaste Móvel Portuário), empilhadeiras de garfo, empilhadeiras de contêineres (*Reach Stackers*), pá carregadeiras, retroescavadeiras e transtêineres (*Rubber Tyred Gantry* – a RTG), que podem substituir equipamentos a combustão (Fundación Valenciaport, 2025a). Quando estes equipamentos se movimentam por trilhos, a eletrificação pode ser por cabo, como no caso de RTG. Para os que se movimentam livremente, se faz necessário o uso de baterias, a instalação de pontos de carregamento e eventualmente um número maior de equipamentos disponíveis, porque uma parte da frota estará indisponível durante o período de recarga. Todos estes fatores devem ser considerados na hora de programar um investimento. É importante notar que apesar do maior custo de capital dos equipamentos elétricos, estes reduzem o custo operacional, algo já verificado na comparação do transporte ferroviário eletrificado versus tração a diesel num estudo elaborado por universidades alemãs para o Ministério Federal de Transporte e Infraestrutura Digital (PTV AG, 2021). Além do aspecto econômico, deve-se destacar o menor impacto ambiental pelo uso de equipamentos elétricos, um benefício para os colaboradores do porto, para a comunidade residente em suas proximidades e para o meio ambiente em geral.

Compensações

Emissões que não podem ser zeradas em 2050 precisam ser compensadas pela aquisição de créditos de carbono. Cada crédito de carbono equivale a 1 tonelada de CO_{2e}. Atualmente há o mercado voluntário e o mercado regulado de créditos de carbono, além de mecanismos internacionais de negociação de créditos. No mercado voluntário empresas participam por iniciativa própria, por exemplo, para compensar emissões ou para atingir metas ESG. O valor do crédito de alta integridade é cotado entre US$20 e 40 (Solartech, 2025). Já os créditos regulados são comprados por empresas que ultrapassam os limites legalmente aplicáveis na Europa (ICC Brasil & Waycarbon, 2023). Estes créditos negociados dentro da plataforma *European Union Emissions Trading System* – EU-ETS são mais caros e variavam nos últimos 4 anos entre US$ 50 e 100. No Brasil, existe o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), introduzido pela Lei 15.042/2024 (Brasil, 2024) que se orienta no sistema europeu pelo princípio de *cap and trade,* que significa estabelecer permissões de emissão para GEE que são gradativamente reduzidas conforme cronograma. Empresas são obrigadas a reduzir suas emissões e adquirir créditos para a parte que ultrapassa as permissões. Esta lei ainda não foi regulamentada. Para ter uma referência sobre o possível custo futuro de crédito de carbono no Brasil, pode ser consultado o Plano de Descarbonização do Porto de Itaqui que se baseou em R$960 por tonelada no ano de 2050, como média entre Custo Social do Carbono e o Preço Sombra do Carbono (Fundación Valenciaport, 2025a) .

Considerações finais

Os resultados mostram que a parte das ações de descarbonização do setor portuário que cabe exclusivamente às administrações portuárias como, por exemplo, a troca de equipamento de combustão por elétrico, está em andamento. Já outras ações, como o uso de combustíveis sustentáveis e OPS, ainda estão no estágio inicial, visto que envolvem muitos atores, o que dificulta a tomada de decisões de investimento. Para ilustrar a complexidade destas decisões e número de interessados, pode-se citar o último relatório de 2025 da ONG *Global Maritime Forum*, que lista 84 iniciativas de corredores verdes no mundo, que envolvem mais de 300 *stakeholders* (GMF, 2025). Apesar da reconhecida relevância dos corredores verdes para impulsionar o transporte marítimo sustentável, nota-se a ausência de regulamentação da IMO para a implementação de combustíveis sustentáveis de forma geral, mesmo para aqueles corredores sem perspectiva futura de se tornar corredores verdes. Esta demora se reflete na repressão de investimentos necessários para a disponibilização dos combustíveis em si, para a infraestrutura de movimentação destes combustíveis nos portos e para a fabricação de navios prontos para seu uso. Considerando-se o curto intervalo de tempo de apenas 24 anos remanescentes até a neutralidade de carbono, frente ao estágio inicial dos combustíveis sustentáveis, é urgente que a IMO estabeleça regras obrigatórias para justificar os investimentos necessários nos portos brasileiros e internacionais. Investimentos voluntários atuais em corredores verdes são louváveis,

mas seguem objetivos individuais e não visam a descarbonização do transporte marítimo como um todo. Para muitas rotas, não há interesse em descarbonizar, e nestes casos combustíveis sustentáveis significam um custo a mais sem previsão de retorno financeiro. Para estes casos a IMO precisa estabelecer regras e cronogramas de implementação.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer aos Portos do Itaqui, Pecém, Açu, Santos e Paranaguá pela disponibilização de informações sobre ações de descarbonização em andamento e projetadas. Agradecimentos também à Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), que financiou o levantamento da situação da descarbonização e aplicações de hidrogênio do setor portuário brasileiro em parceria com a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ).

Referências Bibliográficas

ANTAQ - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (Brasil). **Diagnóstico de Descarbonização, Infraestrutura e aplicações do Hidrogênio nos Portos - Relatório Final**. Eixo 2. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. --Brasília: ANTAQ, 2023. Disponível em: < https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/copy5_of_GIZAL23A_240429_P6_RelatorioFinal_V6.0.pdf>. Acesso em 01 abr. 2026.

ANTAQ - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (Brasil). **Diagnóstico sobre descarbonização no setor portuário, abrangendo a adequação dos portos brasileiros no que se refere à recepção de embarcações com combustível verde, produção de energia eólica, eletrificação de equipamentos portuários e sistemas OPS -Eixo 3. Relatório Consolidado**. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. --Brasília: ANTAQ, 2025a. Disponível em: https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/2780720_P38_Relatorio_Final_Guia_Boas_Praticas_APROVADO_E_NAO_DIAGRAMADO.pdf. Acesso em 01 abr. 2026.

ANTAQ - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (Brasil). **Diagnóstico sobre descarbonização no setor portuário, abrangendo a adequação dos portos brasileiros no que se refere à recepção de embarcações com combustível verde, produção de energia eólica, eletrificação de equipamentos portuários e sistemas OPS -Eixo 3. Guia de Boas Práticas e Recomendações**. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. --Brasília: ANTAQ, 2025b. Disponível em: https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/2780720_P38_Relatorio_Final_Guia_Boas_Praticas_APROVADO_E_NAO_DIAGRAMADO.pdf. Acesso em 01 abr. 2026.

ANTAQ - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (Brasil). **Revisão da experiência internacional sobre redução das emissões no transporte marítimo e nos portos**. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. --Brasília: ANTAQ, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/RelatrioEixo1diagramado.pdf. Acesso em 01 abr. 2026.

Cruise Lines International Association (CLIA). **Charting the Future of Sustainable Cruise Travel, October 2023.** Disponível em: https://cruising.org/resources/charting-future-sustainable-cruise-travel. Acesso em 08 abr. 2026.

EAFO. **European Alternative Fuels Observatory - Maritime shipping.** Disponível em: https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/maritime-sea. Acesso em 02 abr. 2026.

EEA-EMSA. **European Maritime Transport Environmental Report 2025.** Disponível em: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/maritime-transport-2025. Acesso em 02 abr. 2026.

ENGINE. **Alternative Fuels. Alt-fuel vessel orders softened, but deliveries accelerated in 2025 – DNV**. Disponível em: https://www.engine.online/news/alt-fuel-vessel-orders-softened-but-deliveries-accelerated-in-2025-dnv-761b. Acesso em 02 abr. 2026.

FUNDACIÓN VALENCIAPORT. **Entrega 3: Plano de Descarbonização do Porto de Itaqui**. Abril de 2025. Valencia: FUNDACIÓN VALENCIAPORT, 2025a. Disponível em: https://www.portodoitaqui.com.br/public/_files/arquivos/E3-Plano-de-Descarbonizacao-VF02-English-Version.pdf#:~:text=The%20Decarbonization%20Plan%20is%20based%20on%20the,planned%20expansions%2C%20and%20energy%20transition%20trends%20in. Acesso em 01 abr. 2026.

FUNDACIÓN VALENCIAPORT. **Entrega 2: Relatório da Pegada de Carbono – Portos do Paraná**. Maio de 2025. Valencia: FUNDACIÓN VALENCIAPORT, 2025b. Disponível em: https://www.portosdoparana.pr.gov.br/sites/portos/arquivos_restritos/files/documento/2025-08/Relat%C3%B3rio%20Pegada_de_Carbono_2023_%20Portos%20Parana.pdf. Acesso em 01 abr. 2026.

FUTURE FUELS AND TECHNOLOGY PROJECT. **Dual-fuel container ship and vehicle carrier fleet reaches 400 ships on the water.** Disponível em: https://futurefuels.imo.org/news/dual-fuel-container-ship-and-vehicle-carrier-fleet-reaches-400-ships-on-the-water/; Acesso em 07 abr. 2026

GLOBAL MARITIME FORUM (GMF). **At a Crossroads: Annual Progress Report on Green Shipping Corridors – 2025 edition**. Getting to Zero Coalition. Isabelle Chan Joe Boyland, Elena Talalasova. Disponível em: https://assets.ctfassets.net/gk3lrimlph5v/7zsVf5G9wzNPhEjFPjCrFC/f2918a81c76b734952c6ed4024ef42d9/Annual_progress_report_on_green_shipping_corridors_2025.pdf. Acesso em 01 abr. 2026.

ICC BRASIL & Waycarbon. **Factsheet 2023. Oportunidades para o Brasil em mercados de carbono.** Disponível em: https://www.iccbrasil.org/wp-content/uploads/2023/11/FACT_SHEET_ICCBR_2023_PT-1.pdf. Acesso em 07 abr. 2026.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Acordo de Paris**, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/acordo-de-paris. Acesso em: 07 mar. 2026.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). **COP29: Brasil entrega à ONU nova NDC alinhada ao Acordo de Paris - Documento determina meta de reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa do país entre 59% e 67% até 2035**. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris. Acesso em: 07 mar. 2026.

MMA, MCTI, MT, MPor, CC/PR. **Plano Clima Mitigação Plano Setorial de Transportes. Brasília, 2026.** Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/mudanca-do-clima/plano-setorial-transportes.pdf. Acesso em 06 abr. 2026.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL (NU). **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil: Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**, 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs> Acesso em: 03 dez. 2024.

PACTO GLOBAL REDE BRASIL. **Framework for Action. Acelerando a Descarbonização Portuária e Marítima no Brasil. 2024.** Disponível em: https://oceanpact.com/wp-content/uploads/2025/05/Acelerando-a-descarbonizacao-portuaria-e-maritima-no-Brasil.pdf. Acesso em 07 abr. 2026.

PARANÁ. Resolução SEDEST nº 2, de 16 de janeiro de 2025. **Define critérios para o controle da qualidade do ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar da população e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do Estado do Paraná de forma ambientalmente segura.** Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=472414. Acesso em: 30 mar. 2026.

PORTO DO AÇU OPERAÇÕES S.A. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. Julho de 2024. Disponível em: https://esg.portodoacu.com.br/wp-content/uploads/2024/07/Relatorio-de-Sustentabilidade-2023-Porto-do-Acu.pdf. Acesso em 02 abr. 2026

PORTO DO AÇU OPERAÇÕES S.A. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa 2024**. Agosto de 2025. Valencia: FUNDACIÓN VALENCIAPORT, 2025. Disponível em: <blob:https://registropublicodeemissoes.fgv.br/5c67c7a7-2ce0-43ca-afe3-df55b84f19ab>. Acesso em 01 abr. 2026.

PTV AG. **Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie.** Abschlussbericht zur Studie „Elektrifizierungsvarianten für das deutsche Schienennetz“. Karlsruhe, 2021.

SOLARTECH. **What Are Carbon Credits? The Complete Guide to Understanding Carbon Markets.** Novembro de 2025. Disponível em: https://solartechonline.com/blog/what-are-carbon-credits-complete-guide/. Acesso em 02 abr. 2026.

SUBCOMITÊ DE COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS. **RELATÓRIO FINAL DO SUBCOMITÊ. 10 jun. 2022.** Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/relatorio_subcomite_combustiveis_maritimos.pdf. Acesso em: 02 abr. 2026.

Zero Carbon Fuel Monitor (ZFCM). **Ship readiness for zero carbon fuels.** Disponível em: https://maritime.lr.org/ZCFM/report?_gl=1*137fbh1*_gcl_au*MzM4MDc5NDEyLjE3NzU2Njk1NDY.*_ga*MTkyMjMwNTgzMS4xNzc1NjY5NTQ3*_ga_BTRFH3E7GD*czE3NzU2Njk1NDYkbzEkZzEkdDE3NzU2NzA4ODQkajYwJGwwJGgxNzA5MTk4NTM4 Acesso em 08 abr. 2026.

DESIGUALDADES ECONÔMICAS NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS NO PARANÁ

1 Rennan Soares Ferreira, 2 Tiago Henrique Storch Lima, 3 Iara da Silva, 4 Leila Droprinchinski Martins

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: rennannf@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: limat@alunos.utfpr.edu.br; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: isilva@utfpr.edu.br; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail:leilamartins@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Clusters, Combustíveis, Desenvolvimento Regional.

Resumo

O Paraná destaca-se como um dos estados mais influentes economicamente do Brasil devido a sua contribuição no PIB nacional, estando ranqueado em quarto lugar e com destaque para o setor agropecuário, industrial e de comércio. Entretanto, apenas a renda não é suficiente para indicar a qualidade de vida populacional, desta forma, o Índice Ipardes de Desempenho Municipal (IPDM), calculado pelo IPARDES, permite avaliar o desempenho dos municípios paranaenses utilizando renda, emprego, produção agropecuária, saúde e educação. Além disso, o Paraná é um dos maiores consumidores de combustíveis do país, e em 2023 foi o terceiro estado que mais consumiu diesel e o quarto em relação a etanol e gasolina, consumindo um total de 6.371, 3.380 e 913,05 mil m^3, respectivamente. Desta forma, esta pesquisa busca analisar a relação entre o IPDM-renda e o consumo de combustíveis no estado. Para a execução deste, realizou-se a coleta de dados de agências nacionais como a ANP e o SENATRAN e estaduais como o IPARDES. Após esta etapa, elaborou-se um código utilizando Python para processar e organizar os dados, além de elaborar o dendograma utilizando o método *Ward* e mapa de clusters. Para a elaboração do mapa contendo a malha rodoviária e os postos de combustíveis, utilizou-se o Qgis. Os resultados revelam uma organização espacial fragmentada, na qual o Cluster 1 (Curitiba) caracteriza-se pelo alto consumo de gasolina devido a força de sua principal atividade econômica, voltada ao setor de serviços. O Cluster 2 representa os pólos regionais com equilíbrio entre produção agroindustrial e desenvolvimento social, enquanto o Cluster 3, identificado como "Cidades de Passagem", que, apesar de possuir baixos indicadores sociais e frotas reduzidas, apresenta o maior consumo de diesel do interior devido à sua localização estratégica em entroncamentos rodoviários e eixos de exportação (*trunk* e *primary*). Desta forma, conclui-se que o consumo de combustíveis atua como um marcador da função econômica municipal, evidenciando que a alta intensidade energética nos corredores logísticos não se traduz necessariamente em desenvolvimento humano local.

Introdução

As desigualdades socioeconômicas e o consumo de energia, principalmente daquelas de fontes não renováveis, são grandes desafios mundiais. De acordo com Simionescu e Oancea (2025), a partir de uma revisão da literatura, as desigualdades de renda e uso de energia têm recebido pouca atenção. Ainda segundo os autores, em estudo realizado para os países membros da União Européia, a desigualdade de renda impactou negativamente o consumo final de energia per capita, bem como o consumo de energia especificamente proveniente de gás natural, óleo combustível e diesel.

No Brasil existe uma desigualdade do consumo de energia residencial por classe de renda, com expressivo uso de eletricidade nas classes mais altas e de fontes de energia de biomassa nas classes de renda mais baixa (informativo, EPE 2026). Com isso surge a pergunta: existe uma relação de causalidade entre o consumo de combustíveis e a desigualdade de renda no Estado do Paraná?

O estado do Paraná, localizado na região Sul do Brasil, ocupa uma área de aproximadamente 199,3 km^2 e conta com uma população superior a 11,4 milhões de habitantes. Em termos de renda, possui o quarto maior Produto Interno Bruto (PIB) nacional, com destaque para os segmentos econômicos do setor agropecuário, industrial e de comércio. Com um polo para o agronegócio, especialmente soja, milho, proteína, e também industrial, contando com o Porto de Paranaguá que atua na logística de distribuição de produtos (IBGE, 2022). Outro setor de destaque nos últimos anos é a indústria de transformação, responsável pela quadruplicação da fabricação de veículos na última década e a produção dobrada de máquinas, especialmente agrícolas e de equipamentos (IPARDES, 2020).

Devido ao tipo de atividade econômica, o estado possui um dos sistemas rodoviários pavimentados mais extensos do país, com 3.849,40 km de rodovias federais, 12.138,53km estaduais e 104.861,70 km de rodovias municipais, atrás apenas de Minas Gerais e São Paulo (IPARDES, 2020). E conta também com uma frota veicular de mais de nove milhões de veículos, sendo 56% desses veículos leves (BRASIL, 2023) e, consequentemente, é um dos maiores consumidores de combustíveis do país (ANP, 2024). Contudo, a distribuição desses veículos e por consequência do combustível consumido é condicionado a características econômicas específicas do estado.

Desta forma, essa pesquisa visa entender se as desigualdades de renda influenciam o consumo de energia fóssil e renovável no estado do Paraná.

Material e Métodos

A análise compreende os municípios do estado do Paraná, localizado na região sul do Brasil. Para a determinação de agrupamentos dos municípios foram selecionados os parâmetros da Tabela 1.

Parâmetros	Fonte
Índice Ipardes de Desempenho Municipal (IPDM- Renda)	IPARDES (2023)
Quantidade de Veículos (QV)	SENATRAN (2023)
Consumo de Combustíveis (CC)	ANP (2023)
Localização dos Postos de Combustíveis	ANP (2026)
Malha Rodoviária	IBGE

Quadro 01: Parâmetros utilizados para elaboração do dendrograma
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os veículos contabilizados no cálculo foram apenas os automóveis, motocicletas, caminhões e ônibus, enquanto que o consumo de combustível incluiu a gasolina comum, etanol e diesel, entretanto, para o município de Jardim Olinda, localizado no Norte do estado, não foi possível obter informações sobre a venda de combustíveis. O IPDM é um índice estadual que mede o desempenho dos municípios considerando dimensões sociais básicas: renda, emprego e produção agropecuária; saúde e educação. Seu cálculo é realizado através de informações administrativas disponibilizadas por entidades públicas (IPARDES,2023). Além disso, é possível selecionar entre índice geral, que inclui todos parâmetros acima mencionados, e individualizados como de renda, saúde e educação. Para este estudo, selecionou-se o índice de renda (IPDM-renda) que analisa as componentes de renda, emprego e produção agropecuária no Paraná, de modo a avaliar este parâmetro em relação ao consumo de combustíveis e quantidade de veículos por município.

A partir da coleta de dados referente ao ano de 2023, última disponibilização do IPDM-renda, realizou-se a limpeza e tratamento dos dados, onde foram estabelecidos alguns critérios como, na inexistência de quaisquer dos parâmetros necessários à análise, o município foi removido . Utilizou-se a linguagem de programação *python* para a elaboração de todos *scripts* realizados neste trabalho, incluindo a limpeza de dados, elaboração do dendograma e mapa de clusters do estado, enquanto o mapa rodoviário, com os postos de combustíveis foi produzido utilizando o software *Qgis*.

Antes da elaboração do dendograma realizou-se a normalização dos parâmetros utilizando o Z-score, que permite a padronização dos dados, considerando que o índice IPDM-renda varia entre 0 e 1, enquanto o consumo de combustíveis e quantidade de veículos são extremamente elevados. Desta forma, para a elaboração do dendograma, a padronização torna-se essencial para a definição de quais municípios serão pertencentes a um determinado cluster.

Para a realização da análise de agrupamento hierárquico, utilizou-se o método do dendograma, devido a necessidade de compreender a interação entre os parâmetros selecionados. Este método permite a identificação de perfis regionais multidimensionais a partir da combinação dos parâmetros, agrupando os municípios com base na similaridade matemática, ou seja, na variância. O método utilizado foi o de *Ward*, que permite criar *clusters* compactos, garantindo que os municípios dentro de cada grupo apresentem determinada similaridade entre suas características analisadas. A definição da quantidade de clusters foi realizada aplicando-se o método *elbow.*

Por fim, elaborou-se um mapa da malha rodoviária do Paraná, com a localização dos postos de combustíveis e o índice IPDM-renda dos municípios ranqueados entre baixo, baixo-médio, médio e alto.

Resultados e Discussão

A partir das análises realizadas, elaborou-se o dendograma das variáveis IPDM-renda, CC e QV, conforme mostra a Figura 1. O número de clusters foi definido como quatro, pois observou-se que até três clusters existe um ganho expressivo de 82% na variância explicada, entretanto, ao aumentar a quantidade para quatro clusters, a variância sobe para 88%. A partir de cinco clusters, os ganhos se tornam menores, caracterizando o ponto de inflexão da curva.

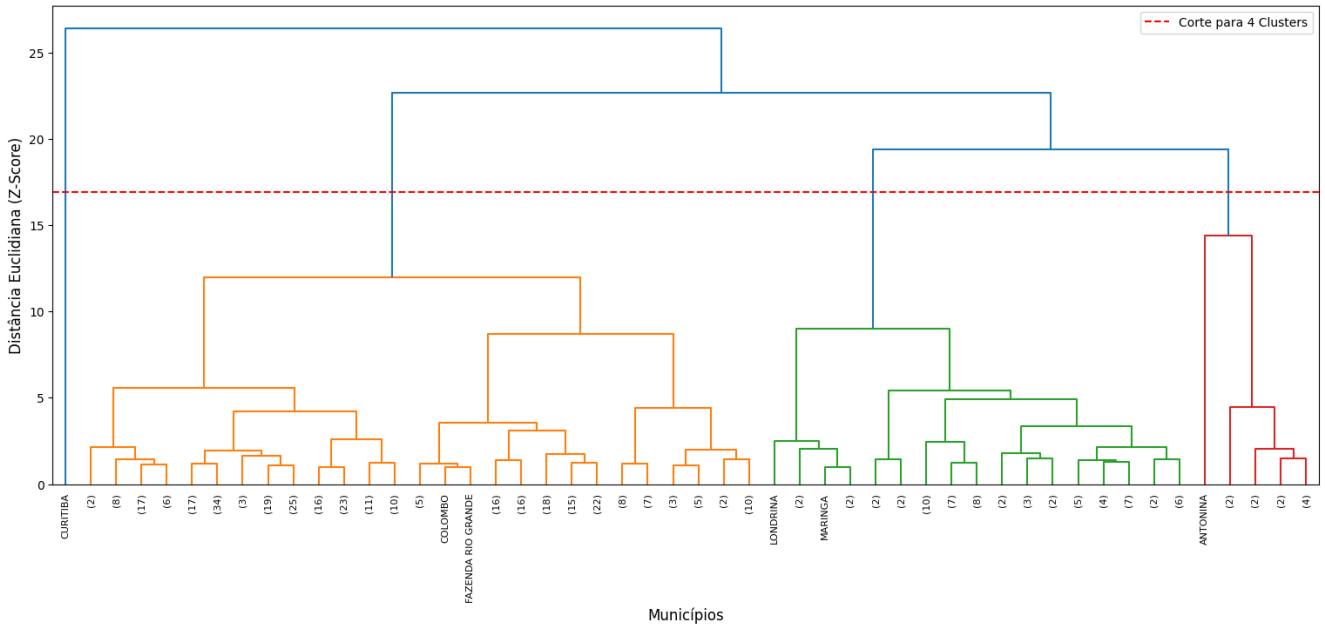


Figura 01: Dendograma de seleção dos clusters
Elaborado pelos autores (2026)

Conforme a Figura 1, evidencia-se a formação de clusters baseado na similaridade dos municípios, na qual Curitiba destaca-se, estatisticamente, sozinha dos demais. O cluster identificado pela cor amarela no dendograma apresenta a maior concentração, com 320 municípios, e devido a baixa altura das junções internas, indicam uma alta homogeneidade em relação aos parâmetros analisados. O verde, segundo maior, possui 66 municípios, apresentando homogeneidade relativamente alta, unindo-se a distância euclidiana próxima de 10, evidenciando alguns polos regionais do estado como Londrina e Maringá, que se diferenciam dos demais, porém não podem ser comparados com Curitiba. Por fim, o cluster vermelho possui 11 municípios, com destaque para Antonina, na qual a atividade portuária é a principal responsável pela geração de empregos, sendo uma atividade essencial para a economia (Governo do Paraná, 2022) .

A utilização do dendograma possibilitou agrupar os municípios por similaridade estatística independentemente da proximidade geográfica dos municípios, impedindo que o volume absoluto dos grandes municípios exerçam influência na classificação dos menores.

A partir do dendograma, elaborou-se um mapa de clusters, de modo a permitir a identificação visual das classificações dos municípios, conforme a Figura 2.

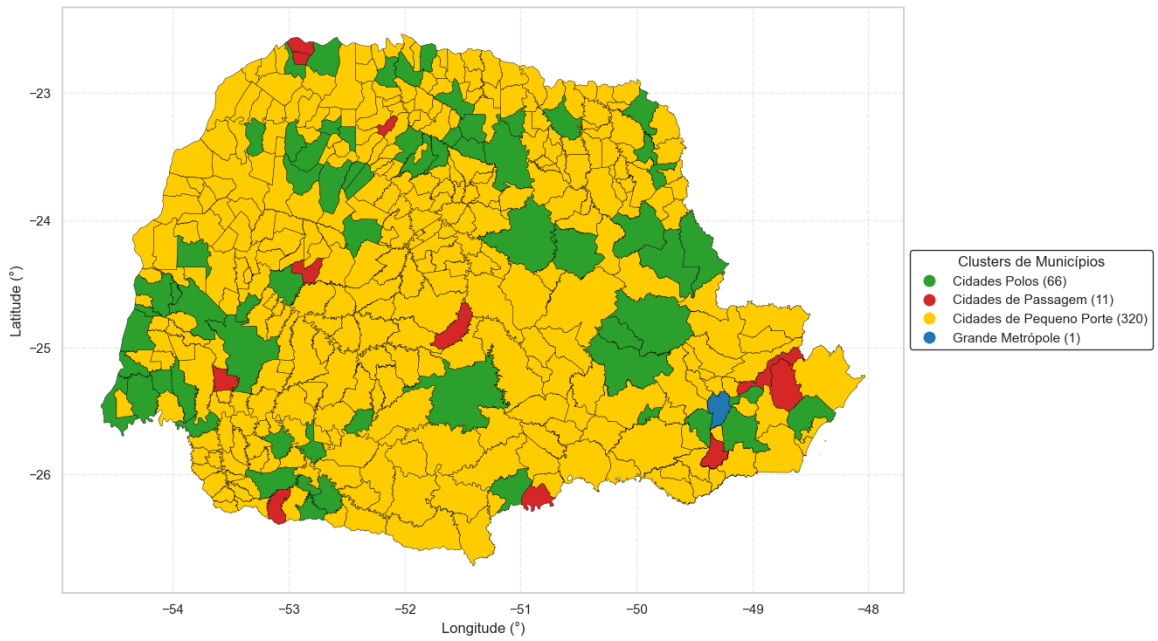


Figura 02: Clusters municipais do Paraná
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Observa-se na Figura 2 que a distribuição dos clusters revela uma organização espacial fragmentada, indicando que o método *Ward* foi devidamente executado. O mapa evidencia que a maior parte do Paraná, cerca de 80% é ocupada pelo cluster 4, o qual é composto por uma base de municípios que possui baixa densidade de frota veicular, com atividades econômicas de caráter local e principalmente agrícola. Neste cluster, destacam-se os municípios com as menores populações do estado e do país, como Nova Aliança do Ivaí e Jardim Olinda (IBGE, 2022) , entretanto, há municípios com atividade agrícola intensa como Nova Aurora, Tibagi, São Mateus do Sul e Cerro Azul que, em 2022, lideraram a produção nacional de ao menos 12 produtos cultivados no campo (IPARDES,2023).

O cluster 1, onde há apenas Curitiba, aparece como um ponto isolado devido às características apresentadas. A capital do estado do Paraná possui comportamento diferente dos demais devido ao elevado índice populacional, sendo o maior do estado e a 2ª maior Região Metropolitana do sul do Brasil (IPARDES, 2024). Destaca-se a economia do município que é formada majoritariamente pela atividade industrial e a administração pública, além dos serviços que possuem certa representatividade (DER/PR; FEPESE, 2024).

O cluster 2 indica os municípios posicionados estrategicamente no estado, e não uma dispersão ao acaso, representando alguns polos importantes para o estado, como na região Norte onde há Londrina e Maringá, no oeste com Cascavel e Foz do Iguaçu e também nos Campos Gerais como Araucária e Ponta Grossa (IPARDES, 2024). Esses municípios distribuídos no estado indicam uma estrutura urbana robusta no interior e que sustentam a economia regional fora da capital Curitiba. Por fim, o cluster 3 possui apenas 11 municípios e está concentrado principalmente em regiões estratégicas de logísticas, próximas aos municípios do cluster 2.

O Quadro 2 apresenta os valores médios de cada cluster para os parâmetros analisados.

Cluster	IPDM-renda (médio)	CC (litros)	QV (veículos)	Combustível mais consumido	% Total de Combustível
1 - Grande Metrópole	0,87	775,64	$1,47e^{+6}$	Gasolina	57,60
2 - Cidades Polos	0,63	1.627,33	$4,56e^{+4}$	Diesel	60,34
3 - Cidades de Passagem	0,48	9.458,92	$7,34e^{+3}$	Diesel	90,50
4 - Cidades de Pequeno Porte	0,46	1.399,78	$8,63e^{+3}$	Diesel	61,19

Quadro 2: Médias reais dos clusters
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Conforme o Quadro 2, o Cluster 1 apresenta o maior IPDM-renda, consolidando-se como o centro de riqueza do estado. A sua frota total, de 1,47 milhão de veículos, é extremamente superior aos demais clusters, entretanto, o consumo médio ponderado pelos veículos, de combustível do cluster é baixo, indicando que o consumo está mais relacionado com a mobilidade urbana individual do que com o transporte de carga de longas distâncias, evidenciando o destaque como um cluster isolado devido às características apresentadas e ao consumo predominante ser a gasolina, com 57,6% do consumo total.

O cluster 2, representado pelos pólos do estado, apresenta IPDM-renda médio de 0,63 e frota média expressiva de 45,6 mil veículos, entretanto, o consumo predominante de diesel reforça a forte integração desses municípios com o setor da agroindústria. Já o consumo médio de combustível foi o segundo maior observado entre os clusters. Os clusters 3 e 4 também se destacam pelo consumo predominante de diesel, entretanto, apresentam índice IPDM-renda médios menores de 0,48 e 0,46, respectivamente.

De modo geral, a integração dos clusters permite identificar o consumo de combustíveis no estado como um biomarcador da função econômica municipal, de modo que a gasolina, baseada nos parâmetros analisados, sinaliza maior poder econômico e urbanização concentrada, como no cluster 1. Enquanto,o diesel apresenta dualidade de comportamentos, como no cluster 2, onde impulsiona as cidades polo com bons indicadores sociais e no cluster 3, com a maior média ponderada de consumo, de 9.458,92 litros, na qual indica apenas um elevado fluxo de caminhões na região. Como o cluster 3 apresenta elevado consumo de combustível e baixo IPDM-renda, há a indicação de que a riqueza gerada pelo transporte rodoviário não gera benefícios diretos para os moradores.

Para a complementação da análise, elaborou-se um mapa (Figura 3) contendo as localizações dos postos de combustíveis no Paraná, juntamente com os principais tipos de rodovias do estado projetados sobre os municípios com as respectivas faixas do índice IPDM-renda.

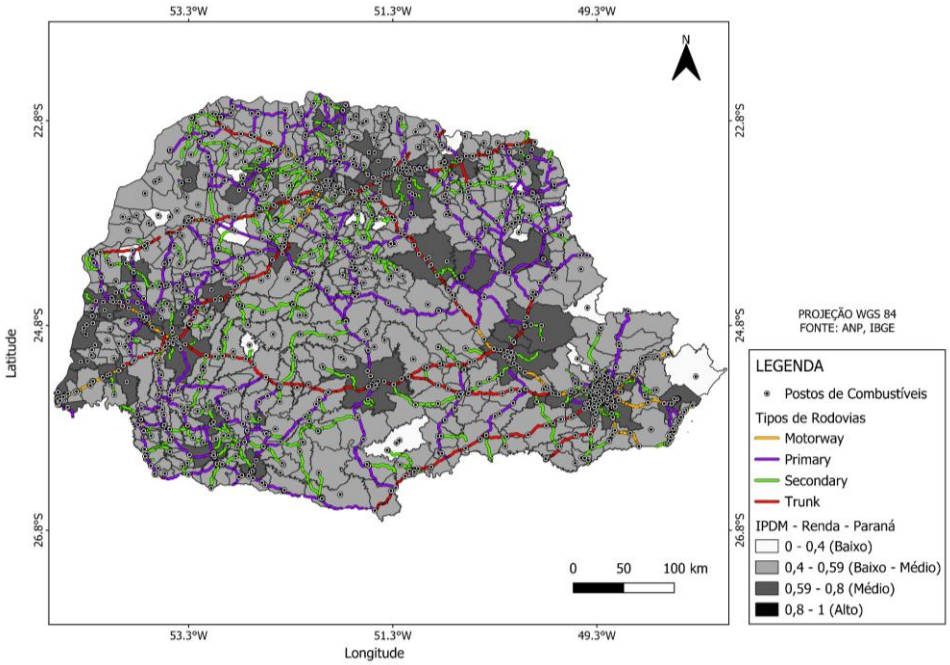


Figura 03: Localização de postos e rodovias no Paraná
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise da Figura 03 permite identificar que a distribuição dos postos de combustíveis no Paraná está predominantemente distribuída ao longo das principais rodovias do estado, permitindo assim, entender o comportamento dos municípios do cluster 3, que apresentam baixo IPDM-renda, porém elevados níveis de consumo de diesel, indicando que esse volume expressivo de combustível não reflete diretamente na demanda local, mas sim da intensidade do tráfego que utiliza os postos como infraestrutura de apoio.

As rodovias primárias e *trunk* conectam os principais polos do estado e também o interligam com os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Santa Catarina. Essas rodovias, devido ao intenso tráfego, necessitam de uma demanda maior de de combustíveis para suprir a necessidade dos veículos, que pode ser identificado devido a grande concentração de postos ao longo dessas principais rodovias.

Com relação a localização dos postos, percebe-se que os municípios com maior IPDM-renda apresentam também as maiores concentrações de postos, o que é possível identificar em Curitiba e região metropolitana, Londrina e Maringá ao Norte do Estado, Foz do Iguaçu e Cascavel ao Oeste, Guarapuava no centro do estado. Já em regiões com Baixo IPDM-renda, há poucas rodovias principais nos municípios, indicando falta de infraestrutura, sendo a malha rodoviária predominantemente secundária, limitando a presença de postos de combustíveis.

Comentários finais

A análise multivariada, consolidada pelo dendograma aplicado o método *Ward*, permitiu identificar a estrutura fragmentada do desenvolvimento paranaense, na qual os municípios são classificados conforme suas características e não pela presença de outros municípios. O cluster 1, composto apenas por Curitiba, se diferencia dos demais municípios do estado, e sua economia, voltada para o setor terciário, é predominantemente baseada no consumo de gasolina.

O cluster 2, onde concentram-se as cidades polo do estado, demonstra uma integração entre a produção e o índice IPDM-renda, enquanto o cluster 3 agrupa os municípios em relação ao elevado consumo de energético de diesel, com características de pequena frota veicular e elevado consumo de diesel, porém, localizados nos pontos críticos da malha rodoviária.

Desta forma, o diesel está associado ao combustível de produção nos pólos regionais e o alto volume de combustível movimentado pelos municípios do cluster 3, revelam que não há garantia de aumento no índice IPDM-renda, de modo que a política pública do estado deve enfrentar este desafio para converter essas informações em melhorias na qualidade de vida local, evitando que esses municípios funcionem apenas como locais de infraestrutura de passagem para a riqueza de outros locais.

Em conclusão, há uma relação entre as condições econômicas medido pelo IPDM-renda e o consumo de combustíveis, porém o maior consumo de combustíveis não necessariamente ocorre nas regiões de maior renda.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à CAPES pelo apoio financeiro e pelo apoio direto das Instituições UTFPR, IAG/USP, UFMG, UNIFEI, UERJ, EPUSP, UFSC, das empresas VOLKSWAGEN do Brasil Indústria de Veículos Automotores LTDA, RASTECH Automação e Comércio LTDA, Robert BOSCH Limitada e STELLANTIS Automóveis Brasil LTDA, da Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (Fundep), coordenadora do programa Mover – Linha V, processo [27192*83]

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024. Rio de Janeiro: ANP, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2024. Acesso em: 29 abr. 2026.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN). Frota de Veículos - 2023. Brasília: SENATRAN, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2023. Acesso em: 29 abr. 2026

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ; FUNDAÇÃO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOCIOECONÔMICOS. *Plano de mobilidade intermunicipal do sistema de transporte rodoviário de passageiros do Estado do Paraná: Produto III – Dimensionamento do sistema de transporte proposto. Tomo I – Caracterização e diagnóstico.* Curitiba: DER/PR; FEPESE, jun. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Energy income class. Rio de Janeiro: EPE, 2024. (Fact Sheet). Disponível em:<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-816/2%20-%20FS_Energy%20Income%20Class_EN.pdf>. Acesso em: 1 maio 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE publishes new fact sheets on inequality in residential energy consumption in Brazil and around the world. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/en/press-room/news/epe-publishes-new-fact-sheets-on-inequality-in-residential-energy-consumption-in-brazil-and-around-the-world>. Acesso em: 1 maio 2026.

GOVERNO DO PARANÁ, 2022. Portos do Paraná são os maiores responsáveis pelos empregos em Paranaguá e Antonina. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2023. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Portos-do-Parana-sao-os-maiores-responsaveis-pelos-empregos-em-Paranagua-e-Antonina>. Acesso em: 30 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em:< https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?localidade=BR>. Acesso em: 29 abr. 2026

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL (IPARDES), 2023. Índice Ipardes de Desempenho Municipal. Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/Pagina/Indice-Ipardes-de-Desempenho-Municipal-0>. Acesso em: 29 abr. 2026

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL (IPARDES), 2023. Oito municípios paranaenses integram a lista das 100 maiores economias do País. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2023, Disponível em: https://www.ipardes.pr.gov.br/Noticia/Oito-municipios-paranaenses-integram-lista-das-100-maiores-economias-do-Pais. Acesso em: 30 abr. 2026

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL (IPARDES), 2023. Paraná tem nove cidades na liderança da produção agropecuária nacional. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2023, Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/Noticia/Parana-tem-nove-cidades-na-lideranca-da-producao-agropecuaria-nacional>. Acesso em: 30 abr. 2026

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL (IPARDES) 2024. 11,8 milhões de pessoas: IBGE aponta Paraná com a 5ª maior população do Brasil em 2024. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2023, Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/Noticia/118-milhoes-de-pessoas-IBGE-aponta-Parana-com-5a-maior-populacao-do-Brasil-em-2024>. Acesso em: 30 abr. 2026

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL (IPARDES),2019. Paraná em Perspectiva. 2019. Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/>. Acesso em: 29 abr. 2026

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL (IPARDES), 2023. Índice Ipardes de Desempenho Municipal - IPDM. Curitiba: IPARDES, 2023. Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/Pagina/Indice-Ipardes-de-Desempenho-Municipal-0>. Acesso em: 29 abr. 2026.

SIMIONESCU, M.; OANCEA, B. Does Income Inequality Influence Energy Consumption in the European Union? **Energies**, [*S.l.*], v. 18, n. 4, p. 787, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en18040787>.

SUBSTRATO GEOPOLIMÉRICO COM PROPÓSITO DE CAPTURA DE CO_2

1 Madeleing Taborda-Barraza, 2 Alana Francischini Ferreira, 3 Nathalia Oliveira Tavares, 4 Beatriz Pinho de Almeida, 5 Maria Francisca Alves dos Santos Souza, 6 Clara Balduino Vieira, 7 Afonso Rangel Garcez de Azevedo
1,2,3,4,5Departamento de engenharia sanitária e ambiental (DESA) - UFMT,
1madeleing.barraza@ufmt.br; 2alana.ferreira@sou.ufmt.br; 3nathalia.tavares@sou.ufmt.br; 4beatriz.almeida@sou.ufmt.br; 5maria.souza23@sou.ufmt.br; 6,7Departamento de engenharia civil (LECIV) - UENF,
6clrbalduino@gmail.com,7afonso@uenf.br

Palavras-chave: Geopolímero; captura; mineralização

Resumo

As tecnologias para captura de gases são consideradas uma alternativa para mitigar o aumento da concentração de gases de efeito estufa decorrentes das atividades humanas, especialmente o dióxido de carbono (CO_2), que é o mais abundante. Nesse contexto, o desenvolvimento de materiais na construção civil capazes de capturar CO_2 durante sua vida útil, sem comprometer sua função principal, permite atribuir uma funcionalidade diferenciada e relevante a elementos construtivos que podem ser aplicados em diversos espaços das construções. Utilizando um substrato cimentício, semelhante a um substrato cerâmico, é possível criar uma rede de mesoporos que ao permitir a permeabilidade do gás no sistema favorece sua reação e conversão em outra fase, os carbonatos. Esse processo é denominado mineralização e dependendo de sua extensão, pode comprometer o desempenho mecânico dos materiais cimentícios. No entanto, em geopolímeros, cuja fase carbonatada é predominantemente composta por carbonato de sódio (Na_2CO_3), esse efeito pode ser menos prejudicial. Este trabalho tem como objetivo analisar a influência de aditivos na formação de uma estrutura porosa geopolimérica, visando sua capacidade de adsorção de CO_2. As amostras foram produzidas a partir de metacaulim comercial e escória de alto-forno como precursores, ativados por uma solução alcalina comum. Os aditivos utilizados foram peróxido de hidrogênio e óleo mineral. Os resultados indicaram que nas condições ambientais avaliadas (27–32 °C, 0,15% de CO_2 e umidade relativa entre 60–68%), ocorreu o início de eflorescência nas amostras, o que, no entanto, não implica necessariamente na formação significativa de novas fases carbonatadas no interior do material. Dessa forma, observa-se a necessidade de aumentar a concentração de CO_2 por meio de uma câmara de exposição controlada, a fim de potencializar e avaliar de maneira mais precisa o potencial de captura de CO_2 das matrizes.

Introdução

O cimento já tem sua aplicação consolidada na construção civil. Historicamente, a utilização de argamassas e concretos derivados de materiais aglomerantes possibilitou a construção de estruturas milenares como o Panteão e o Coliseu, capazes de resistir a diversas ações intempéricas ao longo do tempo (Gartner, 2004). O cimento do tipo Portland é o material mais utilizado mundialmente nas construções e o segundo material mais consumido pela população mundial, ficando atrás apenas da água (Van Deventer et al., 2012). Nas últimas décadas, as emissões de dióxido de carbono (CO_2) oriundas de atividades industriais e do setor da construção civil têm sido reconhecidas como uma das principais responsáveis pelo agravamento do efeito estufa e consequentemente das mudanças climáticas globais. O principal desafio enfrentado pela indústria cimenteira é a redução das emissões de CO_2, ao mesmo tempo que se atende à demanda global. As necessidades de infraestrutura das economias em desenvolvimento exigem o desenvolvimento e a implementação global de novas tecnologias de redução de emissões para o setor (IEA, 2023). A captura e o sequestro de CO_2, seja por adsorção física ou química, vêm sendo amplamente estudados como estratégias para mitigar esses impactos, utilizando sistemas cimentícios e cerâmicos capazes de fixar o gás por meio de reações de carbonatação (Ashraf, 2016; Saiz; Tomsia, 2009).

Os materiais geopoliméricos têm despertado considerável interesse na última década como uma das opções inorgânicas ecologicamente corretas mais promissoras devido às suas notáveis propriedades incluindo estabilidade mecânica, química e térmica, custo-benefício e processo de síntese sustentável, permitindo seu uso em diversas aplicações de alto valor agregado (Freire et al., 2022). Em termos de constituição química, os geopolímeros são materiais aglomerantes pertencentes ao grupo dos materiais álcali-ativados e que apresentam baixos teores de CaO. São produzidos a partir da reação entre uma solução ativadora alcalina e um material aluminossilicato amorfo (precursor) (Davidovits, 2011; Provis, 2018).

Portanto, os geopolímeros constituem uma alternativa precisa e confiável ao cimento Portland (Yunsheng et al., 2006). Diversos resíduos ou subprodutos podem ser utilizados como material precursor, fonte de Si e Al, entre os quais pode-se destacar: as argilas calcinadas (tipo metacaulim), as escórias de alto forno e as cinzas volantes (Davidovits., 2008; Duxson et al., 2008; Kwasny et al., 2018).

Nesse contexto, o uso de geopolímeros com porosidade controlada pode ser uma alternativa interessante para aumentar a interação com o CO_2. Assim, este trabalho avalia substratos geopoliméricos modificados, analisando como a composição e a microestrutura influenciam a captura de CO_2 e o desempenho mecânico do material.

Material e Métodos

Foram utilizados como precursores o metacaulim (MK), de uma indústria nacional, e a escória de alto forno (EAF), de uma cimenteira local no Norte Fluminense. As composições químicas podem ser observadas na Tabela 1.

	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Outros	P.F (%)
MK (%)	59,10	36,38	0,84	2,13	1,50	0,05	2,15
EAF (%)	39,23	6,70	41,56	0,48	6,30	5,73	1,05

Tabela 1: Composição química dos materiais precursores. P.F: Perda ao fogo
Fonte: Autores (2026)

Foi preparada uma solução ativadora alcalina (SA) constituída de hidróxido de sódio, em formato de micropérolas, e silicato de sódio, em solução líquida, com uma proporção de 0,074:1. De acordo com a literatura, o agente formador de poros mais utilizado é o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), sendo que teores superiores a 2,5% criaram um sistema de alta porosidade, por isso foi considerado utilizar 1,33%. O uso do óleo mineral, exclusivamente para o grupo a base de MK, foi aplicado apenas por verificar em estudos preliminares que reduzia o tamanho dos poros gerados pelo H_2O_2.

Foram estabelecidas quatro (4) composições, um grupo a base de metacaulim e outro contendo escória de alto forno como substituto parcial do metacaulim, tal como se resume na Tabela 2. Sobre estes grupos foram adicionados os aditivos previamente nomeados.

Grupo	MK (g)	EAF (g)	SA (g)	H_2O_2	Óleo Mineral (OM)
MK	80	-	100	-	-
MK-H2O2+OM	80	-	100	1 ml	0,5 ml
MK+EAF	64	16	100	-	-
MK+EAF-H2O2	64	16	100	1 ml	-

Tabela 2: Grupos experimentais e respectivas dosagens de materiais precursores, ativador e aditivos.
Fonte: Autores (2026)

As amostras foram confeccionadas em duas geometrias distintas: cilíndricas, destinadas ao ensaio de resistência à compressão (diâmetro de 24 mm e altura de 27 mm) e em formato de discos (diâmetro de 60 mm e altura de 20 mm), com o objetivo de proporcionar maior área de contato com o CO_2 do ambiente. Os grupos foram mantidos nos moldes por 14 dias e posteriormente, foram desmoldados e expostos ao ambiente, próximos a um forno com queima aberta, onde a concentração de CO_2, estimada com o uso de um medidor, variou entre 1550 e 1800 ppm durante um período de 7 dias. Em condições ambientais normais, os valores registrados foram de aproximadamente 550 ppm. A superfície das amostras em formato de disco fora analisada com o auxílio de um microscópio digital, enquanto as amostras cilíndricas foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão axial em uma prensa Instron, com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min. Por fim, as amostras foram encaminhadas para análise termogravimétrica, na faixa de temperatura de 28 °C a 1000 °C.

Resultados e Discussão

A análise microestrutural, em conjunto com as imagens de superfície, como pode ser visto na Figura 1, indica que o grupo MK apresenta uma matriz geopolimérica contínua, relativamente densa e com poucos poros de tamanho macro. Em contraste, a introdução de H_2O_2 e óleo mineral resulta na formação de um sistema altamente poroso, caracterizado por bolhas esféricas de diferentes diâmetros e possivelmente interconectados. Essa modificação estrutural reduz a área efetivamente resistente e intensifica a concentração de tensões, o que explica a queda acentuada da resistência à compressão observada no grupo MK+H_2O_2+OM, uma vez que os poros maiores atuam como pontos preferenciais para a propagação de trincas sob carregamento axial, conforme amplamente descrito na literatura (Duxson et al., 2007; Provis, 2018; Neville, 2011).

Nos compósitos contendo escória (MK+EAF e MK+EAF+H_2O_2), observa-se uma superfície mais homogênea, com poros de menor tamanho médio e melhor distribuídos. Essa característica, aliada ao elevado teor de CaO da escória (≈ 41,6%), favorece a formação de géis cálcicos adicionais, que aumentam a rigidez da rede e contribuem para uma estrutura de porosidade aparente menor do que com exclusivamente MK. Como resultado, esses sistemas apresentam resistências intermediárias, como pode ser visto na Figura 2, justificado pelo fato que ao interior destas amostras o teor de porosidade não foi o que aparentava a superfície. Provavelmente, as últimas bolhas de ar ao sair do sistema causaram deformação irreversível nele e isso foi observado no microscópio. Esse comportamento está em concordância com a literatura, que aponta que sistemas com maior teor de cálcio tendem a apresentar menor porosidade, sendo este um fator determinante no controle da difusão de cloretos (Bernal; Provis, 2014; Amorim, 2020).

Em geopolímeros com baixo teor de cálcio, as diferenças na composição química dos ligantes resultam também em variações na solução presente nos poros. Nesses sistemas, estudos indicam que os produtos formados no interior dos poros exercem maior influência no controle da penetração de cloretos do que a própria estrutura porosa, evidenciando a importância das características químicas da matriz (Shi, 1996; Ismail et al., 2013).

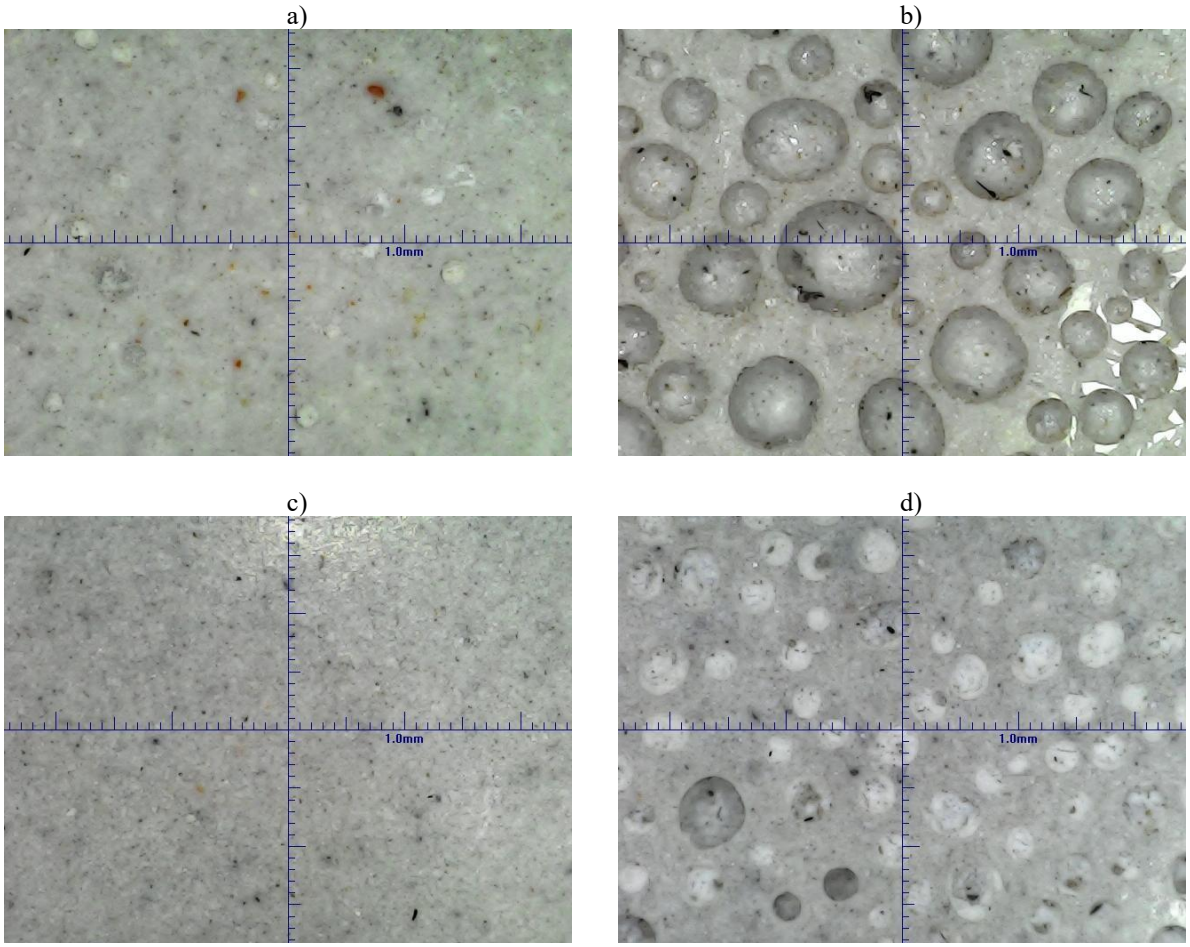


Figura 1: Aspecto superficial dos grupos a) MK, b) MK+H2O2+OM, c) MK+ESC, d) MK+ESC+H2O2 depois da exposição.
Fonte: Autores (2026)

Também foi observado que existiam manchas esbranquiçadas superficiais (início de eflorescência) ou migração de sais alcalinos para a superfície, porém este fenômeno foi registrado apenas para MK e MK+ESC+H2O2, sistemas nos quais o tamanho de poro foi menor. Mesmo assim, os valores de resistência à compressão evidenciaram que a matriz geopolimérica se manteve íntegra até após sua exposição. A utilização do peróxido de hidrogênio demonstrou-se eficaz para a formação de poros. Ainda que este efeito foi diferente para os sistemas, sendo que MK+H2O2+OM registrou redução da densidade aparente das pastas e, consequentemente, na diminuição da resistência à compressão, porém MK+ESC+H2O2 os poros no interior da amostra eram menores, conforme o verificado nos ensaios mecânicos e para os quais é considerado o efeito de borda, pois a EAF reage mais rapidamente do que o MK e promove o incremento de viscosidade (Yang et al., 2025). Este fenômeno está associado à migração de poros que acontece sobre diferencial de pressão ao longo da amostra e inclusive, sobre o diferencial de temperatura, conforme comenta Qi et al. (2025). Considerando que, a decomposição do H2O2 causa aquecimento, assim como o próprio processo de dissolução do aluminosilicato. Adicionalmente, com o incremento da viscosidade a pressão para expansão também aumenta, o que leva à redução do seu tamanho (Li et al., 2025).

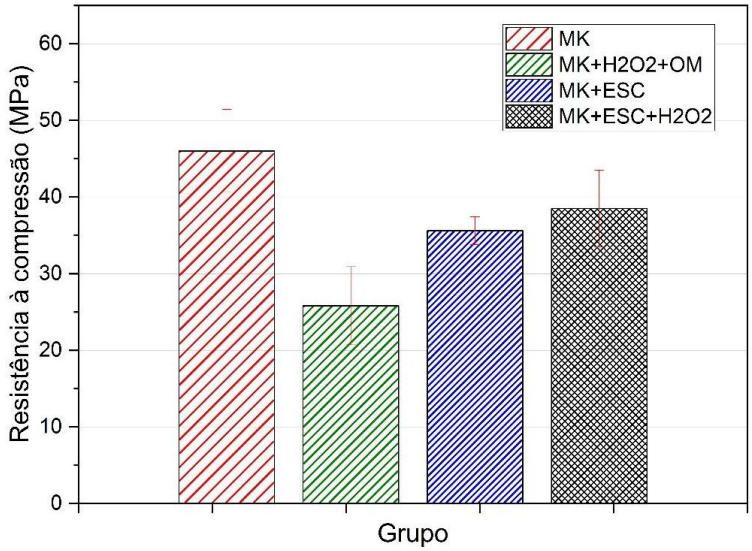


Figura 2: Resistência à compressão das pastas geopoliméricas com os aditivos.
Fonte: Autores (2026)

As curvas de termogravimetria mostram, em todos os grupos, uma perda de massa inicial até cerca de 120°C, atribuída à evaporação de água livre e fisicamente adsorvida, seguida por uma perda contínua até aproximadamente 300–400°C, que pode estar relacionada à desidratação da água quimicamente ligada ao gel geopolimérico e da água retida em poros finos. A presença de água na matriz, Wallah e Rangan (2006) esclarecem que ela não participa da reação química responsável pela formação do gel geopolimérico, exercendo somente o papel de agente promotor de trabalhabilidade à mistura durante manuseio e moldagem, sendo eliminada posteriormente nas etapas de cura e secagem.

Nos grupos que não continham aditivos, observa-se uma queda de massa mais acentuada em temperaturas mais elevadas, entre cerca de 600 e 800°C, no entanto, a ausência de picos bem definidos na curva DTG indica que a formação de carbonatos de cálcio/sódio ocorreu quase imperceptível, mesmo após a exposição em ambiente enriquecido em CO_2 (≈ 1550-1800 ppm). Nos grupos contendo óleo mineral, a perda de massa foi menor, o que pode ser atribuído a uma retenção promovida por gotículas de óleo bem dispersas dentro da amostra.

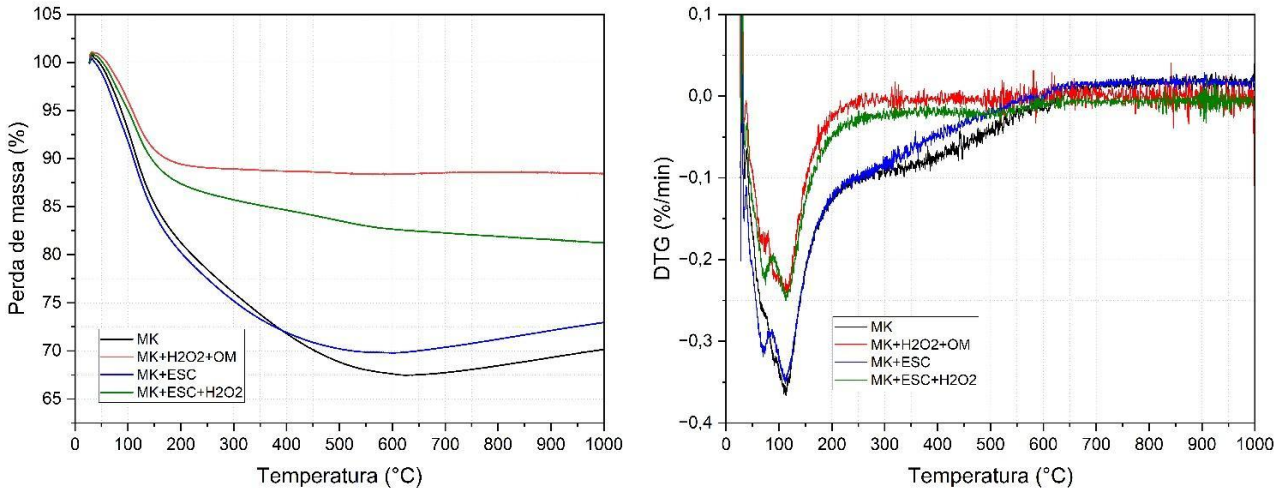


Figura 3: Curva de perda de massa e diferencial de perda de massa para todos os grupos.
Fonte: Autores (2026)

Em comparação com a literatura, conforme a Tabela 3, observa-se que sistemas geopoliméricos à base de metacaulim modificados com hidrotalcita, de acordo com os estudos por E. Papa et al. (2021), apresentam capacidades de adsorção de CO_2 na faixa de ≈0,08–0,15 mmol/g, obtidas sob condições controladas de temperatura e em mistura gasosa contendo 50% de CO_2 em Ar. Nesses ensaios, a adsorção é avaliada a 35°C, em regime predominantemente de fisissorção, e a 200°C, condição em que se verifica a atuação combinada de fisissorção e quimissorção nos compósitos geopoliméricos com hidrotalcita. Em contraste, os materiais desenvolvidos neste trabalho, embora apresentem estrutura porosa desenvolvida, não evidenciaram formação expressiva de carbonatos nas condições avaliadas (≈1550-1800 ppm de CO_2, 27 °C e 14 dias), conforme indicado pela ausência de picos característicos na curva DTG, sugerindo carbonatação ainda incipiente. Resultado semelhante, no que se refere à

ausência de avaliação direta da captura de CO_2, é observado em Benalia et al. (2022), que analisam sistemas geopoliméricos à base de metacaulim e escória com foco na microestrutura e na porosidade, no entanto, os autores não investigam a interação com CO_2 nem relacionam essas características à capacidade de adsorção. Dessa forma, os resultados indicam que embora a porosidade seja um fator necessário, ela não é suficiente para promover a carbonatação significativa, considerando o tamanho de poro formado e as condições de exposição — como concentração de CO_2, tempo e ativação do material — destacando que ensaios em condições mais próximas da realidade tendem a limitar o avanço das reações de captura quando comparados a cenários laboratoriais idealizados.

Autores	Precursor	Modificadores	Estratégia de porosidade	Condições de teste de CO2	Capacidade de adsorção/tipo de sequestro	Observação sobre eflorescência/carbo-natação superficial
Este trabalho (2026)	Metacaulim + Escória de alto-forno	H_2O_2 (1,33%), óleo mineral	Formação direta de poros por liberação de O_2 (H_2O_2) + refinamento com óleo mineral	Exposição ambiental (~1550 ppm CO_2, 27°C, UR 68%, 14 dias)	Não quantificada (carbonatação incipiente detectada por TGA entre 600–800°C)	Presença de eflorescências superficiais (vetas esbranquiçadas) indicando migração de sais alcalinos e início de carbonatação
Benalia et al. (2022)	Metacaulim + Ativador alcalino (NaOH e silicato de sódio) + Escória granulada de alto-forno	-	Porosidade controlada (teor de escória, razão Si/Al e condição de cura)	Não há ensaios diretos de adsorção de CO_2	-	Eflorescência (não discutida) e Carbonatação (não avaliada experimentalmente)
E. Papa et al. (2021)	Metacaulim + Solução de silicato de potássio + Hidrotalcitas comerciais (Pural 50 e 70)	Hidrotalcitas (até 37% em peso)	Porosidade combinada + Área específica	Temperaturas: 35°C e 200°C + Gás: 50% CO_2 / Ar + Fluxo: 40 mL/min + Adsorção: ~20 min + Regeneração: 500°C	Fisissorção: 0,079–0,154 mmol/g (35°C) + Quimissorção: 0,114–0,141 mmol/g (200°C)	Eflorescência (não discutida) + Carbonatação: ocorre como mecanismo de captura (formação de carbonatos Mg–CO_3)

Tabela 3: Comparação com outras literaturas entre parâmetros de desempenho de argamassas geopoliméricas. Fonte: Autores (2026)

Comentários finais

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a incorporação de agentes formadores de poros, como o peróxido de hidrogênio e o óleo mineral, foi eficaz na modificação da microestrutura das matrizes geopoliméricas, promovendo o aumento da porosidade. No entanto, essa alteração estrutural resultou em redução da resistência mecânica, especialmente nos sistemas à base exclusiva de metacaulim, evidenciando a relação entre porosidade e desempenho mecânico.

A adição de escória de alto-forno contribuiu para a formação de uma matriz mais estável, com poros de menor tamanho médio e melhor distribuídos, permitindo a obtenção de resistências intermediárias mesmo em sistemas mais porosos. Esse comportamento está associado à presença de fases ricas em cálcio, que favorecem o reforço estrutural da matriz geopolimérica.

No que se refere à captura de CO_2, via mineralização, as análises termogravimétricas indicaram ausência de evidências claras de formação significativa de carbonatos, sugerindo que o processo de carbonatação foi limitado nas condições avaliadas. Esse resultado pode ser atribuído, principalmente, ao curto tempo de exposição e à concentração relativamente baixa de CO_2, fatores que restringem a difusão do gás e a progressão das reações no interior da matriz. Acredita-se também que, pela natureza apolar do óleo mineral este não tenha contribuição no processo de formação de carbonatos, ainda que sua presença levou à formação de poros mais finos que seriam vistos como canais para permeação do gás.

Em comparação com a literatura, observa-se que estudos que reportam maiores capacidades de captura de CO_2 geralmente utilizam condições mais severas e controladas, como maiores concentrações de CO_2, temperaturas elevadas ou a incorporação de fases altamente reativas, como hidrotalcitas. Nesse contexto, os resultados deste trabalho indicam que, embora a porosidade aumente a acessibilidade do gás, ela não garante, por si só, a formação significativa de carbonatos em condições próximas às ambientais.

Referências Bibliográficas

AMORIM JÚNIOR, Nilson Santana de. Avaliação da durabilidade de concretos geopoliméricos obtidos a partir de metacaulim. 2020. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

ASHRAF, Waqar. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 558–570, 2016.

BENALIA, S.; ZEGHICHI, L.; BENGHAZI, Z. A comparative study of metakaolin/slag-based geopolymer mortars incorporating natural and recycled sands. *Civil Engineering Journal*, v. 8, n. 8, p. 1622–1638, 2022. DOI: 10.28991/CEJ-2022-08-08-07.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer: Chemistry and applications. 2. ed. St-Quentin: Institut Geopolymere, 2008.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer: Chemistry and applications. 3. ed. St-Quentin: Institut Geopolymere, 2011.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L. Designing precursors for geopolymer cements. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 91, n. 12, p. 3864–3869, 2008.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 12, p. 1590–1597, 2007.

FREIRE, Alisson Lopes; MOREIRA, Humberto Jorge José; MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz. Aplicações potenciais de geopolímeros na captura e armazenamento de carbono. *Greenhouse Gas Control*, v. 118, 2022.

GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO_2” cements. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 9, p. 1489–1498, 2004.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Cement. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/industry/cement. Acesso em: 27 abr. 2026.

ISMAIL, I.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; et al. Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 1187–1201, 2013.

KWASNY, J.; SOUTSOS, M. N.; MCINTOSH, J. A.; CLELAND, D. J. Comparison of the effect of mix proportion parameters on behaviour of geopolymer and Portland cement mortars. *Construction and Building Materials*, v. 187, p. 635–651, 2018.

LI, Z. et al. Porous ceramics for adsorption prepared from particle-stabilized foams based on the hydrolyzed secondary aluminum dross. *Ceramics International*, 2025.

NEVILLE, A. M. Properties of Concrete. 5. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011.

PAPA, E. et al. CO_2 adsorption at intermediate and low temperature by geopolymer-hydrotalcite composites. *Open Ceramics*, v. 5, p. 100048, 2021.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 40–48, 2018.

PROVIS, J. L. Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. Dordrecht: Springer, 2018.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, v. 44, p. 299–327, 2014.

QI, G. et al. Tailoring gradient porous ceramics via direct foaming: the role of seasonal temperature in slurry rheology and microstructure development. *Ceramics International*, 2025.

SAIZ, E.; TOMSIA, A. P. Materials for capture and storage of CO_2. *Annual Review of Materials Research*, v. 39, p. 19–44, 2009.

SHI, C. Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 26, p. 1789–1799, 1996.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, v. 29, p. 89–104, 2012.

WALLAH, S.; RANGAN, B. V. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long term properties. 2006.

YANG, T. et al. Particle-stabilized ceramic foams from blast furnace slag: Role of the slurry pH and sintering temperature in tailoring pore structure and properties. *Ceramics International*, 2025.

YUNSHENG, Z.; WEI, S.; ZONGJIN, L. Comportamento ao impacto e características microestruturais de placas de geopolímero de cinzas volantes reforçadas com fibra de PVA preparadas pela técnica de extrusão. *Journal of Materials Science*, v. 41, p. 2787–2794, 2006.

DESCARBONIZAÇÃO DAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR DA PERSPECTIVA DAS UNIDADES ADMINISTRATIVAS

1 Monday Luka, 2 Emilia Kohlman Rabbani, 3 Cláudio Pereira da Costa, 4 Elaine Cristina Alves, 5 Gilmar Lopes da Silva Júnior, 6 Henrique Antônio da Silva, 7 Vicente Estavam da Silva Neto

Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento Seguro e Sustentável (DESS) da Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 455-Madalena, Recife-PE,50720-001 Brazil,1 e-mail: lm@poli.br; 2, e-mail: emilia.rabbani@upe.br; 3, e-mail: cpc@poli.br; 4, e-mail:Elaine.alves@upe.br; 5, e-mail: glsj1@poli.br; 6, e-mail:henrique.antoniosilva@upe.br; 7, e-mail: vesn@poli.br

Palavras-chave: Pegadas de carbono; Unidades sustentáveis; Instituições de ensino superior.

Resumo

Este estudo investiga as emissões de gases de efeito estufa decorrentes das operações administrativas em instituições de ensino superior (IES), utilizando a administração da Universidade de Pernambuco (UPE), no Brasil, como estudo de caso. No entanto, embora a maioria dos estudos existentes enfatize as emissões em todo o campus, pouca atenção tem sido dada às emissões provenientes das unidades administrativas. Assim, este estudo visa preencher essa lacuna, quantificando as emissões de gases de efeito estufa (GHG) associadas ao consumo de eletricidade e à geração de resíduos sólidos. Foi empregada uma metodologia de estudo de caso, incluindo a caracterização de resíduos por meio de análise gravimétrica e a quantificação de emissões, de acordo com as diretrizes do IPCC e do Protocolo de (GHG). Os resultados indicam que as unidades administrativas geram aproximadamente 16.741,4 kg/ano de resíduos sólidos anualmente, dos quais os resíduos plásticos representam 29,7% e o papel, 25,7%, enquanto, no que diz respeito ao consumo de eletricidade, a seção administrativa consumiu 572.274,24 kWh em 2024. As emissões de carbono provenientes de resíduos sólidos foram estimadas em 80,36 tCO_2e, enquanto a eletricidade contribuiu com 31,18 tCO_2e, com um valor per capita correspondente a 0,12 tCO_2e. De modo geral, os resultados destacam a contribuição significativa das atividades administrativas para as pegadas de carbono institucionais e ressaltam a importância da coleta seletiva de resíduos e das estratégias de gestão de energia para avançar nos esforços de descarbonização e alcançar metas de sustentabilidade alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas.

Introdução

As alterações climáticas são consideradas um dos maiores desafios ambientais e sociais que a humanidade enfrenta no século XXI e, se não forem controladas, poderão ter efeitos prejudiciais nas gerações futuras. No entanto, apesar da implementação tanto de legislação nacional como de acordos globais, tais como o Protocolo de Quioto de 1995 e o Acordo de Paris de 2016, tem-se verificado um aumento substancial das atividades antropogênicas, como a produção de eletricidade e as atividades relacionadas com a agricultura, para dar resposta a uma população global que continua a crescer exponencialmente (Romão *et al.,* 2025). Nesse sentido, as instituições de ensino superior têm sido retratadas como tendo uma obrigação moral e ética de agir de forma responsável para com o ambiente, uma vez que desempenham um papel de liderança no movimento de proteção ambiental na agenda global (Nolasco *et al.,* 2021; Romão *et al.,* 2025). Assim, embora se acredite que as instituições de ensino superior (IES) desempenhem um papel significativo na promoção do desenvolvimento sustentável, elas também emitem quantidades significativas de gases de efeito estufa devido à mobilidade de estudantes e funcionários, ao consumo de energia e água e aos resíduos sólidos urbanos gerados pelas atividades de ambos, enquanto a recolha e o tratamento desses resíduos também podem contribuir para as emissões de gases de efeito estufa (Filimonau *et al.,* 2021). Dada a importância do papel das instituições de ensino superior (IES) no cumprimento da agenda global, instituições em todo o mundo começaram a quantificar as suas atividades para determinar a

quantidade de emissões geradas devido às suas atividades e aquisições, como observado em instituições como a Universidade de Bournemouth (Filimonau *et al.,* 2021), Universidade de Clemson (Clabeaux *et al.,* 2020), Universidade EAN (Osorio *et al.,* 2022), Universidade de Talca (Vásquez *et al.,* 2015) e Universidade Federal de Viçosa (Rocha *et al.,* 2023). No entanto, a grande maioria dos estudos tem-se centrado nas atividades de emissão relacionadas com o campus, numa tentativa de incorporar algum aspeto dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas na sua quantificação, o que cria uma lacuna

na literatura no que diz respeito à secção administrativa, que se concentra na gestão operacional, financeira e logística da instituição na promoção das suas missões educativas e de investigação, lacuna que este estudo pretende colmatar.

A Universidade de Pernambuco (UPE), através do seu Plano de Logística Sustentável (PLS), lançado em junho de 2024, criou várias iniciativas para promover o compromisso da instituição com a implementação da Agenda 2030 das Nações Unidas, tendo em conta os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), bem como a igualdade étnica e racial nos seus vários campus (UPE, 2024). Neste contexto, um dos seus campuses, a Escola Politécnica de Pernambuco, tem vindo a quantificar as suas emissões para se alinhar com o plano de logística sustentável da instituição e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas. Posteriormente, a administração da instituição solicitou que aplicássemos uma abordagem semelhante à utilizada para as unidades administrativas, a fim de identificar as principais fontes de emissões de GHG

nessas unidades e possíveis medidas de mitigação. Conforme proposto por Romão *et al*. (2025), garantir o apoio das partes interessadas é essencial para implementar estratégias eficazes de mitigação da pegada de carbono, com vista a alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas.

Por fim, este estudo tem como objetivo determinar a pegada de carbono das unidades administrativas da UPE, localizadas em Santo Amaro, PE, Brasil, por meio da aplicação de uma metodologia de estudo de caso. Para calcular a pegada de carbono, o estudo levou em consideração os resíduos sólidos gerados por cada unidade e o consumo de eletricidade. Essas informações ajudarão as unidades administrativas da instituição a fortalecer suas metas de sustentabilidade, conforme descrito no Plano de Logística Sustentável (PLS).

Materiais e métodos

Localização de estudo

A Figura 1 apresenta uma representação gráfica da estrutura da unidade administrativa. A sede da Universidade de Pernambuco (UPE) está localizada nas coordenadas 8° 02′ 38,86″ S e 34° 53′ 09,84″ W. Possui área estimada de 8.373,32 m². O prédio abriga a Reitoria, as Vice-Reitorias, os Órgãos Colegiados Superiores (CONSUN e CEPE), os órgãos de apoio, a Procuradoria (PROJUR) e o Núcleo de Comunicação e Tecnologia da Informação (NCTI), o Centro de Educação a Distância (NEAD), o Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) e a Editora da Universidade de Pernambuco (EDUPE) (UPE, 2024). Com grande presença de árvores ao redor do seu perímetro.



Figura 1: Ilustração das unidades administrativas da UPE
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o Google Earth e o ArcMap 10.3 (2025)

A unidade administrativa conta com cerca de 257 funcionários, distribuídos por vários departamentos. A sede da UPE possui a infraestrutura necessária para a coleta seletiva de resíduos sólidos, com lixeiras já posicionadas em pontos estratégicos ao redor do prédio. No entanto, essas lixeiras recebem todos os tipos de resíduos, tanto recicláveis quanto não recicláveis, sem indicar quais materiais podem ser descartados ou reciclados (Romão *et al.,* 2025). Nesse sentido, foi criado um adesivo impresso para facilitar a separação dos diversos tipos de resíduos sólidos gerados. Além disso, a energia elétrica do escritório é adquirida da Neoenergia, uma holding brasileira, e a empresa monitora diretamente o consumo de energia antes de distribuí-la aos edifícios.

Resíduos sólidos gerados

A análise dos resíduos sólidos gerados foi realizada com base em dados gerados a partir da quantificação desses resíduos por meio de operações de triagem, com o objetivo de determinar a composição gravimétrica e as porcentagens dos componentes recicláveis e orgânicos. Posteriormente, esses valores foram utilizados para calcular a pegada de carbono. Além disso, foi realizada uma sessão de conscientização para informar às equipes de limpeza sobre o que se espera delas e sobre como a coleta seria realizada. Além disso, no que diz respeito ao processo de triagem de resíduos administrativos, trata-se de uma análise direta dos resíduos que examina o lixo produzido e fornece um procedimento eficiente de controle e identificação para reduzir o desperdício (Romão *et al.,* 2025). Isso foi realizado pelas equipes de limpeza utilizando as lixeiras e as etiquetas de identificação fornecidas nelas. A coleta e a triagem de dados foram realizadas ao longo de três dias, de 20 a 22 de outubro de 2025, para caracterizar os resíduos administrativos gerados. A triagem foi realizada manualmente sobre uma mesa de plástico, com os resíduos separados em cinco categorias (papel, plástico, vidro, alumínio, metal e outros tipos de resíduos), conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2: Triagem e quantificação de resíduos sólidos administrativos
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os resíduos foram armazenados em um saco plástico e pesados em uma balança digital *(Ramuza IDR – 7500)* com capacidade para 30 kg para análise gravimétrica da composição. Além disso, as porcentagens de cada componente foram calculadas em relação ao peso total da amostra em sua forma original.

Estimativa das Emissões de Carbono

As emissões administrativas de carbono foram calculadas para 2024, de acordo com as diretrizes do Protocolo de GHG e do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Isso implica agrupar as fontes de emissão em diretas e indiretas: as diretas são aquelas sobre as quais a instituição tem controle direto, enquanto as indiretas são aquelas sobre as quais a instituição não tem influência direta e que são produzidas fora da instituição (o que inclui tanto o consumo de eletricidade quanto os resíduos sólidos administrativos). A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados na quantificação das emissões.

Escopo	Processo	Unidades	Fator de emissão	Referência
Escopo 2	Eletricidade adquirida	kWh	0,0545 média	(MCTI, 2024)
Escopo 3	Resíduos sólidos de origem administrativa	kg/ano	Decaimento de 1ª ordem	(IPCC, 2006)

Tabela 1: Âmbito e parâmetros para a quantificação das emissões
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A emissão de metano (CH_4) relativa aos resíduos sólidos administrativos foi calculada com base na abordagem da primeira ordem, conforme descrita pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que considera a taxa de carbono orgânico degradável de cada tipo de resíduo (IPCC, 2006). O metano foi então convertido para determinar o potencial de aquecimento global ao longo de um período de 100 anos. Com base no presente estudo, presume-se que o dióxido de carbono tenha um potencial de aquecimento global (GWP) de 1 e o metano um (GWP) de 28 (DESNZ, 2024).

Resultados e discussão

Resíduos sólidos gerados

A Tabela 2 apresenta a quantidade de resíduos gerados ao longo dos três dias de quantificação na secretaria da reitoria. Os resíduos são classificados de acordo com seu ponto de origem. Para a estimativa semanal, consideram-se 5 dias, pois a maioria das atividades laborais começa às segundas-feiras e termina às sextas-feiras. Da mesma forma, para a estimativa mensal, também se consideram 5 dias por semana. O mês de outubro foi considerado na estimativa mensal, pois a quantificação foi realizada nesse mesmo mês.

Resíduos sólidos (Localização)	Média diária (kg)	kg/semana	kg/mês	kg/ano
Espaço de escritórios	11,97	59,83	275,31	3,112,2
Banheiros	6,12	30,6	140,76	1,591,2
Folhas (estacionamentos)	37,90	189,48	871,70	9,872,2
Orgânicos (cozinha)	8,33	41,67	191,59	2,165,8
Total	**64,32**	**321,58**	**1,479,36**	**16,741,4**

Tabela 2: Quantificação dos resíduos sólidos gerados
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Assim, a média diária de resíduos sólidos é de 64,32 kg, enquanto o total de resíduos sólidos estimados em um ano chega a 16.741,4 kg/ano, e as folhas das árvores ao redor das instalações representam grande parte dos resíduos sólidos gerados no local. A Figura 3 apresenta os resultados da análise gravimétrica e as respectivas composições.

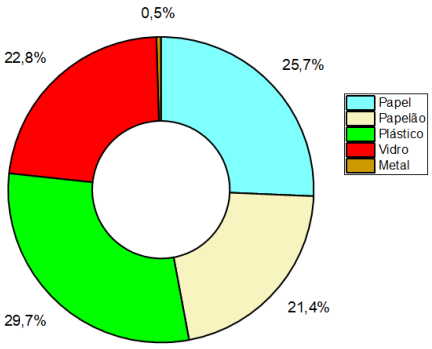


Figura 3: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

De acordo com a análise gravimétrica, o plástico representa aproximadamente 29,7%, sendo que a grande maioria consiste em copos descartáveis e embalagens plásticas. Além disso, essa fração incluiu plástico utilizado em garrafas de água. Além do plástico, o papel representou cerca de 25,7%, proveniente principalmente de uso administrativo; a maior parte estava em boas condições, com alguns itens sendo descartados no lixo devido a um possível erro de impressão. Outras frações de resíduos, como vidro (22,8%), papelão (21,4%) e uma proporção moderada de metal (cerca de 0,5%). Além disso, outros itens, como toner de impressora, cabos de equipamentos eletrônicos e frascos de produtos químicos, foram encontrados durante a triagem, um achado também relatado por outros estudos (Romão *et al.,* 2025).

Quantificação das emissões de carbono provenientes de resíduos sólidos

De acordo com a quantificação gravimétrica, o metano gerado a partir dos resíduos sólidos dos blocos administrativos totaliza 2,87 tCH_4 em 2024, o que equivale a 80,36 tCO_2e. Além disso, no que diz respeito à estimativa semanal de resíduos sólidos, a quantidade de metano gerada é de 0,06 tCH_4 (equivalente a 1,68 tCO_2e), e a estimativa mensal é de 0,25 tCH_4 (equivalente a 7,0 tCO_2e). No entanto, outras fontes de emissões, como transporte e consumo de água, não foram incluídas nos cálculos de emissões.

Quantificação das Emissões de Carbono da Eletricidade

O consumo total de energia pelas unidades administrativas em 2024 foi de 572.273,24 kWh, sendo fevereiro (54.766,32 kWh) e março (59.349,36 kWh) os meses com maior consumo de eletricidade. Isso provavelmente pode ser atribuído ao período de pico das atividades acadêmicas, já que os semestres letivos geralmente começam entre fevereiro e março. A Figura 4 mostra o consumo mensal de eletricidade da unidade administrativa para o ano de 2024.

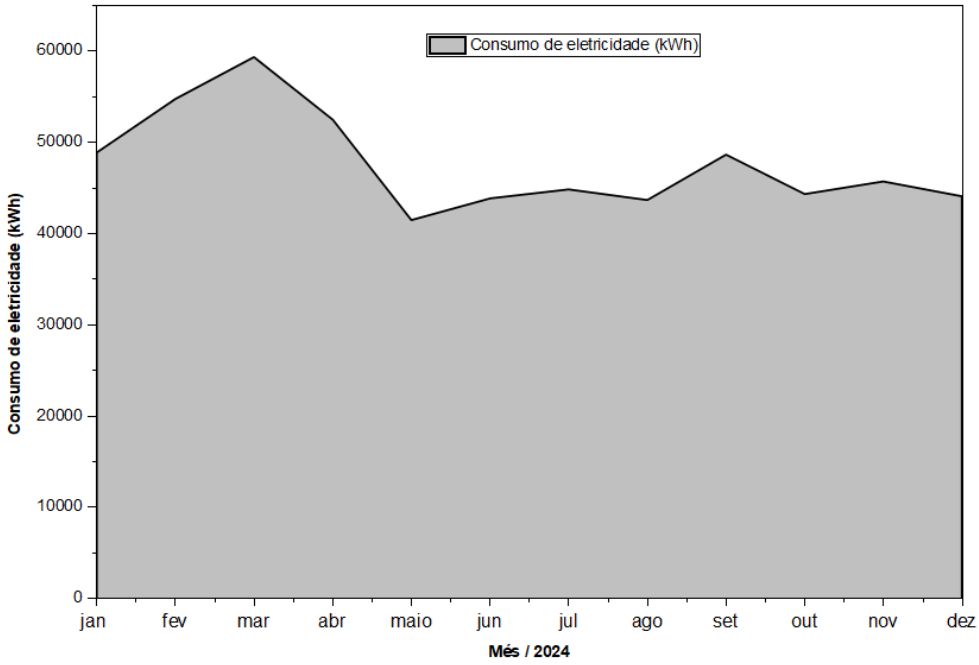


Figura 5: Consumo de eletricidade da Reitoria da UPE em ano de 2024
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As emissões totais de carbono decorrentes do consumo de eletricidade nas unidades administrativas totalizam 30,51 tCO_2e, com base no fator de emissão mensal correspondente do Ministério da Ciência e Tecnologia para o ano de 2024, conforme mostrado na Figura 5.

Da mesma forma, utilizando o fator de conversão médio anual da Tabela 1, as emissões das unidades administrativas totalizam 31,18 tCO_2e em 2024, o que corresponde a 0,12 tCO_2e per capita. Além disso, as emissões mais elevadas foram observadas entre setembro e outubro, variando de 4,46 a 5,0 tCO_2e, apesar de haver menor consumo quando se consideram as emissões por mês, com ambos os meses apresentando um fator de emissão de 0,0917 e 0,1127, respectivamente, enquanto as emissões mais baixas foram registradas em abril e maio (1,02 a 1,17 tCO_2e), apesar de abril ter um consumo de 52.511,20 kWh em comparação com maio. No entanto, essas emissões não refletiram o aumento no consumo de eletricidade, pois os fatores de conversão variam de mês a mês, como observado em fevereiro e março, com um consumo mais elevado de 54.766,32 kWh e 59.349,36 kWh, enquanto o fator de emissão para os respectivos meses foi de 0,0376 e 0,0278 (MCTI,2024), respectivamente.

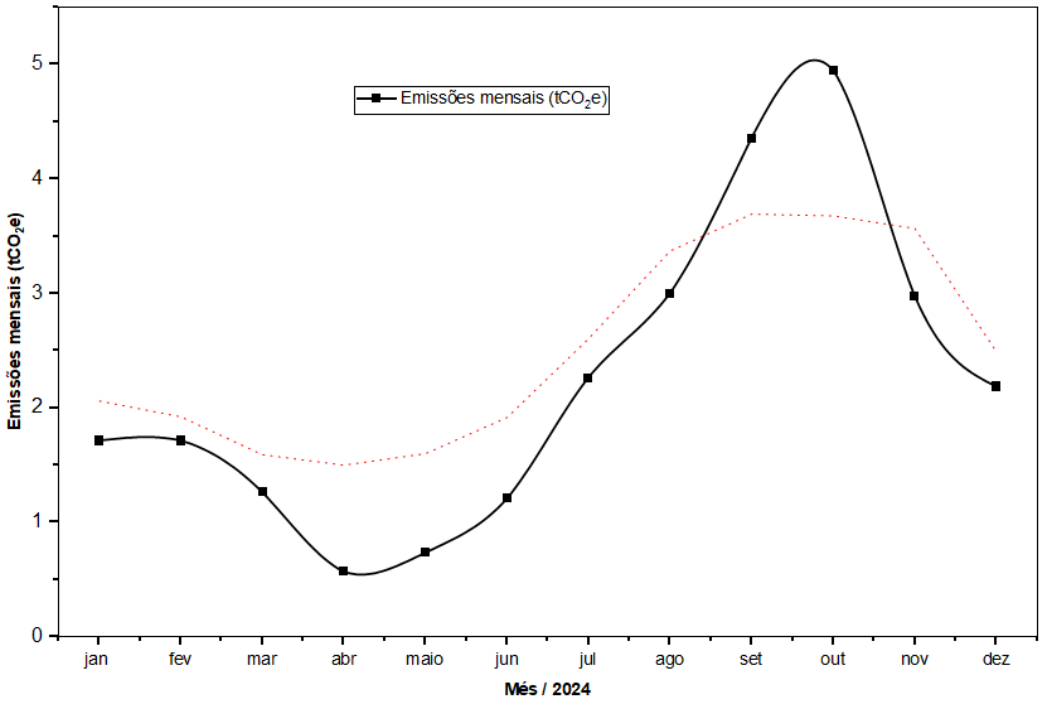


Figura 5: Emissões de carbono decorrentes do consumo mensal de eletricidade nas unidades administrativas em 2024
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Considerações Finais

Este estudo demonstrou que as unidades administrativas das instituições de ensino superior (IES) constituem uma fonte significativa de emissões de gases de efeito estufa, embora sejam frequentemente ignoradas. Utilizando as unidades administrativas da Universidade de Pernambuco como estudo de caso, constatou-se que tanto o consumo de eletricidade quanto os resíduos sólidos contribuem significativamente para a pegada de carbono total da unidade. Os resultados demonstraram que a gestão de resíduos sólidos, particularmente a alta proporção de materiais recicláveis, como plásticos e papel, representa uma grande oportunidade para reduzir as emissões por meio de práticas aprimoradas de coleta seletiva. Embora o consumo de eletricidade continue sendo uma fonte significativa de emissões, isso ressalta a necessidade de medidas adicionais de eficiência energética para reduzir o consumo e melhorar o monitoramento do uso de aparelhos, como aparelhos de ar condicionado e outros equipamentos que consomem muita energia nas unidades administrativas.

Consequentemente, a adoção de sistemas estruturados de separação de resíduos, juntamente com campanhas de conscientização e o envolvimento das partes interessadas, revelou-se essencial para a coleta eficaz de dados e serve como base para práticas de sustentabilidade de longo prazo, o que ficou altamente evidente a partir dos resultados obtidos. Nesse sentido, este estudo visa reforçar a importância de integrar as operações administrativas às estratégias institucionais de descarbonização, que frequentemente se concentram principalmente em atividades acadêmicas e relacionadas ao campus nas quantificações de emissões.

Em conclusão, os resultados ajudam a preencher a lacuna na literatura relativa à quantificação das emissões das unidades administrativas em instituições de ensino superior no Sul Global e fornecem um guia valioso para outras instituições que buscam quantificar e reduzir suas emissões de carbono. Além disso, aspectos como transporte, consumo de água e atividades relacionadas a compras devem ser considerados em pesquisas futuras, e estratégias de mitigação também devem ser avaliadas na promoção das metas sustentáveis da instituição, conforme delineado em seu plano de logística sustentável (PLS).

Agradecimentos

Gostaria de agradecer o apoio e a assistência financeira da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Brasil, pelo financiamento da minha pesquisa sob o Código de Financiamento 001. Também gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão à Escola Politécnica de Pernambuco (POLI) pelo financiamento do projeto de extensão, bem como a toda a equipe de limpeza e ao pessoal administrativo que colaboraram na pesquisa.

Referências Bibliográficas

CLABEAUX, Raeanne *et al.* Assessing the carbon footprint of a university campus using a life cycle assessment approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 122600, nov. 2020.

FILIMONAU, Viachaslau *et al.* The carbon footprint of a UK University during the COVID-19 lockdown. **Science of The Total Environment**, v. 756, p. 143964, 20 fev. 2021.

DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO (DESNZ). **Government conversion factors for company reporting of greenhouse gas emissions - GOV.UK**. Disponível em: https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting. Acesso em: 3 abr. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE (IPCC). **Chapter 3 Solid waste disposal: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: https://www.ipcc-nggiphttps://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf. Acesso em: 8 dez. 2024.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao. Acesso em: 6 dez. 2024.

NOLASCO, Elaine *et al.* Characterization of solid wastes as a tool to implement waste management strategies in a university campus. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 22, n. 1, p. 217–236, 22 jan. 2021.

OSORIO, Ana M. *et al.* Towards Carbon Neutrality in Higher Education Institutions: Case of Two Private Universities in Colombia. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 3, 1 fev. 2022.

UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO (UPE) **Reitoria**. Disponível em: https://novosite.reitoria.upe.br/reitoria/. Acesso em: 3 abr. 2026.

ROCHA, Thaís de Almeida *et al.* Carbon footprint in an educational institution and compensation potential in urban forests. **Environmental Development**, v. 46, p. 100860, 1 jun. 2023.

ROMÃO, Erica Leonor *et al.* A university campus in Brazil and its carbon footprint aligned with sustainability actions. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, 2025.

UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO (UPE). **Sustentabilidade**. Disponível em: https://novosite.reitoria.upe.br/sustentabilidade/. Acesso em: 2 abr. 2026.

VÁSQUEZ, Leonardo *et al.* Evaluation of greenhouse gas emissions and proposals for their reduction at a university campus in Chile. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 924–930, 1 dez. 2015.

POTENCIAL DE MEDIDAS RELACIONADAS ÀS FLORESTAS COMERCIAIS E NATIVAS NA MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO PARANÁ: 2025 - 2050

1 Matheus Bueno Patrício, 2Débora Lia Perazzoli, 3 Amanda Pontes Maia Pires Alcantara, 4 Helder Rafael Nocko

1 EnvEx Engenharia e Consultoria e Universidade de Santiago de Compostela, e-mail:eng.matheusbueno@gmail.com; 2 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: debora.perazzoli@envexengenharia.com.br; 3 1 EnvEx Engenharia e Consultoria e Universidade Federal do Ceará: amanda.alcantara@envexengenharia.com.br, 4 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: helder@envexengenharia.com.br

Palavras-chave: curva de custo marginal de abatimento; gases de efeito estufa; remoções de carbono.

Resumo

As florestas desempenham papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas e atuam como sumidouros de carbono ou provedoras de serviços ecossistêmicos essenciais. Este estudo avalia o potencial de mitigação e compensação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) de cinco medidas do setor florestal no Estado do Paraná, entre 2025 e 2050: adoção de sistemas de produção agrícola integrada (ILPF); expansão da área de silvicultura; adoção de sistemas agroflorestais (SAF); restauração da vegetação nativa; e ampliação de unidades de conservação. Foram construídos um cenário-base e três cenários de mitigação com diferentes níveis de ambição, para tal foi utilizado fatores de remoção de carbono disponíveis na literatura e estimativas de custo marginal de abatimento (CMA). Os resultados indicam que, no cenário mais ambicioso, as medidas avaliadas permitem remover até 60,5 $MtCO_2e$ em 2050, o que viabilizaria a neutralidade climática do Estado. A restauração da vegetação nativa apresenta o maior potencial acumulado de remoção, embora associada aos maiores custos. Os sistemas integrados, por sua vez, oferecem os maiores retornos financeiros. A análise reforça que a implementação coordenada de medidas florestais, orientada por políticas públicas robustas e por uma abordagem multissetorial, é fundamental para o cumprimento das metas climáticas estaduais estabelecidas pelo Decreto nº 8.937/2021 e alinhadas à campanha *Race to Zero*.

Introdução

É amplamente reconhecido o papel fundamental desempenhado pelos ecossistemas florestais na remoção de CO_2 da atmosfera, caracterizando-os como importantes sumidouros de carbono. No contexto global atual, o manejo florestal, que abrange a conservação e restauração da vegetação nativa e o manejo de florestas para fins comerciais, pode gerar múltiplos benefícios socioeconômicos e ambientais, diante da urgência de implementação de ações imediatas e efetivas para a mitigação das mudanças climáticas (PSISTAKI et al., 2024). Esses benefícios incluem a mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e efeitos adversos de eventos climáticos extremos, pois as florestas servem como barreiras ou reguladores e desempenham um importante papel no controle de inundações, na prevenção de deslizamentos, na gestão da água durante períodos de seca e na proteção durante tempestades, bem como de outros serviços ecossistêmicos prestados (MANIMARAN e ASWITHA, 2024). Portanto, é fundamental o delineamento de ações de mitigação e adaptação climática que incorporem o compartimento florestal como elemento estratégico, de forma a impulsionar a implementação de políticas públicas integradas, uma vez que essas áreas se relacionam com aspectos econômicos e, também, influenciam a biodiversidade e o clima regional (LUDVIG *et al*., 2024).

No Estado do Paraná, a gestão florestal caracteriza-se por sua natureza multissetorial; portanto, a implementação de medidas de mitigação e adaptação no setor florestal deve considerar as especificidades estaduais e a diversidade de usos e funções em nível local, bem como ser avaliada sob a ótica da promoção de sistemas mais resilientes (IBGE, 2025; MAPBIOMAS, 2026).

Esta articulação se consolida por meio da Política Estadual sobre Mudanças do Clima, Lei Estadual nº 17133/2012 (PARANÁ, 2012) e seus instrumentos (comunicação estadual, inventários de emissões de GEE e planos estaduais sobre mudança do clima), que apresentam interfaces diretas com a gestão florestal. O Plano setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (ciclo 2020 até 2030) e o Plano de Descarbonização da Economia Paranaense (PEDEP) são ferramentas que expressam a multissetorialidade da gestão florestal para mitigação e adaptação climática (PARANÁ 2023a; 2025). Essas ações alinham-se ao compromisso firmado pelo Estado por meio do Decreto Estadual nº 8.937/2021 (PARANÁ, 2021), que formaliza a meta de redução de 50% das emissões até 2030, o alcance da neutralidade climática em 2050 e a *Race to Resilience* que é voltada ao fortalecimento da resiliência ou da capacidade adaptativa do estado frente a eventos climáticos extremos.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de mitigação ou compensação de emissões de gases de efeito estufa de medidas do setor florestal no período de 2025 a 2050, considerando as especificidades do Estado do Paraná e as políticas públicas vigentes. Adicionalmente, buscou-se analisar essas medidas à luz dos custos marginais de abatimento, para subsidiar a tomada de decisão quanto à sua viabilidade econômica e contribuição para o alcance das metas estaduais de mitigação.

Materiais e métodos

Área de Estudo e Base de Dados

A área de estudo abrange o território do Estado do Paraná devido sua relevância no setor de Agricultura, Florestas e Outros usos da Terra (AFOLU). Para a delimitação da cobertura vegetal e uso do solo, utilizou-se os dados do MapBiomas que demonstrou que o Estado possui cerca de 5,21 milhões de hectares de florestas e 1,134 milhão de hectares de plantios silviculturais (MAPBIOMAS, 2024). Adicionalmente, a análise de potencial de mitigação considerou a conversão de áreas de pastagens degradadas, das quais apresentam cerca de 976,2 mil ha de pastagens com algum nível de degradação, sendo 77,1% de vigor médio e 22,9% baixo (MAPBIOMAS, 2025).

A caracterização das fontes emissoras baseou-se no "Segundo Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Paraná 2005-2019" (2INVPR), no qual o setor de AFOLU foi apontado como a principal fonte de emissão de GEE em 2019, com cerca de 54% das emissões totais (38,811 $MtCO_2e$). Do total emitido pelo setor, 45% provêm das atividades de pecuária, 33% da agricultura e 22% da Mudança de Uso da Terra (MUT) (PARANÁ, 2023b). Portanto, considerou-se que a exploração florestal no Paraná se concentra em duas frentes: o extrativismo vegetal (maior produtor nacional de erva-mate e pinhão), e a silvicultura (segundo maior valor de produção florestal, R$6,3 bilhões de reais, 17% do total nacional) (IBGE, 2025). Esses dados serviram como base para avaliar o potencial do Estado para diversificação das atividades no setor.

Cenários de mitigação

Para o presente estudo, considerou-se quatro cenários de mitigação:

a. Cenário-base: Refere-se à manutenção das condições atuais de emissão no Estado que caracteriza a linha de base para comparação com os demais cenários. Estimou-se as emissões iniciais conforme apresentado no 2INVPR. Já para o ano de 2050 utilizou-se os dados do cenário de referência do Plano de Descarbonização da Economia Paranaense (PEDEP), conforme apresentado na Tabela 01 (PARANÁ 2023b; 2025). A partir disso, definiu-se taxas constantes para constituir a variação de emissões do estado no período entre 2019 e 2050.

Tabela 01: Valores utilizados na construção do cenário-base.

Setor de emissão	Emissões setoriais ($MtCO_2e$)		Variação constante ($MtCO_2e$/ano)[c]
	2019 - 2INVPR[a]	2050 – PEDEP[b]	
Energia[c]	25,918	42,52	2,21
IPPU - Processos Industriais e Uso de Produtos	3,781	10,65	0,47
AFOLU - Agricultura, floresta e outros usos da terra	38,811	-10,06	-1,58
RSeE - Resíduos Sólidos e Efluentes	3,89	5,9	0,06
Total	72,4	49,01	

Legenda: a: 2INVPR - Segundo Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Paraná 2005-2019 (PARANÁ, 2023b); b: PEDEP - Plano de Descarbonização da Economia Paranaense (PARANÁ, 2025); c: Considera as emissões do setor de energia e transportes, conforme apresentado no PEDEP.
Nota: Na tabela, os dados de emissão/variação de CO_2e com valores positivos apresentam um acréscimo anual e dados com valores negativos apresentam um decréscimo anual de emissão.

Definiu -se os cenários de mitigação (1 a 3) de forma exploratória, considerando a disponibilidade de dados para cada tecnologia e o potencial de expansão das medidas no território. Considerou-se a mitigação a partir do acréscimo de área ocupada por cada medida entre 2025 e 2050. Esses cenários foram organizados da seguinte forma:

b. Cenário 1: Cenário mais disruptivo, com maior complexidade de implementação, por contemplar os maiores níveis de adoção das tecnologias selecionadas entre as medidas de descarbonização;
c. Cenário 2: Condição intermediária em relação aos demais cenários, com níveis moderados de adoção das tecnologias;
d. Cenário 3: Cenário menos ambicioso, com menores percentuais de adoção das tecnologias entre os cenários considerados.

Medidas de mitigação aplicadas

Com base nos cenários e suas premissas, foram definidas medidas de mitigação que promovem o aumento da participação da cobertura florestal, fundamentando-se na manutenção da diversidade de atividades no território, nas características econômicas do Estado, aliadas à redução das vulnerabilidades climáticas e à conservação da biodiversidade (Tabela 02).

Tabela 02 - Detalhamento das medidas de mitigação e compensação de emissões no setor AFOLU (Agricultura, florestal e outros usos da terra).

Medidas de mitigação	Descrição
Adotar sistemas de produção agrícola integrada	Objetiva-se em promover a produção por meio da utilização do solo para finalidades distintas, porém integradas, como a lavoura-pecuária (ILP), pecuária-floresta (IPF), lavoura-floresta (ILF) e lavoura-pecuária-floresta (ILPF), Sistema Santa Fé e outros.
Expandir a área de silvicultura	Refere-se à expansão de plantações de florestas comerciais; no Paraná as mais usuais são eucalipto e pinus.
Adoção de sistemas agroflorestais (SAF)	Trata-se de sistemas que combinam, de forma planejada, árvores ou arbustos com cultivos agrícolas e/ou criação de animais na mesma área, simultaneamente ou em períodos alternados, visando diversificar a produção e renda, proteger o solo e a água e promover o envolvimento local.
Realizar a restauração da vegetação nativa	Estimular a restauração de áreas prioritárias para criação de corredores ecológicos, principalmente vegetação ripária, correlacionando a medida com ações de segurança hídrica e de conservação da biodiversidade do Estado.
Tornar fragmentos florestais prioritários em unidades de conservação	Trata-se da delimitação dos fragmentos florestais mais significativos em Unidades de Conservação, visando a conservação dos estoques de carbono e a disponibilidade de serviços ecossistêmicos para a região de entorno.

A seguir, as premissas adotadas na modelagem de cada medida de mitigação foram detalhadas.

a. Adoção de sistemas de produção agrícola integrada: Considera-se o acréscimo do componente florestal com ênfase na adoção do sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), reconhecido como medida promissora para a redução das emissões provenientes da pecuária, principal fonte de emissões no setor AFOLU do Paraná (MANZATTO *et al*., 2020; PARANÁ, 2023). Adotou-se o fator de remoção *default* de 3,79 tCO_2e/ha/ano, conforme Carvalho *et al*. (2010). Para a projeção da expansão da tecnologia no Estado, considerou-se a área de mosaico de uso quantificada para 2021, estimada em 3.181.596 ha, que se refere a áreas com usos múltiplos, sem distinção clara entre uso agrícola, pecuário ou áreas em regeneração ainda não classificadas como floresta secundária (MAPBIOMAS, 2024a). Como valor inicial, utilizou-se a área de 633.106 hectares em 2021 (REDE ILPF, s.d.), correspondente a 19,8% da área de mosaico de uso. As taxas anuais de crescimento da área ocupada por sistemas integrados foram de 2,85%, 1,43% e 0,02% nos cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Com base nessas taxas, estimou-se participações de 45%, 30% e 20% da área total de mosaico de uso até 2050, para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Por fim, adotou-se o Custo Marginal de Abatimento (CMA) de -US$ 2.299,02/tCO_2e (valor original de -US$ 1.978,00/tCO_2e, atualizado conforme *Consumer Price Index* (CPI)) (MCTI, 2017).

b. Expandir a Área de silvicultura: Como valor inicial, adotou-se o dado do MapBiomas para 2023, que estima a área de florestas plantadas em 1,167 milhão ha (MAPBIOMAS, 2024a). Para a estimativa da expansão, utilizou-se como referência a área de pastagens degradadas no Estado em 2023, quantificadas em 1.343.180 ha (MAPBIOMAS, 2024b). A partir desse total, definiu-se que a silvicultura passaria a ocupar diferentes percentuais de conversão das áreas de pastagens degradadas, sendo 50%, 25% e 10% nos cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Manteve-se a proporção entre as espécies predominantes, sendo 62% de pinus e 38% de eucalipto, para as projeções de expansão e respectivas remoções. Utilizaram-se os fatores de emissões de 34,14 tCO_2e/ha/ano para pinus e 42,35 tCO_2e/ha/ano para eucalipto (MCTI, 2017). Adicionalmente, consideraram-se os ciclos de rotação (período entre o plantio e a colheita), definidos em dez anos para pinus e sete anos para eucalipto. Em função da diversidade de destinações da madeira, adotou-se a premissa conservadora de que todo o carbono estocado ao longo do ciclo de rotação é emitido no ano da colheita, considerando o uso do material e a decomposição da biomassa residual (copa, manta orgânica e raízes) (MCT, 2006).

c. Adoção de sistemas agroflorestais (SAF): De acordo com o Plano ABC+/PR, essa tecnologia ocupa aproximadamente 1,3 milhão de hectares (PARANÁ, 2023a). Assumiu-se que os sistemas agroflorestais alcançarão os mesmos percentuais de ocupação da área de mosaico de uso adotados para os sistemas integrados, correspondentes a 45%, 30% e 20% até 2050, nos cenários 1, 2 e 3, respectivamente. O fator de remoção adotado foi de 4,5 tCO_2e/ha/ano (STEENBOCK *et al*., 2013). Para o custo marginal de abatimento, utilizou-se a média dos valores apresentados por Carbonari *et al*. (2019) para diferentes arranjos agroflorestais (café com abacate: -US$ 529,40/tCO_2e; café com durian: -US$ 234,70/tCO_2e; café com cássia: -US$ 15,10/tCO_2e), resultando em um CMA médio de -US$ 329,25/tCO_2e (-US$ 259,73/tCO_2e, atualizado conforme CPI).

d. Realizar a restauração da vegetação nativa: Foram utilizados dados de áreas prioritárias para restauração de formações florestais no Estado do Paraná, excluindo campos e cerrado, conforme mapeamento que define as Áreas Estratégicas para Conservação e Restauração (AECR) (IAT, 2023). Os cenários diferenciam-se pelo percentual da área total a ser restaurada, estimada em 4.777.066 ha, sendo 90%, 50% e 10% para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente. A distribuição da restauração entre formações florestais seguiu a proporção da área disponível: Floresta Estacional Semidecidual (FES), com 2.854.002 ha (60%); Floresta Ombrófila Densa (FOD), com 164.431 ha (3%); e Floresta Ombrófila Mista (FOM), com 1.758.633 ha (37%) (IAT, 2023). Os fatores de remoção adotados foram de 20,42 tCO_2e/ha/ano (FES), 12,52 tCO_2e/ha/ano (FOD) e 10,42 tCO_2e/ha/ano (FOM), conforme SEEG (2021). Após 20 anos, as áreas restauradas foram consideradas maduras, passando a adotar o fator de remoção de 0,32 tCO_2e/ha/ano, conforme SEEG (2020). O custo marginal de abatimento adotado foi de US$ 9,22/tCO_2e, conforme MCTI (2017).

e. Ampliação da área classificada como unidades de conservação: A metodologia de inventários de GEE, tanto em

âmbito nacional quanto subnacional, considera as áreas protegidas de forma diferenciada na contabilização das remoções, o que reforça sua relevância nos cenários de mitigação. Adotaram-se os mesmos percentuais de expansão por cenário utilizados para a restauração da vegetação nativa (90%, 50% e 10% para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente). Para o fator de remoção, utilizou-se o valor de 0,32 tCO_2e/ha/ano, conforme SEEG (2020), aplicável a florestas primárias sob regime de proteção. O custo marginal de abatimento baseou-se em Carbonari *et al*. (2019): US$ 0,20 - 2,60/tCO_2e, adotando-se o valor médio de US$ 1,77/tCO_2e (US$ 1,40/tCO_2e, atualizado conforme CPI).

Resultados

O cenário base demonstra a variação anual das emissões de 2005 a 2050 (Figura 01), levando em consideração os valores apresentados na Tabela 01, em todos os setores contidos no 2INVPR (PARANÁ 2023b; 2025). Nota-se que o PEDEP indica a redução das emissões do setor de AFOLU (-125%) ao comparar as emissões estimadas em 2050 e emissões quantificadas em 2019, indicando que o setor passa a remover mais CO_2 atmosférico do que emitir (Figura 01). Nos demais setores observou-se aumento das emissões: Energia - 64%, IPPU - 181,7% e RSeE - 51% (PARANÁ, 2025).

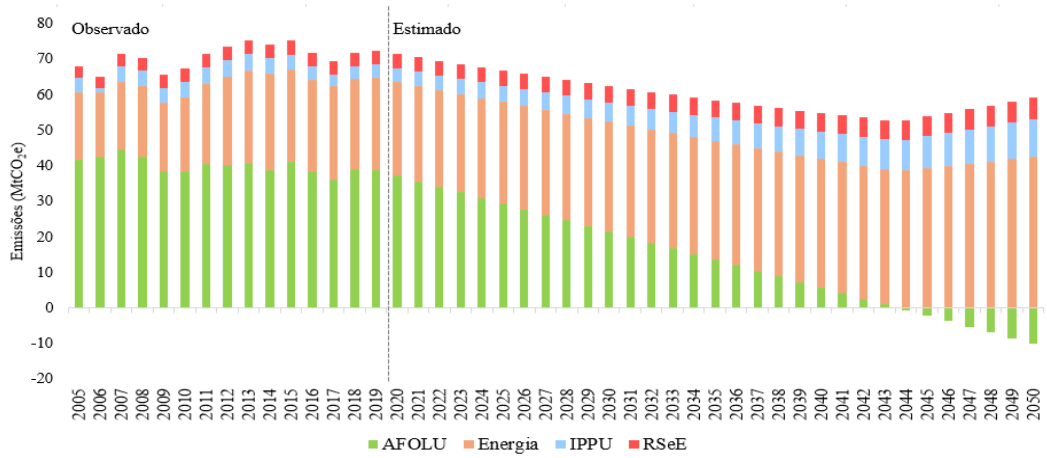


Figura 01: Emissões observadas estimadas para o Estado do Paraná, utilizadas no cenário-base.
Fonte: Elaboração própria.

Nesses cenários, obteve-se diferentes potenciais de remoção de carbono da atmosfera de acordo com os níveis de ambição adotados: no cenário 1 obteve-se remoção de 60,5 $MtCO_2e$ em 2050, e nos cenários 2 e 3, estimaram-se remoções de 33,2 $MtCO_2e$ e 8,33 $MtCO_2e$, respectivamente (Figura 02).

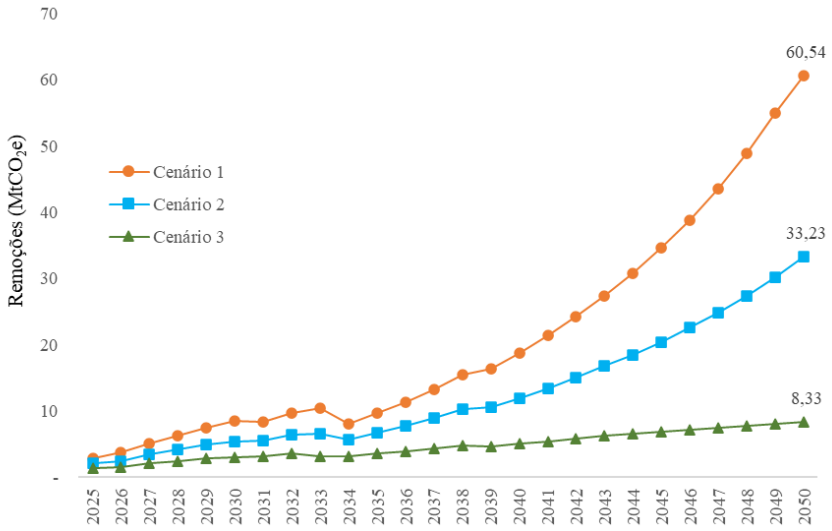


Figura 02: Projeção da remoção de carbono para os cenários de mitigação de emissões delimitados para o presente Estudo.
Fonte: Elaboração própria.

Na evolução anual de remoções, existem medidas com maior potencial, tanto por características das tecnologias quanto pela área ocupada. Na Figura 03 observa-se o valor acumulado para o período de 2025 até 2050, demonstrando o potencial de remoção da restauração da vegetação nativa e da silvicultura.

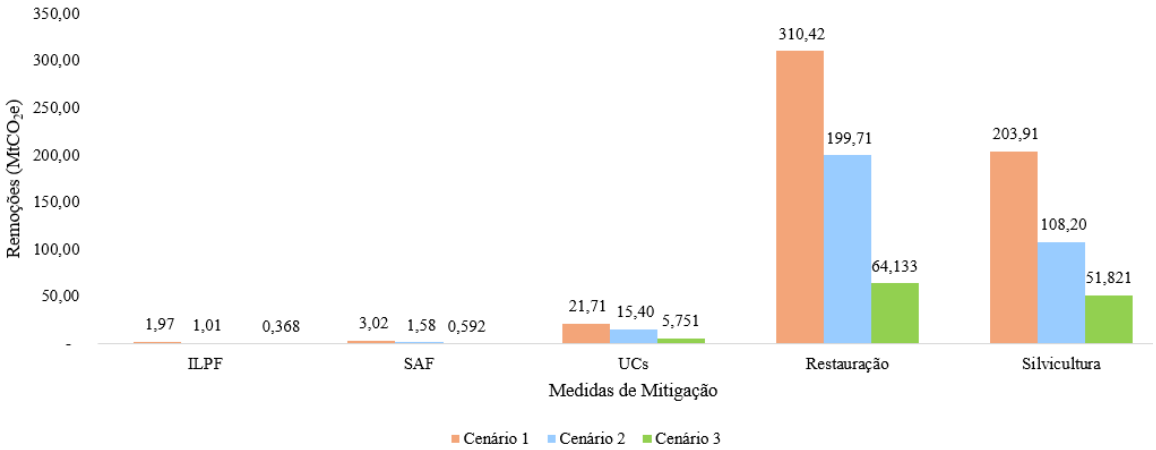


Figura 03: Remoções acumuladas por medida de mitigação e seus respectivos cenários.
Fonte: Elaboração própria.

As remoções de carbono impactarão diretamente nas emissões do cenário-base do Estado. Dessa forma, estimou-se a configuração do cenário de emissões do Paraná considerando a implementação das medidas preconizadas em cada cenário. Como se pode observar na Figura 04, o cenário 1 apresenta resultados satisfatórios para atender os compromissos climáticos do Estado do Paraná, apresentando uma alternativa à neutralização das emissões até 2050. Os demais cenários, 2 e 3, mantêm a trajetória negativa de emissões já observada pelo cenário-base, com redução mais acentuada, porém não promovem a neutralização dentro do período acordado.

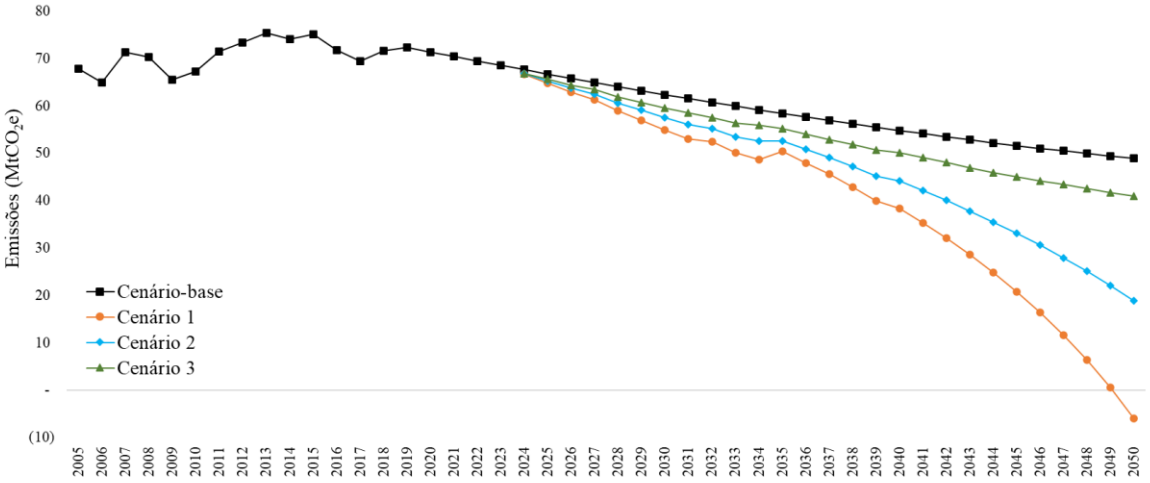


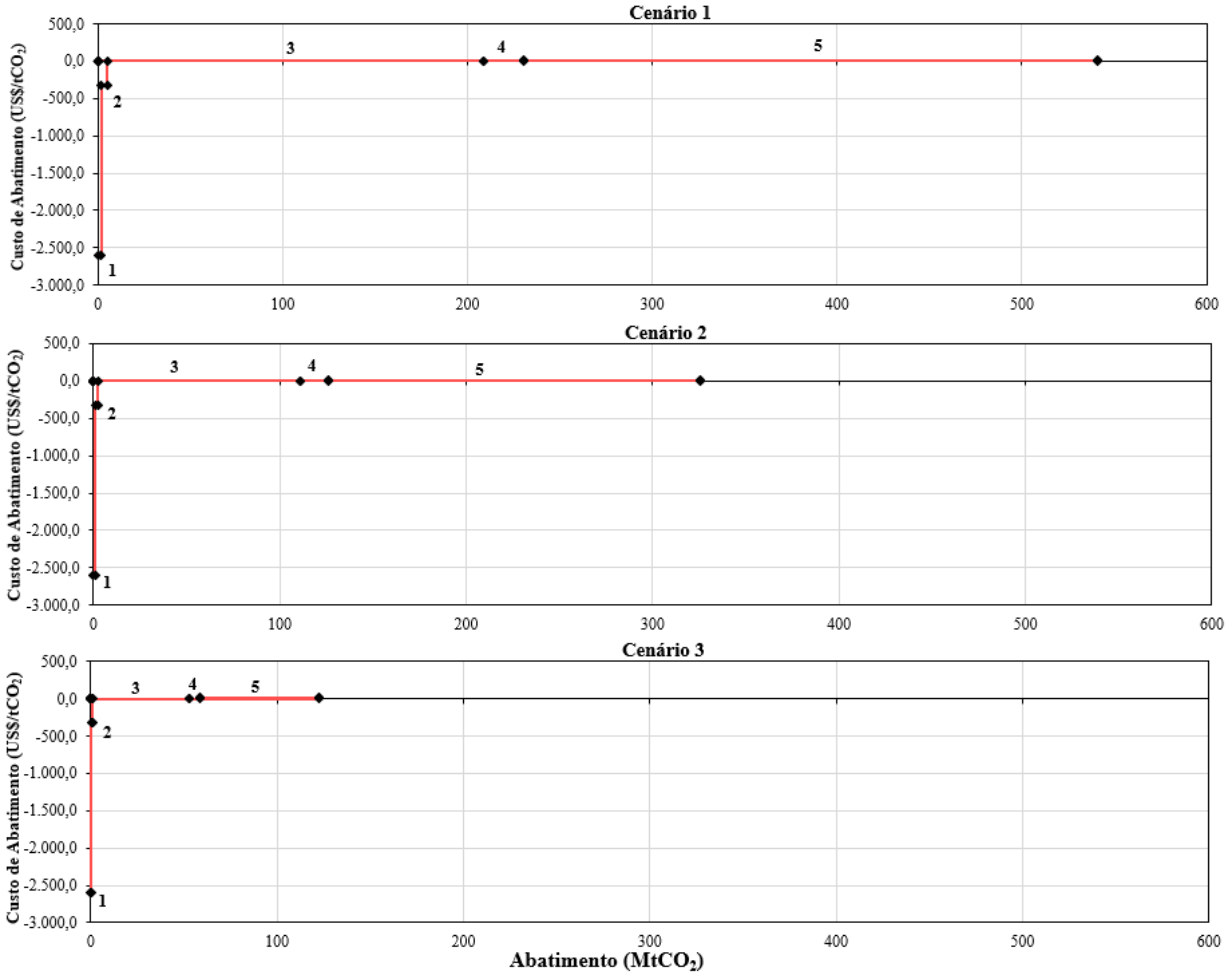
Figura 04: Estimativa de emissões no cenário- base e cenários de mitigação adotados no presente estudo.
Fonte: Elaboração própria.

A partir dos custos marginais de abatimento identificados na literatura, foram construídas as curvas apresentadas na Figura 05, as quais evidenciam o potencial de abatimento e os custos ou retornos financeiros associados às medidas de descarbonização.

Nesse contexto, destaca-se que a restauração da vegetação nativa apresenta o maior potencial acumulado de compensação de emissões. Entretanto, essa medida também apresenta os maiores custos associados, estimados em US$ 3,76 bilhões no cenário 1, US$ 2,42 bilhões no cenário 2 e US$ 776 milhões no cenário 3. Em contrapartida, os sistemas integrados apresentam o maior potencial de retorno financeiro, com valores estimados em US$ 5,13 bilhões no cenário 1, US$ 2,63 bilhões no cenário 2 e US$ 955 milhões no cenário 3.

Os custos associados às medidas refletem, em parte, a complexidade de sua implementação. Embora a restauração se destaque como uma solução climática de elevada efetividade, a dificuldade de mensuração e internalização de seus retornos financeiros pode representar um entrave à sua adoção em larga escala no território. Portanto, para além do ganho climático e ambiental, é importante destacar benefícios econômicos e sociais, como aqueles levantados por Kelmenson *et al.* (2017), que destaca a geração de empregos diretos e indiretos como benefícios dos investimentos em restauração. Nesse sentido, a aglutinação da estratégia de descarbonização por meio da combinação com ações que apresentem retornos econômicos mais diretos pode favorecer a viabilização da restauração, contribuindo para a recuperação de funções ecossistêmicas em áreas prioritárias, conforme as AECR (IAT, 2023).

No contexto das áreas prioritárias para restauração, entende-se que essa classificação auxilia a identificar parcelas do território paranaense com grande importância ambiental e, sob a ótica do presente trabalho, climática. Dessa forma, essas são áreas que poderão ser priorizadas para implementação de medidas de mudança de uso da terra para compensação das emissões de GEE, por meio de uma perspectiva integrada e focada na diversificação da paisagem, construindo uma matriz mais diversa e benéfica à manutenção dos serviços ecossistêmicos (RECKLING *et al.*, 2023; ARNDT; HELMING, 2025). Essa reconfiguração poderá buscar reduzir a dissimilaridade entre os usos do solo no entorno de fragmentos florestais, unidades de conservação e áreas de preservação permanente, como matas ciliares, considerando a escala de paisagem e de propriedade rural, focando em reduzir a pressão sobre essas áreas e o fornecimento de serviços ecossistêmicos em nível regional (ARNDT; HELMING, 2025). Como resultado, favorece-se a conectividade ecológica, a intensificação das interações entre a biodiversidade e aos usos produtivos do solo, relacionados aos sistemas integrados (ILPF, agroflorestas e agroecológica) e florestas comerciais, e a resiliência climática da paisagem (ARNDT; HELMING, 2025).



Legenda: 1 – Sistemas integrados (ILPF); 2 – Sistemas Agroflorestais; 3 – Silvicultura; 4 – UCs e 5 – Restauração.

Figura 05: Curva de custo de abatimento marginal para os cenários de mitigação avaliados.
Fonte: Elaboração própria.

Recomenda-se, ainda, a ampliação da difusão de conhecimento sobre as inter-relações entre a produção de *commodities*, como milho e soja, e a conservação da biodiversidade, evidenciando como essa integração pode contribuir para o aumento da produtividade e da rentabilidade das atividades agropecuárias. Nesse contexto, a promoção de uma matriz territorial baseada em usos múltiplos, com diferentes níveis de compatibilidade com a biodiversidade, apresenta-se como uma alternativa viável para o Estado, conforme suas características econômicas. Por fim, destaca-se que essa transição deve ocorrer de forma transversal em todas as regiões, sendo orientada por políticas públicas robustas, capazes de engajar os diversos atores locais. A estratégia de mitigação e adaptação às mudanças climáticas é, portanto, de natureza multissetorial, não se restringindo ao poder público, mas envolvendo de forma integrada todos os setores da sociedade.

Projeções indicam um aumento de temperatura em diferentes cenários futuros para o Paraná (MELO *et al.*, 2015), além da intensificação no número de ocorrências de outros eventos climáticos extremos, como tornados, secas e inundações (GONZALEZ, CARNIATTO e PEREIRA, 2023). Dessa forma, nota-se a importância de ações coordenadas voltadas à mitigação e adaptação climática de território, que irão para além de medidas voltadas à redução das emissões e devem compreender estratégias econômicas,

técnicas, culturais, educacionais, dentre outras, voltadas à disseminação e sensibilização acerca dos benefícios associados a usos do solo menos impactantes à biodiversidade, que reduzam a pressão humana sobre remanescentes florestais promotores de serviços ecossistêmicos essenciais para o contexto da emergência climática (RECKLING *et al.*, 2023; GONZALEZ; CARNIATTO; PEREIRA, 2023; ARNDT; HELMING, 2025; GUERRA *et al.*, 2026). Dessa forma, compreende-se que a implementação de projetos voltados à expansão de área ocupada por florestas, com espécies para finalidade comercial ou conservacionista, pode gerar impactos positivos para o Estado (MELO *et al*., 2015).

Conclusões

As florestas desempenham papel central na política climática e contribuem diretamente para ações de mitigação das emissões de GEE. Nesse contexto, o presente estudo buscou avaliar o papel de medidas de mitigação no cenário de emissões do Estado do Paraná no período de 2025 a 2050. Para tanto, foram selecionadas cinco medidas: adoção de sistemas de produção agrícola integrada; expansão da área de silvicultura; adoção de sistemas agroflorestais; restauração da vegetação nativa; e priorização de fragmentos florestais para criação de unidades de conservação.

A partir desse conjunto de medidas, foi realizada a avaliação considerando três cenários, que se diferenciam pelo nível de ambição, sendo o cenário 1 o mais ambicioso e o cenário 3 o menos ambicioso. O cenário-base foi fundamentado nos valores apresentados no PEDEP (PARANÁ, 2025). O setor de AFOLU, principal responsável pelas emissões no Paraná, apresenta uma trajetória de redução ao longo do período analisado. Nesse sentido, a implementação das medidas de descarbonização contribui para o reforço dessa tendência, além de cooperar para a compensação das emissões provenientes de outros setores. Em todos os cenários avaliados, a restauração da vegetação nativa apresenta os maiores valores acumulados de remoções de GEE, enquanto os sistemas integrados apresentam os menores. Entretanto, os elevados custos associados à restauração podem limitar sua atratividade para tomadores de decisão no contexto da gestão territorial.

Dentre os cenários analisados, apenas o cenário 1, o mais ambicioso, atinge a neutralidade de emissões, evidenciando que a contribuição de outros setores da economia será essencial para viabilizar a mitigação e compensação necessárias ao alcance da neutralidade climática até 2050, conforme preconizado pela campanha *Race to Zero*.

Referências

ARNDT, M.; HELMING, K. Agricultural diversification across spatial levels: a contribution to resilience and sustainability? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 385, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109547.

CARBONARI, D. E.; GROSJEAN, G., LÄDERACH, P., ... TAPASCO, J. Reviewing Vietnam's Nationally Determined Contribution: A New Perspective Using the Marginal Cost of Abatement. Front. Sustain. Food Syst., 2019. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00014

CARVALHO, J. L. N. *et al.* Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 110, n. 1, p. 175–186, 2010.

GONZALEZ, A. C.; CARNIATTO, I.; PEREIRA, V. A. Impacts of social and environmental disasters in western Paraná between 2010 and 2020. *Ambiente & Sociedade*, v. 26, p. e0085, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20220085r2vu2023L4AOA.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). Nota técnica nº 01/2023: informa sobre a atualização do mapeamento das áreas estratégicas para conservação e restauração no Paraná – AECR em 2022, referente à Resolução SEMA/IAP nº 05/2009. 2023. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Areas-Estrategicas-para-Conservacao-e-Restauracao-da-Biodiversidade-no-Estado-do-Parana-AECR. Acesso em: 16 mar. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção da extração vegetal e da silvicultura 2024 (PEVS 2024): informativo. 2025. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=774. Acesso em: 23 mar. 2026.

KELMENSON, S., BENDOR, T.K., LESTER, T.W. Os impactos econômicos de um projeto de restauração. In: BENINI, R.M., ADEODATO, S. Economia da restauração florestal. São Paulo, p. 92, 2017. Disponível em: <https://www.nature.org/media/brasil/economia-da-restauracao-florestal-brasil.pdf>. Acesso em 27 de janeiro de 2025.

LUDVIG, A. *et al.* Increasing climate-related resilience in the forest-based value chains? A policy perspective. *Forest Policy and Economics*, v. 168, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103314.

MANIMARAN, V.; ASWITHA, K. The role of forests in mitigating natural disasters. In: TAMRAKAR, P. *et al*. (ed.). **Forestry in a changing world**: challenges and innovations. [S.l.: s.n.], 2024, cap. 14, p. 305–334.

MANZATTO, C. V. *et al.* Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas

parciais. Brasília: Embrapa, 2020. (Documentos, 122). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1123612/1/Manzatto-emissoes-gases-2020.pdf. Acesso em: 14 fev. 2025.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas: coleção 9 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil. 2024a. DOI: https://doi.org/10.58053/MapBiomas/XXUKA8.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas - Coleção MapBiomas Pastagem. 2024b.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas: coleção MapBiomas Pastagem. 2025. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/. Acesso em: 23 mar. 2026.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas: coleção 10.1 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil. 2026. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/. Acesso em: 23 mar. 2026.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: emissões e remoções de dióxido de carbono por mudanças nos estoques de florestas plantadas. Rio de Janeiro: MCT, 2006.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). Modelagem setorial de opções de baixo carbono para agricultura, florestas e outros usos do solo (AFOLU). Organização de R. Rathmann. Brasília: MCTI, 2017.

MELO, L. C.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; VIRGENS FILHO, J. S. Cenários climáticos futuros para o Paraná: oportunidades para o setor florestal. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 11, n. 16, p. 120–131, 2015.

PARANÁ. Lei nº 17.133, de 25 de abril de 2012. Institui a Política Estadual sobre Mudança do Clima. Diário Oficial do Estado do Paraná, Curitiba, 2012.

PARANÁ. Resolução Conjunta SEMA/IAP nº 005/2009. Estabelece e define o mapeamento das áreas estratégicas para a conservação e recuperação da biodiversidade no Estado do Paraná. Diário Oficial do Estado do Paraná, Curitiba, 2009.

PARANÁ. Decreto nº 8.937, de 04 de outubro de 2021. Dispõe sobre a adesão do Estado do Paraná às campanhas “Race to Zero” e “Race to Resilience”. *Diário Oficial do Estado do Paraná*, Curitiba, 2021. Disponível em: https://www.legislacao.pr.gov.br. Acesso em: 26 mar. 2025.

PARANÁ. Plano estadual para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária – Plano ABC+. Curitiba: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, 2023a.

PARANÁ. Plano Estadual de ação climática 2024–2050: inventário de emissões de gases de efeito estufa (2005–2019). Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2023b.

PARANÁ. *Plano de descarbonização da economia paranaense: relatório técnico consolidado.* Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2025. Disponível em: <https://www.planejamento.pr.gov.br/Pagina/Plano-de-Descarbonizacao-da-Economia-Paranaense>. Acesso em: 27 mar. 2026.

PSISTAKI, K.; TSANTOPOULOS, G.; PASCHALIDOU, A. K. An overview of the role of forests in climate change mitigation. *Sustainability*, v. 16, n. 14, p. 6089, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16146089.

RECKLING, M.; WATSON, C. A.; WHITBREAD, A.; HELMING, K. Diversification for sustainable and resilient agricultural landscape systems. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 43, n. 44, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s13593-023-00898-5.

REDE ILPF. ILPF em números. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: https://redeilpf.org.br/ilpf-em-numeros/. Acesso em: 08 mar. 2025.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Nota Metodológica SEEG 7 Setor Mudança de Uso do Solo e Florestas. Versão 2, 2020.

STEENBOCK, W. *et al.* Avaliação da dinâmica do carbono em agroflorestas desenvolvidas por agricultores associados à Cooperafloresta. In: STEENBOCK, W. *et al.* (org.). *Agrofloresta, ecologia e sociedade*. Curitiba: Kairós, 2013. p. 345–362.

CONTRIBUIÇÃO DO USO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO

1 Rafaela Tainá Gaike, 2 Gustavo Alexandre Ferraz de Carvalho e Souza, 3 Eduardo Polesello
1 Universidade Feevale, e-mail: rafaelagaike@gmail.com; 2 Universidade Feevale, e-mail: gustavodecarvalhoesouza@gmail.com; 3 Universidade Feevale, e-mail: eduardopolesello@feevale.br

Palavras-chave: Aditivo superplastificante; redução de água; consumo de cimento.

Resumo

A indústria cimentícia é uma das principais emissoras globais de gás carbônico, impulsionando o setor a buscar soluções que diminuam o consumo de cimento. O aditivo superplastificante mostra-se, por sua eficiência na redução do consumo de água, como uma alternativa para a redução do consumo de cimento na produção do concreto. Neste sentido, este estudo tem por objetivo analisar as propriedades do concreto quando produzido com o uso do aditivo superplastificante em dosagens estabelecidas entre 0,30% e 1,20%, visando a redução do consumo de água com a manutenção do abatimento e, consequentemente, com a redução da relação água/cimento. A metodologia contempla a verificação do abatimento do concreto no estado fresco e, no estado endurecido, verificação da resistência à compressão, absorção de água, massa específica e índice de vazios. Por meio desta pesquisa, conclui-se que a incorporação do aditivo superplastificante apresenta melhora nas propriedades do estado fresco e endurecido, trazendo reduções na quantidade de água e cimento para um mesmo abatimento, quando comparado ao traço referência. Os resultados registraram aumento na resistência à compressão e diminuição na porosidade verificada pela redução na absorção de água no concreto.

Introdução

O cimento é o principal insumo utilizado na construção civil, mas a sua produção causa a emissão aproximada de 7% de gás carbônico no mundo, oriundas da produção de clinquer, que representa cerca de 67% da composição do cimento. Esse lançamento é causado pelo processo produtivo do clínquer durante a queima em fornos de altas temperaturas. Diante deste cenário, a indústria da construção civil vem buscando por alternativas para minimizar a emanação desses gases, como implementação de processos produtivos que reduzam a extração de matéria-prima. Neste âmbito se destacam os aditivos redutores de água do tipo II (ou aditivo superplastificante), os quais quando incorporados no traço, possibilitam a redução do teor de água na produção do concreto e, consequentemente, o do consumo de cimento, além disso, essa relação entre a água e o cimento influencia as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, como a trabalhabilidade e a resistência à compressão (Nadesan e Dinakar, 2017; SNIC, 2019; Schiefer e Plank, 2023; Verdiani et al., 2025). Os aditivos redutores de água do tipo II, quando incorporados a mistura cimentícia tem a característica de diminuir a relação água/cimento da mistura (entre 25% e 30%), e com o aumento da dosagem, há uma melhora na fluidez e trabalhabilidade do concreto, entretanto altas dosagem podem prejudicar a consistência do concreto, pois elevam excessivamente a fluidez da mistura, entrando em um estado líquido. Além disso, a presença do aditivo redutor de água do tipo II proporciona ganhos entre 23% e 35% na resistência à compressão, e traz uma distribuição mais uniforme dos pequenos poros na matriz do material, resultando em reduções na porosidade do concreto (entre 13,68% e 36,3%) (Moratelli et al., 2017; Maciel et al., 2020; Costa et al., 2022; Wang et al., 2024; Valdivieso et al., 2025).

A incorporação do aditivo redutor de água do tipo II proporciona o aumento da resistência à compressão, isso ocorre porque o aditivo é capaz de reduzir a aglomeração dos grãos de cimento na mistura, ou seja, eleva a dispersão dessas partículas, disponibilizando uma maior superfície específica dos grãos, aumentando a formação de cristais de hidratação, contribuindo assim para um maior refinamento da matriz de cimento (Kumar et al., 2022; Medeiros et al., 2024; Rindle et al., 2025). Estudos mostram que dosagem de 0,25% permite que as partículas não se aglomerem, porém, quando são utilizadas dosagens muito elevadas (acima de 1,20%), a resistência à compressão tende a diminuir, pois a mistura do concreto entra em um estado líquido, causando a fluidez em excesso e comprometendo a homogeneidade da mistura (Negri et al., 2023; Rindle et al., 2025). Entretanto, há estudos que mostram comportamento contrário, a exemplo de Valdivieso et al. (2025), ao analisarem as relações a/c de 0,40, 0,45 e 0,50, com aditivo redutor de água do tipo II em 1,65% sobre a massa de cimento, obtiveram resultados de aumento da resistência à compressão de, respectivamente, 20%, 37% e 24%, analisando aos 28 dias.

Medeiros Junior et al. (2019) destacam, que a absorção de água por imersão tem relação direta com a proporção de água e cimento do concreto, e que tal propriedade classifica quando o concreto é de boa qualidade ou não, evidenciando, no estudo, um aumento de 73,3% na absorção de água por imersão com o aumento de 42,3% na relação a/c (de 0,42 para 0,60). Estudos indicam que a redução da porosidade e a alteração na conexão entre os poros da mistura cimentícia levam à uma diminuição da absorção de água, além de que, com o uso do redutor de água do tipo II, há a redução dos poros, diminuindo o ar no interior da massa da mistura. Além disso, quanto menor a relação de água/cimento, menor é a porosidade do concreto e, consequentemente, absorve menos água (Tambara et al., 2024; Valdivieso et al., 2025).

A eficiência do uso do aditivo redutor de água do tipo II, quanto a redução no consumo de cimento para produção de concreto, é evidenciada por Moratelli et al. (2017), analisando relações de água/cimento (a/c), inicialmente fixadas, em 0,45, 0,55 e 0,65. Ao incorporar o aditivo redutor de água do tipo II (superplastificante), o estudo registrou a redução na quantidade de água das

dosagens para manter as resistências à compressão fixadas em 30, 40, 50 e 60 MPa. Para a relação a/c 0,45, obteve-se relações entre 0,28 e 0,47, para a/c 0,55 obteve-se entre 0,28 e 0,54, e para 0,65, as relações efetivas ficaram entre 0,46 e 0,59, assim, a dosagem que apresentou maior redução no consumo de cimento foi o teor de 0,90%, reduzindo de 524 kg/m³ para 325 kg/m³ comparado com o traço referência, para 60 MPa de resistência mecânica.

Considerando os aspectos destacados e a importância do uso de aditivo redutor de água do tipo II na produção de concreto, o objetivo desta pesquisa é analisar as propriedades do concreto, nos estados fresco e endurecido, com o uso do aditivo redutor de água do tipo II (superplastificante) em diferentes dosagens para a redução do consumo de cimento.

Materiais e Métodos

As etapas experimentais foram realizadas nos Laboratórios Técnicos da Construção da Universidade Feevale. Para a produção dos concretos foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI), tendo em vista que apresenta maior grau de pureza, de acordo com NBR 16697 (ABNT, 2018). Como caracterização o cimento utilizado apresentou massa específica de 3,08 g/cm³, determinada segundo estabelece a NBR 16605 (ABNT, 2017).

A água utilizada na produção do concreto foi fornecida pelos Laboratórios Técnicos da Construção da Universidade Feevale, proveniente de poço artesiano e classificada como água potável que, conforme NBR 15900-3 (ABNT, 2009), é adequada para produção de concreto. Os agregados utilizados para produção dos concretos, foram o miúdo de origem quartzosa e graúdo obtido pelo método de britagem de origem basáltica, ambos disponibilizados por uma central dosadora de concreto parceira. Os resultados de caracterização dos mesmos e as respectivas normas consideradas para tal, estão dispostos na Tabela 01.

Agregado	Característica	Norma utilizada	Resultado
Graúdo	Massa específica	NBR 16917 (ABNT, 2021)	2,59 g/cm³
	Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,511 g/cm³
	Dimensão máxima característica	NBR 17054 (ABNT, 2022)	19,0 mm
	Módulo de finura	NBR 17054 (ABNT, 2022)	6,68
Miúdo	Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2,62 g/cm³
	Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,518 g/cm³
	Dimensão máxima característica	NBR 17054 (ABNT, 2022)	4,75 mm
	Módulo de finura	NBR 17054 (ABNT, 2022)	2,34

Tabela 01: Caracterização dos agregados utilizados na pesquisa.
Fonte: Autores (2026)

Foi utilizado o aditivo redutor de água do tipo II – RA2 (superplastificante), que estabelece dosagem entre 0,3% e 1,2%, e um redutor de água do tipo I – RA1-R (plastificante), com limite de dosagem de 0,5% a 1,0%, segundo informações das fichas técnicas disponibilizadas pelo fabricante. A escolha de utilizar dois tipos de aditivos, especialmente a opção do uso do aditivo redutor de água tipo I, se deu devido as práticas comerciais e pelos aditivos apresentarem compatibilização, conforme fichas técnicas do fabricante.

Os métodos da pesquisa consistem inicialmente na definição dos traços e produção dos concretos, para posterior realização dos ensaios técnicos nos estados fresco e endurecido. O traço referência foi definido considerando os critérios do método IPT/EPUSP, sendo composto por cimento Portland CPV-ARI, agregados, água, aditivo redutor de água tipo I (plastificante), na dosagem mínima de 0,50% indicada pelo fabricante, e sem a adição (0,00%) de aditivo redutor de água tipo II (superplastificante). Em função das características dos materiais utilizados, esse traço referência ficou definido como 1,0 : 2,52 : 3,00 (em massa), com teor de argamassa de 54%, relação a/c de 0,60 e classe de abatimento S160. A definição da classe de abatimento foi estabelecida por, segundo NBR 8953 (ABNT, 2015), ser indicada para a aplicação em elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto, prática majoritariamente adotada pelas grandes obras. O detalhamento, para 1m³ de concreto, assim como 35 litros (volume considerado para produção em laboratório), está apresentado no Quadro 01.

Volume de Concreto	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água	Aditivo plastificante	Aditivo superplastificante
1,0 m³	328,0 kg	826,6 kg	984,0 kg	196,5 kg	1,64 kg	0,00 kg
35 litros	11463 g	28887 g	34389 g	6878 g	57,3 g	0,00 g

Quadro 01: Detalhamento do traço referência (TREF).
Fonte: Autores (2026)

A partir do traço referência (TREF) foram produzidos mais 4 traços de concreto, considerando teores de aditivo superplastificante de 0,30% (T030), 0,60% (T060), 0,90% (T090) e 1,20% (T120), contemplando a recomendação da dosagem mínima e máxima do fabricante, além de outras duas dosagens intermediárias.

Para o preparo do concreto em laboratório, considerou-se as recomendações da NBR 12821 (ABNT, 2009). Os ensaios realizados seguiram as normas técnicas vigentes, a fim de compreender a influência que a dosagem do aditivo superplastificante proporciona nas propriedades do concreto, assim como o impacto na redução do consumo de água na mistura. Posteriormente a verificação do abatimento, segundo NBR 16889 (ABNT, 2020), realizou-se a moldagem das amostras em moldes cilíndricos, pela NBR 5738 (ABNT, 2016), para a realização, no estado endurecido, dos testes de resistência à compressão, seguindo NBR 5739 (ABNT, 2018), e conforme especificação da NBR 9778 (ABNT, 2009), os ensaios de absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios.

Para quantificar a redução do consumo de cimento, considerou-se a redução registrada no consumo de água em cada concreto produzido. Dessa forma, avaliou-se esse impacto da redução na quantidade de cimento necessária para produção de um metro cúbico de concreto.

Além disso, para a análise de resultados comparou-se os resultados dos concretos com aditivo superplastificante em relação ao traço referência, considerando parâmetros estabelecidos pelas normas e resultados já apresentados pela literatura. Todos os resultados foram avaliados de forma individual, média, desvio padrão, além de submetidos a uma análise estatística de variância (ANOVA), para intervalo de confiança de 95%, com uso do software Statistica.

Resultados e Discussões

Durante o ensaio de abatimento do tronco de cone, para os concretos produzidos com aditivo redutor de água do tipo II, à medida que se aumentou a dosagem do aditivo superplastificante, diminui-se a quantidade de água, a fim de estabelecer o abatimento em atendimento à classe S160 preestabelecida. Desta forma, a redução no consumo de água, devido a presença do superplastificante, foi registrada e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 02, considerando a produção de 35 litros de concreto.

Nomenclatura	Abatimento (mm)	Relação a/c	Água (g)	Redução no consumo de água (g)	Redução no consumo de água em comparação ao traço referência (%)
TREF	205	0,60	6.878,0	-	-
T030	180	0,52	6.011,0	867,00	12,60
T060	210	0,47	5.349,0	1.529,00	22,23
T090	185	0,41	4.684,0	2.194,00	31,90
T120	205	0,42	4.810,0	2.068,00	30,07

Tabela 02: Resultados obtidos no estado fresco para a produção de 35 litros de concreto.
Fonte: Autores (2026)

Diante dos resultados registrados, observa-se que os abatimentos permaneceram dentro dos limites da classe preestabelecida, validando a eficiência do aditivo redutor de água do tipo II na redução da quantidade de água sem implicar no abatimento, além de que, nota-se que a dosagem mínima recomendada pelo fabricante já tem influência no abatimento, visto a redução de 12,6% na água em comparação ao traço referência, evidenciando que o aditivo aumenta a fluidez e a trabalhabilidade da mistura, como também foi observado por Negri et al. (2023). Entretanto, ressalta-se que para a dosagem de 1,20% houve dificuldades de execução, pois o concreto entrou em um estado de consistência líquida, sendo difícil controlar a padronização do abatimento e, posteriormente, na moldagem.

Em relação à redução do consumo de água (Tabela 02), nota-se uma redução mínima de 12,60% (867,00 gramas), para dosagem de 0,30% do aditivo superplastificante, e uma redução máxima de 31,90%, equivalente a 2.194,00 g, para dosagem de 0,90% do aditivo redutor de água do tipo II, evidenciando que à medida que se adiciona aumenta o teor de aditivo, ocorre a redução no consumo de água e, consequentemente, diminuição da relação a/c. Além disso, a cada acréscimo de 0,3% do aditivo superplastificante observa-se uma diminuição da água presente da mistura, com exceção da dosagem de 0,90% para 1,20%, onde não obtiveram redução de água entre elas devido a padronização do abatimento, mas em comparação com o TREF, ainda assim o traço T120 apresentou diminuição considerável na quantidade de água. A literatura evidencia uma redução na quantidade de água na mistura entre 25 e 30%, demonstrado por Moratelli et al. (2017), onde os autores obtiveram redução de 15,34; 26,73 e 38,12% para as respectivas dosagens de 0,30; 0,60 e 1,20% do superplastificante. Levando em consideração estas informações, as dosagens utilizadas nesta pesquisa se mostraram próximas ao que trazem os autores, validando o desempenho do aditivo e demostrando ser eficiente na redução do consumo de água nas misturas.

A Tabela 03 apresenta os resultados individuais do ensaio de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, respetivamente, para dois e três corpos de prova.

Idade	Traço	Resistência à compressão (MPa)			Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
7 dias	TREF	25,5	27,0	-	26,2	1,07	4,1%
	T030	34,6	34,9	-	34,8	0,16	0,5%
	T060	32,8	39,8	-	36,3	4,96	13,7%
	T090	41,6	44,2	-	42,9	1,84	4,3%
	T120	34,5	35,8	-	35,1	0,88	2,5%
28 dias	TREF	40,0	40,9	33,1	40,0	4,27	10,7%
	T030	39,7	43,5	44,1	43,5	2,39	5,5%
	T060	39,8	48,0	33,6	39,8	7,22	18,1%
	T090	43,4	36,1	54,9	43,4	9,48	21,8%
	T120	45,5	43,0	42,7	43,0	1,54	3,6%

Tabela 03: Resistência individuais à compressão aos 7 e 28 dias.
Fonte: Autores (2026)

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 03, percebe-se que o coeficiente de variação, parâmetro que, segundo estabelece a NBR 5739 (ABNT, 2015), avalia as eficiências das operações de ensaio, para vários traços, em particular aos 28 dias, apresentou resultados elevados o que classifica o ensaio como deficiente. Desta forma, melhor analisar o comportamento dos concretos produzidos, será considerado para análise da resistência à compressão os resultados potenciais, conforme critério apresentado pela NBR 12655 (ABNT, 2015). Os resultados potenciais dos concretos produzidos, aos 7 e 28 dias, estão apresentados no gráfico da Figura 01.

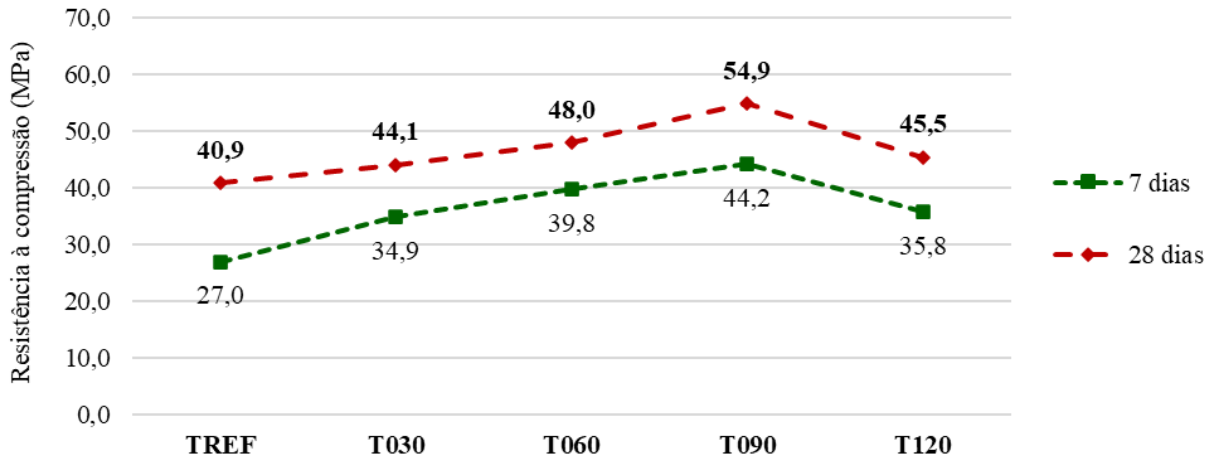


Figura 01: Resistência potencial à compressão aos 7 e 28 dias.
Fonte: Autores (2026)

Considerando os resultados potenciais, ao analisar o aumento da resistência à compressão aos 7 dias em comparação ao traço referência, os traços T030, T060, T090 e T120 apresentam aumentos de respectivamente 29,26%, 47,41%, 63,70% e 32,59%, sendo que a maior resistência potencial foi de 44,20 MPa (0,90% do aditivo superplastificante). Durante o processo de cura dos 7 para os 28 dias, todos os traços apresentam ganho na resistência à compressão, os traços TREF, T030, T060, T090 e T120, o acréscimo na resistência foi de, respectivamente, 51,48%, 26,36%, 20,60%, 24,21% e 27,09%.

Já aos 28 dias, os aumentos da resistência à compressão dos traços foram de 7,82% no T030, 17,36% para o T060, 34,23% no T090 e o traço T120 elevou 11,25% em comparação ao traço referência, além de todos os traços obterem resistência potenciais acima de 40 MPa. Maciel et al. (2020) e Valdivieso et al. (2025) destacam que o aditivo redutor de água do tipo II tende a aumentar a resistência à compressão entre 20 e 37%, o que foi observado nos presentes ensaios, assim, os resultados obtidos condizem com a literatura.

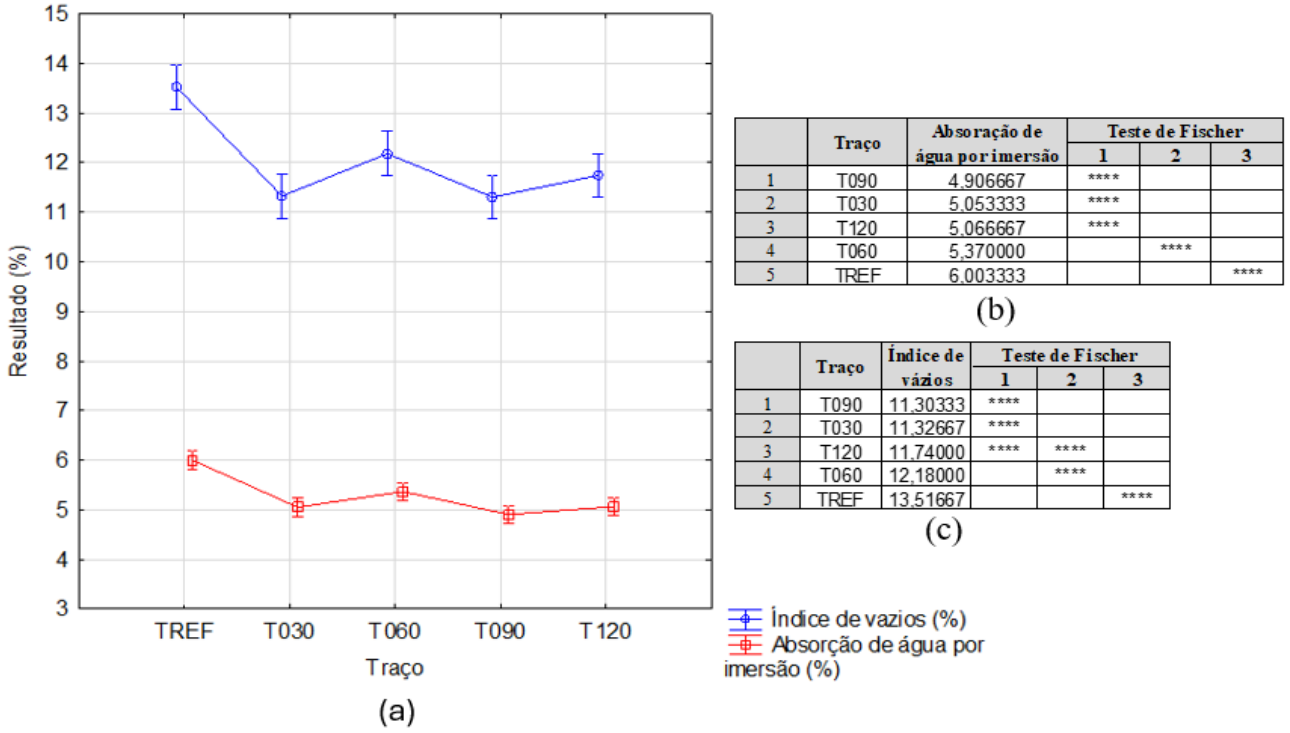
Além disso, ressalta-se que à medida que se adicionou o aditivo superplastificante, houve o aumento da resistência à compressão, entretanto, este aumento contínuo não ocorreu na dosagem de 1,20%, o que é justificado pela abordagem de Linhares *et al.* (2020), os quais apontam que em dosagens muito elevadas (acima de 1,20%), a resistência tende a diminuir pois o concreto entra em um estado líquido. Logo, a resistência à compressão é proporcional à dosagem do aditivo, evidenciando o potencial do aditivo superplastificante, no entanto há a necessidade de atenção para doses muito elevadas.

A Tabela 04 apresenta os resultados médios obtidos na análise da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias de idade.

Traço	Absorção de água por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm³)
TREF	6,00	13,52	2,25
T030	5,05	11,33	2,24
T060	5,37	12,18	2,27
T90	4,91	11,30	2,30
T120	5,07	11,74	2,32

Tabela 04: Resultados médios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Fonte: Autores (2026)

Para melhor análise do comportamento obtido, os dados foram submetidos à ANOVA. O resultado registrou que há efeito significativo do fator traço sobre a absorção de água por imersão ($F(4,10) = 29,94$; $p < 0,001$), assim como para o índice de vazios ($F(4,10) = 20,85$; $p < 0,001$). A Figura 02 ilustra esse comportamento.



(a)

	Traço	Absoração de água por imersão	Teste de Fischer 1	2	3
1	T090	4,906667	****		
2	T030	5,053333	****		
3	T120	5,066667	****		
4	T060	5,370000		****	
5	TREF	6,003333			****

(b)

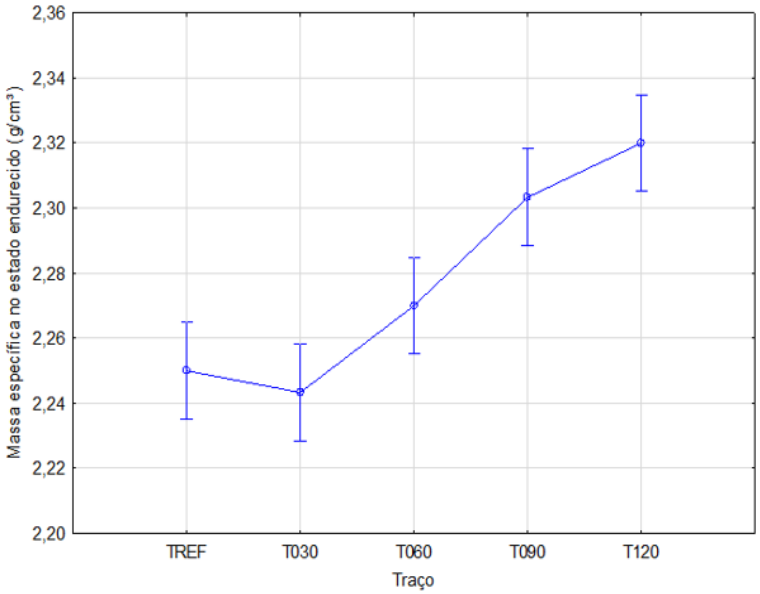
	Traço	Índice de vázios	Teste de Fischer 1	2	3
1	T090	11,30333	****		
2	T030	11,32667	****		
3	T120	11,74000	****	****	
4	T060	12,18000		****	
5	TREF	13,51667			****

(c)

Figura 02: Absorção de água por imersão e índice de vazios: (a) Comportamento da análise de variância, (b) Teste de Fischer da absorção de água por imersão e (c) Teste de Fischer do índice de vazios. Fonte: Autores (2026)

Pelo teste de Fischer, para a absorção de água por imersão, é possível constatar que, estatisticamente, os traços T030, T090 e T120 são iguais, enquanto T060 e TREF são diferentes de todos. Da mesma maneira, no ensaio de índice de vazios, T030, T090 e T120 também não apresentaram variação entre eles, mas T120 e T060 são iguais e todos os concretos são diferentes do resultado do TREF. Logo, nota-se que o traço T090 apresentou o maior percentual de redução na absorção de água por imersão, chegando a 18,24% em comparação ao traço referência, adicionalmente registrando uma redução de 16,38% a menos no índice de vazios, quando comparado ao TREF, também caracterizando a maior diminuição registrada.

Por fim, os resultados de massa específica dos concretos no estado endurecido também foram submetidos a ANOVA, demonstrando também a diferença significativa do traço em relação a essa propriedade ($F(4,10) = 25,0$; $p < 0,001$), conforme ilustrado na Figura 3.



	Traço	Massa específica	Teste de Fischer		
			1	2	3
1	T030	2,243333	****		
2	TREF	2,250000	****	****	
3	T060	2,270000		****	
4	T090	2,303333			****
5	T120	2,320000			****

Figura 03: Massa específica no estado endurecido: (a) Comportamento da análise de variância e (b) Teste de Fischer. Fonte: Autores (2026)

Ao se analisar a Figura 4, observa-se que houve aumento significativo da massa específica do concreto endurecido com o aumento da dosagem de aditivo. Pelo teste de Fisher é possível contatar que o TREF e o T030 não apresentam variação entre si, o mesmo ocorre entre os traços T060 e T090, e com T090 e T120.

A Tabela 05 apresenta a redução no consumo de cimento, por m³ de concreto produzido, para os traços com o uso de aditivo superplastificante em comparação ao traço referência.

Traço	Redução do consumo de água (%)	Consumo de cimento para a relação a/c 0,60 (kg/m³)	Redução no consumo de cimento (kg/m³)
TREF	-	328,00	-
T030	12,60	286,67	41,33
T060	22,23	255,08	72,92
T090	31,90	223,36	104,64
T120	30,07	229,37	98,63

Tabela 05: Redução do consumo de cimento dos concretos com aditivo em relação ao concreto referência. Fonte: Autores (2026)

Diante dos resultados, nota-se que à medida que ocorre a incorporação do aditivo, para manutenção da relação a/c do concreto referência, há a redução do consumo de cimento nas misturas. Os resultados evidenciam reduções entre 12,60% e 31,90%, ficando dentro dos dados observados pela literatura, que trazem resultados entre 13,10 e 37,97% (Moratelli et al., 2017; Cecel et al., 2019). Logo, o uso de aditivo superplastificante traz uma redução do consumo de cimento considerável.

No que se referente ao impacto ambiental, o cimento está diretamente relacionado com a emissão de gás carbônico, segundo Cheng et al. (2022), a emissão de CO2 para cada kg de cimento é em média 0,56 kg de CO2 por kg de cimento. Com base nestes dados, os traços TREF, T030, T060, T090 e T120 emitiriam cerca de, respectivamente, 183,68; 160,54; 142,84; 125,08 e 128,45 quilos de CO2 por metro cúbico de concreto produzido, assim, em comparação ao traço referência, todos os traços com aditivo redutor de água do tipo II apresentariam redução na emissão de gás carbônico, chegando a um resultado máximo de 58,60 kg do CO2 por metro cúbico de concreto produzido, referente a dosagem de 0,90% de aditivo.

Considerações Finais

Com base nos resultados apresentados no presente estudo, é possível afirmar que a incorporação do aditivo redutor de água tipo II no concreto gera resultados positivos nas propriedades no estado fresco e endurecido.

No estado fresco, o aditivo contribuiu para a redução do consumo de água entre 12,60 e 31,90%, sem comprometer o abatimento estabelecido. Diante das análises observou-se que a dosagem de 1,20% tornou a mistura excessivamente fluida, sendo difícil excetuar o ensaio do abatimento e comprometendo a resistência à compressão em relação ao traço com dosagem menor (0,90%), mas mesmo assim, com aumento da resistência quando comparado ao traço sem o aditivo redutor de água do tipo II.

No estado endurecido, o aditivo redutor de água do tipo II proporcionou aumento na resistência à compressão entre 7,82 e 34,23% aos 28 dias de cura. Ademais, a utilização do aditivo proporcionou diminuição no índice de vazios e massa específica do concreto endurecido, o que evidencia uma melhor compactação e maior refinamento dos poros, reduzindo a absorção de água por imersão.

As análises estatísticas comprovam que a incorporação do aditivo superplastificante melhora as propriedades do estado endurecido, visto que todos os ensaios realizados aprestaram variação significativa. Por fim, o aditivo se mostrou eficaz na redução do consumo de cimento, chegando a reduzir 104,64 kg/m³ quando comparado ao traço referência, para a dosagem de 0,90%, suprindo a constante busca da indústria do setor pela redução das emissões de CO2.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de Cimento Portland, Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto. Parte 3: Avaliação preliminar. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

CECEL, R. T.; ABRÃO, P. C. R. A.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Consumo de aditivo superplastificante em diferentes cimentos e a eficiência dos ligantes. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, volume 12, número 6, p. 1260 – 1287, dezembro de 2019.

CHEN, Y. et al. Resource utilization strategies for spent pot lining: A review of the current state. Separation and Purification

Technology, v. 300, p. 121816, nov. 2022.

COSTA, Vanessa Ayanna de Souza; BRAZ, Victor Henrique Vieira; CORREIA, Francisco de Assis Berenguer; MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto. Estudo comparativo de traços de concreto de alta resistência com diferentes tipos de cimentos e aditivos polifuncionais. Research, Society and Development, Volume 11, número 10, 2022.

KUMAR, Ajay; HAQ, Md. Zia Ul; MATHUR, Nishant; SOOD, Hemant; NANDAL, Mohit. Sustainable effect of polycarboxylate ether based admixture: A meticulous experiment to hardened concrete. Materials today: proceedings, 2022.

LINHARES, Paulo Robson Parente; LINHARES, Aderson Renan Parente; BRITO, George Lucas Cedro Carvalho; DE SOUZA, Milton Kleber; DO NASCIMENTO, Simão Pedro Araujo. O uso de aditivo super plastificante em traço de concretoconvencional, para ganho de resistência e redução de custos. In: Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, evento online. Anais do I CoBICET, 2020.

MACIEL, Lucas Damas; COELHO, Adenilson Roberto; PEREIRA, Helena Ravache Samy. Estudo das propriedades do concreto convencional com aditivo ou adição de água para correção de consistência. Revista Matéria, Volume 25, número 04, 2020.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; REMENCHE, Igor Rossi; MARTIOLI, Leonardo Caniato; RUSSI, Lucas Bonete; ARAÚJO, Emanoel Cunha Araújo. Efeito do uso de aditivo superplastificante na resistência à compressão e durabilidade do concreto. Anais do 65° Congresso Brasileiro do Concreto, outubro de 2024.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MUNHOZ, G. S.; MEDEIROS, M. H. F. Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana. Revista Alconpat, volume 9, número 2, p. 152 – 162, 2019.

MORATELLI, Roni Cleyton; ROHDEN, Abrahão Bernado; MATOS, Lúcio Flávio da Silveira. Redução do consumo de cimento Portland em concreto convencional com o uso de aditivo superplastificante. Anais do 59° Congresso Brasileiro do Concreto, novembro de 2017.

NADESAN, Manu S.; DINAKAR, P. Stuctural cocreto using sintered flyash lghtweight aggregate: a reviwe. Revista Construction and Building Materials, volume 154, p. 928-944, 2017.

NEGRI, Robison; BOSCO, André Felipe; FERREIRA, Denilo Gilson; RAISER, Lucas Schmitz. Análise da trabalhabilidade e resistência do concreto com adição de superplastificante. Revista Tecnologia, Fortaleza, volume 44, p. 1-16, 2023.

RINDLE, Olivia; SIXT, Florian; SPILLANE, Liam; WILLINGER, Elena; GADT, Torben. Revealing the morphology of nano-ettringite in cement paste: A TEM study on the influence of polycarboxylate ether superplasticizers. Cement and Concrete Research, março de 2025.

SCHIEFER, Christopher; PLANK, Johann. On the CO2 footprint of polycarboxylate superplasticizers (PCEs) and its impact on the eco balance of concrete. Construction and building materials, número 409, 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIAL DO CIMENTO (SNIC). Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

TAMBARA, Rafael Fumaco; JÚNIOR, Luis Urbano Durlo Tambara; VENQUIARUTO, Simone Donelles; COSTA, Fernanda Bianchi Pereira da. Avaliação do desempenho mecânico e absorção capilar de concretos com incorporação de aditivos cristalizante submetidos a danos nas primeiras idades. Revista Matéria, Volume 29, número 1, janeiro de 2024.

VALDIVIESO, Galarza Jacinto Alexander; URETA, Centeno Anderson Ariel; GUERRA, Mera Juan Carlos. Influencia del aditivo superplastificante em la resistencia y porosidad del horgmigón com varia relaciones agua-cimento. Revista Cientifica Ingeniar: Ingeniería, Tecnología e Investigación, Volume 8, número 16, 2025.

VERDIANI, Vicente Bueno; YAMAJI, Fábio Minoru; LIMA, Leonardo; BELINI, Gabriela. Visão geral sobre o processo de coprocessamento na indústria do cimento no Brasil. Ambiente Construído, Porto Alegre, Volume 25, Edição 140295, 2025.

WANG, Xiao-Hui; FANG, Zhi-Chao; ZHENG, Li. Effect of dose and types os the water reducing admixtures and superplasticizers on concrete strenght and durability behaviuor: a review. Journal of civil engineering and managemente, Volume 30, número 1, p. 33 – 48, 2024.

ANÁLISE DAS BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO DE MEDIDAS DE DESCARBONIZAÇÃO NO SETOR AGROPECUÁRIO DO PARANÁ

1 Matheus Bueno Patrício, 2 Amanda Pontes Maia Pires Alcantara, 3 Débora Lia Perazzoli, 4 Laura Eller Oliveira, 5 Humberto Sadao Hirae, 6 Helder Rafael Nocko

1 EnvEx Engenharia e Consultoria e Universidade de Santiago de Compostela, e-mail:eng.matheusbueno@gmail.com; 2 EnvEx Engenharia e Consultoria e Universidade Federal do Ceará: amanda.alcantara@envexengenharia.com.br, 3 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: debora.perazzoli@envexengenharia.com.br; 4 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: laura.oliveira@envexengenharia.com.br; 5 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: humberto.hirae@envexengenharia.com.br; 6 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: helder@envexengenharia.com.br

Resumo

O setor agropecuário do Paraná é responsável por 54% das emissões estaduais de gases de efeito estufa (GEE), representando 38.811 Gg CO_2eq, segundo o Segundo Inventário de Emissões do Estado. Diante das metas climáticas assumidas pelo Paraná, especialmente o compromisso de neutralidade climática até 2050, torna-se essencial identificar e priorizar medidas de descarbonização viáveis para o setor. Este estudo teve como objetivo analisar as principais barreiras à implementação de medidas de descarbonização na agropecuária paranaense, utilizando a metodologia de matriz de vulnerabilidade. A partir de levantamento bibliográfico e *benchmarking*, foram identificadas 13 medidas de descarbonização aplicáveis ao contexto do Estado, distribuídas nos subsetores de agricultura, agropecuária e pecuária. Para cada medida, avaliou-se a vulnerabilidade frente a 15 barreiras classificadas nas categorias econômica, tecnológica, cultural/educacional e institucional/regulatória, com pontuação baseada nos princípios de avaliação de impacto ambiental. Os resultados indicaram que as medidas com menor vulnerabilidade e, portanto, maior potencial de implementação, foram a qualificação dos Sistemas de Plantio Direto de Grãos, a expansão dos Plantio Direto de Hortaliças e o aumento de florestas plantadas com manejo sustentável, todas contempladas no Plano ABC+ Paraná. As medidas de melhoramento nutricional dos rebanhos e produção orgânica apresentaram maior vulnerabilidade, associada à complexidade operacional e à necessidade de certificação e monitoramento. As barreiras mais expressivas foram os altos custos de implantação, a gestão não profissional das propriedades, a baixa mecanização e a carência de mão de obra qualificada. Conclui-se que a efetividade das medidas de descarbonização depende de ações integradas que combinem incentivos financeiros, acesso ao crédito, capacitação técnica e estratégias de comunicação e educação ambiental.

Palavras-chave: Descarbonização, priorização de medidas, matriz de vulnerabilidade.

Introdução

No Acordo de Paris, adotado em 2015 no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), reconheceu-se que as mudanças climáticas representam uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para a sociedade humana e o planeta (ONU, 2015). As emissões de gases de efeito estufa (GEE) estão diretamente relacionadas a essas mudanças, uma vez que contribuem para o aumento da temperatura global, que está associada a diversos impactos ambientais, sociais e econômicos que incluem alterações no regime hidrológico, maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, riscos à segurança alimentar e hídrica, impactos à saúde humana, perda de biodiversidade e consequências socioeconômicas para as populações (IPCC, 2023). Nesse contexto, acordos internacionais e iniciativas como as campanhas *Race to Zero* e *Race to Resilience* têm impulsionado governos e instituições a adotarem ações concretas de mitigação e adaptação.

Alinhado a esse movimento, o Paraná formalizou sua adesão por meio do Decreto nº 8.937/2021 que estabeleceu diretrizes para o planejamento climático estadual, com destaque para a definição de metas progressivas de redução de emissões e o compromisso de alcançar a neutralidade climática até 2050 (Paraná, 2021). Essa implementação transpassa por ações e medida multissetoriais, impactando diferentes aspectos econômicos do Estado.

O Paraná possui uma extensão territorial de aproximadamente 199,3 mil km², dos quais 74% correspondem a propriedades rurais, que totalizam cerca de 305 mil estabelecimentos (IBGE, 2024; IBGE 2017). Portanto, o setor agropecuário possui alto grau de importância para a economia estadual, sendo que em 2024 o valor bruto da produção agropecuária do Estado do Paraná foi de 188,3 bilhões de reais (Paraná, 2025). Esses dados evidenciam a importância do setor tanto na ocupação do território quanto na dinâmica econômica do Estado.

Além disso, as atividades agropecuárias ainda exercem papel significativo no perfil de emissões de GEE. No Segundo Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Paraná (2INVPR), o setor de Agricultura, floresta e outros usos da terra (AFOLU) representou 54% das emissões totais, correspondendo a 38.811 Gg CO_2eq. Das emissões quantificadas no setor, cerca de 45% estão associadas às atividades pecuárias, enquanto 33% estão relacionadas à produção agrícola, evidenciando a importância estratégica dessas atividades para a definição de medidas de mitigação e para o alcance das metas climáticas estaduais (Paraná, 2023).

Nesse sentido, existe uma mobilização de diferentes atores do Estado para implementação de ações voltadas à mitigação e adaptação climática, destacando-se a Política Estadual sobre Mudanças do Clima, Lei Estadual nº 17.133/2012 (Paraná, 2012) e seus instrumentos; o Plano setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (ciclo 2020 até 2030) (Brasil, 2021), e o Plano de Descarbonização da Economia Paranaense (PEDEP, 2025) que abordam medidas climáticas relacionadas ao setor de AFOLU.

Em nível Estadual, o cenário é positivo para implementação destas medidas; porém, há diferentes barreiras de natureza técnica, econômica, institucional e regulatória, que influenciam diretamente a viabilidade e mobilização social, as quais necessitam ser transpostas para garantir o sucesso das estratégias de descarbonização, por meio da percepção das situações de gestão, capacidade técnica e deficiências associadas aos proprietários dos 305 mil estabelecimentos rurais. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo discutir as principais barreiras associadas à implementação de medidas de descarbonização do subsetor da agropecuária paranaense, por meio da metodologia de avaliação das vulnerabilidades.

Material e métodos

A identificação de medidas de descarbonização partiu de um levantamento bibliográfico e um estudo de *benchmarking* para seleção de medidas de descarbonização definidas como macro ações passíveis de serem monitoradas por indicadores relacionados a emissões evitadas ou remoção de carbono da atmosfera (por exemplo, captura e armazenamento de carbono, compensando outras fontes identificadas). A partir dos resultados alcançados no *benchmarking*, avaliou-se a vulnerabilidade para implementação de medidas de descarbonização no Estado do Paraná, como uma estratégia inicial de priorização para direcionar a delimitação das metas na composição da estratégia do governo estadual. Construiu-se uma matriz de vulnerabilidade relacionando barreiras e desafios no âmbito da mitigação e adaptação climática.

Todas as medidas e tecnologias de descarbonização possuem desafios e limitações específicas em suas aplicações, que agem como barreiras para sua implementação. Neste estudo, foram comparadas as barreiras que cada tecnologia selecionada carrega, e para isso, estas foram divididas nas seguintes categorias: econômicas, tecnológicas, culturais/educacionais e institucionais/regulatórias. As principais barreiras de cunho econômico estão relacionadas aos altos custos de implantação de novas tecnologias e a disponibilidade dos recursos financeiros, que por sua vez se relacionam com as barreiras regulatórias, especialmente pela falta de incentivos governamentais específicos. Por muitas vezes as legislações nesse âmbito são insuficientes o que dificulta a transição para tecnologias de baixo carbono. Por fim, muitas tecnologias estão em fase de desenvolvimento e requerem estudos específicos e avanços técnicos, além de frequentemente demandar integração com outras infraestruturas. Em algumas situações, a infraestrutura da região é insuficiente para suportar essas tecnologias, as quais também demandam investimentos financeiros.

Observa-se que as barreiras são fortemente inter-relacionadas, o que frequentemente torna desafiador o planejamento e a elaboração de metas e ações preventivas. Por esse motivo é muito importante destrinchar as limitações e adversidades de cada tecnologia, para que seja possível investir de forma eficaz em medidas de descarbonização. Na construção da matriz de vulnerabilidade, as medidas foram relacionadas às barreiras de acordo com avaliação técnica, e quantificadas seguindo princípios da avaliação de impacto ambiental apresentado por Sanchéz (2013) e os critérios da Tabela 01. Após a valoração de cada combinação de medida e barreira, a pontuação total foi somada e as medidas foram classificadas em ordem de prioridade, da menor pontuação (menor vulnerabilidade) para a maior.

Tabela 01: Medidas de descarbonização consideradas para o Estado do Paraná.

Relação entre medida de descarbonização e barreira para implementação	Valor adotado
Ausente - quando não há relação direta entre a medida e a barreira	0
quando a barreira tem baixa probabilidade de não ser superada	1
barreira apresenta grandes empecilhos para ser superada	2
há grande possibilidade de a barreira não ser superada	3

Fonte: Elaboração própria.

Resultados e Discussão

O Paraná possui uma série de ações em curso para mitigar essas emissões. Por vezes, essas iniciativas estão relacionadas com as diretrizes para o desenvolvimento de agricultura de baixo carbono, conforme a Lei Estadual nº 17.441/2012:

> "*Art. 2º Para os fins desta Lei incluem-se entre as práticas ou programas a serem incentivados:*
> *I - plantio direto na palha, com a dispensa do revolvimento do solo por meio da semeadura direta na palha da cultura anterior;*
> *II - recuperação de áreas degradadas para a produção de alimentos, fibras, carne e florestas;*
> *III - integração entre lavoura, pecuária e floresta, alternando a exploração dos solos com o uso para a pastagem, com agricultura e floresta em uma mesma área;*
> *IV - plantio de florestas comerciais, proporcionando renda futura para o produtor;*
> *V - fixação biológica de nitrogênio, por meio do desenvolvimento de microorganismos que captem o nitrogênio existente no ar e o transformem em matéria orgânica para as culturas;*
> *VI - tratamento de resíduos animais, com vistas ao aproveitamento de dejetos de suínos e de outros animais para a produção de energia e de composto orgânico.*
> *§ 1º O mapeamento de áreas degradadas visa definir estratégias de intervenção com tecnologias sustentáveis, assistência técnica, crédito rural facilitado e a implantação de projetos demonstrativos em parceria com órgãos públicos e privados.*
> *§ 2º O tratamento de resíduos animais, de florestamento e de reflorestamento será orientado com vistas a conformarem projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), possibilitando a geração de créditos com a redução certificada de emissões."* (Paraná, 2012)

Além disso, a partir do levantamento de *benchmarking* identificou-se treze medidas de descarbonização relacionadas à agropecuária e aplicáveis ao contexto do Paraná, considerando as atividades existentes e o perfil econômico do Estado, que se concentra na produção de proteína animal e grãos (IPARDES, 2020; IPARDES, 2022), as quais são mostradas na Tabela 02. Essas medidas consideram a multiplicidade das atividades que podem ser desenvolvidas nas propriedades rurais. Além disso, prezou-se pelo aumento da produtividade, pois ao intensificar a produção de forma adequada entende-se que há a possibilidade de ganhos financeiros. Concomitantemente, foram apresentadas a possibilidade de reduzir a pressão sobre áreas de vegetação nativa e de preservação ambiental que pode favorecer a descarbonização do setor (VOGEL; BEBER, 2022; CARNEVALLI et al., 2024). As medidas transpassam por redução do consumo de insumos, alterações do uso da terra e melhorias no manejo animal, com uma diversidade de ações já em execução no Estado e outras que atuam em fontes de emissões de interferência mais complexa, como a fermentação entérica e melhoramento nutricional do rebanho.

Tabela 02: Medidas de descarbonização consideradas para o Estado do Paraná.

Subsetor	Descrição da medida de descarbonização
Agricultura	Redução do consumo de compostos nitrogenados sintéticos/minerais, visando diminuir o uso de insumos não biológicos.
	Ampliação do uso de bioinsumos, como medida complementar à redução de compostos nitrogenados sintéticos/minerais.
	Aplicação de métodos alternativos de umidificação e secagem no cultivo de arroz, para redução das emissões de metano.
	Expansão da produção orgânica, promovendo o aumento da concentração de carbono no solo.
	Qualificação dos Sistemas de Plantio Direto de Grãos (SPDG), com plantio na palhada, baixa mobilização do solo e diversificação de culturas.
	Expansão do Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH), com redução do revolvimento do solo nas culturas.
	Expansão de áreas atendidas por sistemas irrigados, para redução da vulnerabilidade climática e aumento da produção vegetal.
	Expansão de florestas plantadas com manejo sustentável, conciliando produção e conservação ambiental.
Agropecuária	Ampliação de sistemas agroflorestais, integrando árvores, cultivos agrícolas e/ou criação animal.
	Ampliação de sistemas integrados, combinando lavoura, pecuária e florestas comerciais.
	Recuperação e renovação de pastagens e solos degradados, por meio de correção da fertilidade, rotação de pastagens e controle de espécies invasoras.
Pecuária	Melhoramento nutricional dos rebanhos, com foco na redução das emissões de metano entérico por meio de aditivos que interfiram na metanogênese.
	Ampliação do manejo de dejetos animais, para produção de composto orgânico, biogás e biometano.

Fonte: Elaboração própria

Para avaliação da vulnerabilidade de implementação das medidas, listaram-se 15 barreiras para sua implementação, apresentadas na Figura 01. Nela observa-se que as medidas com menor grau de vulnerabilidade, portanto, com maior probabilidade para implantação são: “Qualificar os Sistemas de Plantio Direto de Grãos (SPDG)” (pontuação total igual a 10), “Aumentar a área ocupada por Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH)” (12) e “Aumentar a área ocupada por florestas plantadas com manejo sustentável” (13). Ressalta-se que essas estão presentes no Plano ABC+ Paraná (Brasil, 2021). Referente às medidas com maior vulnerabilidade, encontra o melhoramento nutricional e a produção de orgânicos. A primeira medida apresenta um grau de complexidade maior, pois interfere no cotidiano da propriedade, requer um investimento constante e o retorno é perceptível com o monitoramento adequado do rebanho, observado o ganho de massa na carcaça. Por sua vez, a produção de orgânicos depende de um empenho dos produtores, da certificação para garantir a finalidade e do monitoramento de indicadores que associam a produção à descarbonização, para garantir a sua efetividade como medida de mitigação.

Dentre as barreiras classificadas como tecnológicas e de infraestrutura, a baixa produtividade de solos degradados e o baixo nível de mecanização agrícola resultaram nos maiores valores na análise de vulnerabilidade (19 para ambos). A primeira barreira envolve um custo inicial para reverter a infertilidade do solo, o que impactará na implementação da medida. Por sua vez, a segunda barreira traz necessidade de investimentos voltados à mecanização, como a disponibilidade de linhas de crédito específicas, principalmente para pequenos produtores rurais, o que se relaciona com a barreira “crédito subsidiado de difícil acesso, principalmente, ao pequeno e médio produtor”.

As barreiras econômicas, que tratam dos custos de implementação e da gestão não profissional das propriedades rurais, também possuem um alto valor de vulnerabilidade (22 e 24, respectivamente). Nesse sentido, entende-se que o sucesso da medida depende de ações para subsidiar ou custear o investimento inicial, e a promoção de capacitações para gestores de propriedades, dialogando com uma estratégica de comunicação e educação voltadas a superar a barreira cultural/educacional de “Desconhecimento das vantagens da descarbonização”.

No que tange ao aspecto regulatório e institucional, as principais barreiras para o sucesso das medidas de descarbonização são a falta de mão-de-obra qualificada e o desconhecimento das tecnologias pelo produtor/empreendedor, que podem retardar a implementação ou reduzir sua aceitação. Nesse caso, reforça-se a importância da educação, por meio de

sensibilização, divulgação de resultados e benefícios financeiros e formação de mão-de-obra qualificada. Dessa forma, pode-se estruturar uma rede de ações complementares que dialogam entre si e cooperam para a redução da suscetibilidade das medidas de descarbonização às barreiras identificadas.

Medidas - Agropecuária \ Barreiras	Baixos níveis de mecanização agrícola	Maior complexidade e manutenção dos sistemas integrados (envolvendo pasto, lavoura e plantio)	Baixa produtividade de solos degradados	Disponibilidade hídrica	Crédito subsidiado de difícil acesso, principalmente, ao pequeno e médio produtor	Dificuldade em relação à titulação de terras que prejudicam o acesso ao crédito	Custo de implementação	Gestão não profissional das pequenas e médias propriedades	Suporte e assistência rural insuficiente	Falta ou deficiência de arranjos de intercâmbio tecnológico e de difusão do conhecimento	Falta de conhecimento do produtor ou empreendedor	Falta de mão-de-obra qualificada	Resistência à implementação ou adequação das práticas agrícolas de baixo carbono	Desconhecimento das vantagens da descarbonização	Total
Reduzir o consumo de compostos nitrogenados sintéticos/minerais (a)	2	1	2		1		2	1	1	2	2	2	1	1	18
Aumentar a utilização de bioinsumos (b; c)	1		2	1	1		2	2	1	2	2	2	1	1	18
Aplicar métodos alternativos de humidificação e secagem dos cultivos de arroz (c)	2			2			1	2	1	3	2	2	2	1	18
Realizar o melhoramento nutricional dos rebanhos, com enfoque na redução da emissão de metano entérico (d)	1	2	1		2	1	2	3	2	1	2	3	2	2	24
Aumentar o volume manejado de dejetos animais para produção de composto, biogás e biometano (e; f; g)	3			2	1		2	2	2	1	2	2	1	1	19
Aumentar a área dedicada à produção de orgânicos (h; i)			2		2	1	3	2	2	1	2	3	2	2	22
Qualificar os Sistemas de Plantio Direto de Grãos (SPDG) (j)	1		2		1		1	2	1			1	1		10
Aumentar a área ocupada por Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH) (j)	2				1	1	1	1	1	1	1	2	1		12
Recuperar ou renovar pastagens e solos degradados (j; k; l)	2		2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	17
Aumentar a área ocupada por florestas plantadas com manejo sustentável (j)	1		2	2	1	1	1	2	1	1		1			13
Aumentar a área ocupada por sistemas agroflorestais (j; m)		2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	1	21
Aumentar a área ocupada por sistemas integrados (j)	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	2	2		20
Aumentar a área atendida por sistemas irrigados (j)	3		2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1		19
Total	19	7	19	15	14	8	22	24	16	16	20	24	17	10	

REFERÊNCIAS

(a) IPCC, 2006; (b) Iwanicki et al., 2022; (c) Staie et al., 2024; (d) Knapp et al., 2015; (e) Inoue, 2008; (f) Barros et al., 2022; (g) Mathias e Silva, 2023; (h) Lal, 2007; (i) Souza; Prezotti; Guarçoni, 2012; (j) Paraná, 2023 - Plano ABC+; (k) Leite et al., 2017; (l) Carvalho et al., 2017; (m) SENAR, 2017;

Legenda

Classificação das barreiras	Barreiras - Nível de Vulnerabilidade
Tecnológicas e Infraestruturais	3 Alto
Econômicas	2 Médio
Regulatórias/institucionais	1 Baixo
Culturais/educacionais	

Figura 01: Matriz de vulnerabilidade das medidas de descarbonização consideradas para o Estado do Paraná. Fonte: Elaboração própria

Considerações finais

A análise de vulnerabilidade evidenciou que, embora existam oportunidades concretas para a implementação de medidas de descarbonização, especialmente aquelas já previstas no Plano ABC+ Paraná (Brasil, 2021), como os sistemas de plantio direto e florestas plantadas, sua efetividade depende da superação de barreiras relevantes. Destacam-se limitações econômicas, tecnológicas e institucionais, como custos iniciais elevados, baixa mecanização, dificuldade de acesso ao crédito e carência de mão de obra qualificada. Além disso, fatores como a complexidade operacional e o desconhecimento das vantagens da descarbonização reduzem a adoção de práticas mais avançadas, como o melhoramento nutricional e a produção orgânica. Nesse contexto, o sucesso das medidas está condicionado à implementação de ações integradas, incluindo incentivos financeiros, ampliação do acesso ao crédito, capacitação técnica e estratégias de comunicação e educação, de modo a reduzir vulnerabilidades e fortalecer a adoção sustentável no setor.

Referências

BARROS, T. V.; LOPEZ, G. de S.; SANTOS, R. J.; PARIZI, M. P. S.; CARDOZO-FILHO, L.; FERREIRA-PINTO, L. Gasification biomass in supercritical water as hydrogen production technology. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, p. e32511931296, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31296.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária (Plano ABC+): 2020-2030.* Brasília, DF: MAPA, 2021.

CARNEVALLI, R. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CURCIO, G. R. A pecuária na dinâmica da paisagem das regiões oeste e noroeste do Paraná. In: ANAIS DA 1ª REUNIÃO DE CORRELAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS E VEGETAÇÃO FLUVIAL, Colombo: Embrapa Florestas, 2024. p. 105–112. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1168158/1/EmbrapaFlorestas-2024-Eventos3-Trab10.pdf Acesso em: 24 nov. 2024.

CARVALHO, W. T. V.; MINIGHIN, D. C.; GONÇALVES, L. C.; VILLANOVA, D. F. Q.; MAURICIO, R. M.; PEREIRA, R. V. G. Degraded pastures and recovery techniques: review. **PUBVET**, v. 11, 2017. DOI: https://doi.org/10.22256/pubvet.v11n10.1036-1045.

INOUE, K. R. A. **Biogas production, characterization and agricultural use of the biofertilizer obtained in the cassava digestion**. 2008. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiência) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo agropecuário* 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Paraná*. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/panorama>. Acesso em: 26 mar. 2026.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). *Paraná em perspectiva.* Curitiba: IPARDES, 2020.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). *Desenvolvimento Paranaense: contexto, tendências e desafios*. Curitiba: IPARDES, 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (ed.). [S.l.]: IPCC, 2006. v. 4.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2023: synthesis report*. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>. Acesso em: 20 mar. 2026.

IWANICKI, N. S.; DELALIBERA JÚNIOR, I.; FARIA, M. R.; LOPES, R. B.; SOSA-GÓMEZ, D. R. Controle de qualidade de produtos microbiológicos. In: MEYER, M. C.; BUENO, A. F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. (ed.). **Bioinsumos na cultura da soja**. [S.l.: s.n.], 2022. cap. 29, p. 507–533.

KNAPP, J. R.; LAUR, G. L.; VADAS, P. A.; WEISS, W. P.; TRICARICO, J. M. Invited review: enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. **Journal of Dairy Science**, v. 97, 2014. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234.

LAL, R. Carbon management in agricultural soils. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 12, p. 303–322, 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/s11027-006-9036-7.

MATHIAS, J. F. C. M.; SILVA, S. S. Oportunidades e desafios para o desenvolvimento do biogás na agricultura familiar do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 87, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Acordo de Paris*. Paris: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2026.

PARANÁ. Lei Estadual nº 17.133, de 25 de abril de 2012 - Institui a Política Estadual sobre Mudança do Clima. Curitiba, PR: Diário Oficial do Estado do Paraná nº. 8700, 2012.

PARANÁ. *Decreto nº 8.937, de 4 de outubro de 2021.* Dispõe sobre a adesão do Estado do Paraná às campanhas “Race to Zero” e “Race to Resilience”, no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Diário Oficial do Estado do Paraná, Curitiba, PR, n. 11031, 4 out. 2021.

PARANÁ. *Lei nº 17.133, de 25 de abril de 2012*. Institui a Política Estadual sobre Mudança do Clima. Diário Oficial do Estado do Paraná, Curitiba, PR, 25 abr. 2012.

PARANÁ. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. **Plano estadual para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária**. Curitiba: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, 2023.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB). *Valor bruto da produção 2024: análise dos resultados preliminares*. Curitiba: SEAB, 2025.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável (SEDEST). *Inventário de emissões de gases de efeito estufa do Paraná: relatório técnico (2005–2019).* Curitiba: SEDEST, 2023. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Conheca-detalhes-do-Inventario-de-Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa-do-Parana>. Acesso em: 17 mar. 2026.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Planejamento. *Plano de descarbonização da economia paranaense: relatório técnico consolidado.* Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2025. Disponível em: <https://www.planejamento.pr.gov.br/Pagina/Plano-de-Descarbonizacao-da-Economia-Paranaense>. Acesso em: 27 mar. 2026.

SÁNCHEZ, L. E. *Avaliação de impacto ambiental: conceito e métodos*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL (SENAR). **Sistemas agroflorestais (SAFs)**: conceitos e práticas para implantação no bioma amazônico. Brasília: SENAR, 2017.

SOUZA, J. L. de; PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. Potencial de sequestro de carbono em solos agrícolas sob manejo orgânico para redução da emissão de gases de efeito estufa. **Idesia**, Arica, v. 30, n. 1, 2012. Disponível em: http://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/handle/item/443. Acesso em: 21 nov. 2024.

STAIE, B.; KINZER, A.; MACKNICK, J.; … STEWARD, D. **Pathways for agricultural decarbonization in the United States**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2024. (NREL/TP-5100-86071).

VOGEL, E.; BEBER, C. L. Carbon footprint and mitigation strategies among heterogeneous dairy farms in Paraná, Brazil. **Journal of Cleaner Production**¸v. 349, p. 131404, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131404.

PLATAFORMA DIGITAL PARA INVENTÁRIO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO PODER JUDICIÁRIO: INTEGRAÇÃO MULTIDISCIPLINAR E CONFORMIDADE COM *GHG PROTOCOL*

1 Jéssica Bandeira Pereira, 2 Gustavo Simmon, 3 Guilherme Machado, 4 Guilherme Nicotti, 5 Martina Koren, 6Fábio Duque, 7 Gustavo Bazzano, 8Kayo Soares

1 Arvut Engenharia e Meio Ambiente, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail:jessica_rp95@hotmail.com; 2 Arkium Soluções, e-mail: simon@arkium.com.br; 3 Arkium Soluções, e-mail: guilherme@arkium.com.br; 4 Arvut Engenharia e Meio Ambiente, e-mail: guinicotti@hotmail.com; 5 Arvut Engenharia e Meio Ambiente, e-mail: martinabkoren@gmail.com; 6 Arkium Soluções, e-mail: fabio@arkium.com.br; 7 Arkium Soluções, e-mail: gustavo@arkium.com.br; 8 Arvut Engenharia e Meio Ambiente, e-mail: kayo@arvut.com.br

Palavras-chave: Descarbonização; Gestão de dados; Rastreabilidade de informações.

Resumo

As mudanças climáticas intensificadas pelas atividades antrópicas têm evidenciado a necessidade de monitoramento e gestão das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nas últimas décadas diversos impactos provenientes dessas mudanças vêm sendo observados no Brasil, afetando o país no âmbito social e econômico. Considerando esse contexto, os órgãos do setor público devem atuar como referência para o setor privado na gestão climática. Em vista disso, os inventários de GEE do Poder Judiciário tornam-se ferramentas essenciais para o incentivo à quantificação, redução e compensação das emissões. Contudo, a elaboração dos inventários ainda enfrenta desafios relacionados à integração de dados, à padronização das informações e à participação de múltiplos setores. No presente estudo objetivou-se apresentar a plataforma SIGEE-AA (Sistema de Inventário de Gases de Efeito Estufa – Arvut & Arkium), desenvolvida para o sistema judiciário brasileiro, com foco na integração entre diferentes unidades organizacionais na elaboração de inventários de GEE, de forma colaborativa e em conformidade com as diretrizes do Programa Brasileiro *GHG Protocol*. Sendo assim, houve o desenvolvimento de uma plataforma digital baseada em referenciais metodológicos reconhecidos internacionalmente, incluindo o *GHG Protocol*. A interface da plataforma contempla todas as etapas do inventário, desde o planejamento até a geração de relatórios. Os resultados demonstraram que a plataforma possibilita a inserção descentralizada de dados por múltiplos usuários, a padronização dos formulários conforme as exigências metodológicas, a rastreabilidade das informações, a atualização dos fatores de emissão e a geração automatizada de relatórios. Além disso, o sistema contribui para a organização das informações, a redução de inconsistências e aumento da confiabilidade dos dados reportados. Vale destacar que a plataforma conta com suporte técnico especializado para auxiliar os usuários no uso da interface e na interpretação de premissas e dos escopos. Também é pertinente considerar que SIGEE-AA se encontra em fase de aprimoramento do sistema, visando a inclusão de dashboards, entre outros aperfeiçoamentos na apresentação dos resultados. Por fim, se concluiu que a utilização da plataforma SIGEE-AA representa uma ferramenta eficaz e inovadora para a gestão de inventários de GEE no setor público, contribuindo para o atendimento de diretrizes de governança climática e para o fortalecimento de estratégias institucionais de descarbonização.

Introdução

As mudanças climáticas podem decorrer de dois processos distintos, como erupções vulcânicas que são de origem natural e, aquelas associadas direta ou indiretamente às atividades humanas, que causam alterações na composição da atmosfera do planeta (DECRETO N°2.652/1998; IPCC, 2023). Essas mudanças vêm sendo intensificadas desde a Revolução Industrial principalmente devido ao aumento da concentração de gases de efeito estufa (IPCC, 2018; WADANAMBI et al., 2020). No Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas, foi apresentada uma taxa de aquecimento global de aproximadamente 0,2°C por década (IPCC, 2018). Além disso, estimou-se que as atividades antrópicas já causaram um aumento de 1°C de aquecimento global no período pós-industrial, podendo atingir 1,5°C entre 2030 e 2052, caso o ritmo atual seja mantido (IPCC, 2018).

O aquecimento global, embora seja um fenômeno natural, é intensificado pelas atividades antrópicas (Figura 01; IPCC, 2023). Os principais gases responsáveis por esse processo são o dióxido de carbono (CO2), o metano (CH4), o óxido nitroso (N2O), o hexafluoreto de enxofre (SF6), os hidrofluorcarbonos (HFCs) e os perfluorcabonos (PFCs) (FGVces; WRI, 2010; NASA, 2026). Esses gases são emitidos principalmente por atividades industriais, pela intensificação de práticas agrícolas, pelo setor energético e pelo consumo de combustíveis fósseis (WADANAMBI et al., 2020). Além disso, o desmatamento e as mudanças no uso do solo, associadas à expansão de áreas agrícolas e à ocupação humana, também contribuem significativamente para o aumento das emissões (WADANAMBI et al., 2020).

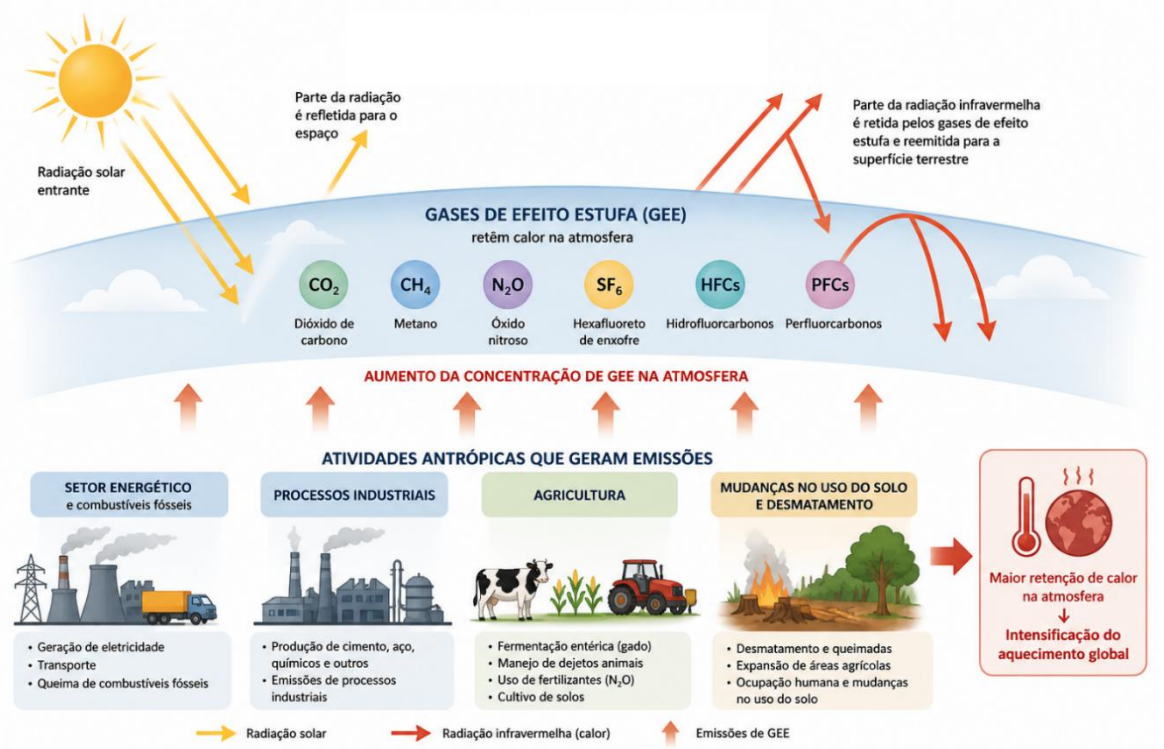


Figura 01. Esquematização do efeito estufa intensificado por atividades antrópicas. Fonte: Elaboração própria com apoio de inteligência artificial (ChatGPT, OpenAI).

Nas últimas décadas tem-se observado a intensificação de temperaturas extremas, bem como o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos, como chuvas intensas e secas regionais (IPCC, 2020; SEDEC/MIDR, 2026). No Brasil, esses impactos se manifestam em diferentes regiões do país, abrangendo desde secas na região central e nordeste (DA SILVA et al., 2020; SEDEC/MIDR, 2026) até eventos de precipitações extremas na região sul (LAZZARI et al., 2024; SEDEC/MIDR, 2026), como a inundação que ocorreu em 2024 no Rio Grande do Sul. Portanto, esses dados evidenciam que as mudanças climáticas já estão afetando as cidades, a economia, a estabilidade dos sistemas alimentares e, de forma mais intensa, as populações em situação de maior vulnerabilidade.

No período entre 2015 e 2024, conforme o Atlas Digital de Desastres no Brasil (SEDEC/MIDR, 2026), os eventos que mais afetaram a população brasileira foram a estiagem e a seca, seguidos pelas chuvas intensas. Considerando todos os desastres registrados no país, estima-se a ocorrência de 1212 óbitos, 2,64 milhões de desabrigados e 47,98 mil feridos e enfermos (SEDEC/MIDR, 2026). Além disso, os prejuízos públicos foram superiores a R$ 21 bilhões associados às estiagens e aproximadamente R$ 6 bilhões decorrentes de chuvas intensas (SEDEC/MIDR, 2026). Ainda, se avaliarmos apenas os danos materiais, as chuvas intensas representaram perdas superiores a R$ 36 bilhões no período.

A intensificação desses eventos evidencia não apenas a magnitude das mudanças climáticas, mas também a necessidade de desenvolvimento de estratégias governamentais eficazes de mitigação, adaptação e gestão do consumo. Em resposta a esse cenário, a comunidade internacional estabeleceu acordos e marcos regulatórios fundamentais, como o Protocolo de Kyoto (1997) e o Acordo de Paris (2015), que consolidaram a necessidade de limitar o aumento da temperatura média global e instituíram metas de redução de emissões. Nesse contexto, destaca-se a criação do *GHG Protocol* em 1998, como uma parceria entre World *Resources Institute* (WRI) e o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), com o objetivo de desenvolver padrões internacionais para a contabilização e relato de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Posteriormente, no Brasil, foi criado o Programa Brasileiro *GHG Protocol* pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (FGVces) e WRI, em parceria com Ministério do Meio Ambiente (MMA), Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), WBCSD e 27 empresas Fundadoras, como uma adaptação nacional da metodologia. Adicionalmente, foi desenvolvido uma ferramenta de cálculo para estimativas de emissões de GEE que permitem uma maior padronização, transparência e qualidade na contabilização das emissões nacionalmente (PBGHGP, 2026).

Nesse contexto de mudanças climáticas, as organizações públicas devem atuar como referências no gerenciamento, quantificação, redução e transparência de emissões. No âmbito do Poder Judiciário, foi instituída a Resolução CNJ n°400, de junho de 2021, que estabeleceu a política de sustentabilidade, incluindo princípios, metas, indicadores e mecanismos de monitoramento. Posteriormente, a Resolução CNJ n°594, de novembro de 2024, instituiu o Programa Justiça Carbono Zero com o objetivo de promover a descarbonização do Poder Judiciário brasileiro até 2030. Essa resolução estabelece que os órgãos do Judiciário devem medir, reduzir e compensar suas emissões de GEE com vistas à neutralização de carbono. Desta forma, a quantificação das emissões torna-se essencial para a compreensão das principais fontes emissoras e para o planejamento de ações voltadas à redução dos impactos.

Os inventários de gases de efeito estufa (IGEE) consistem em instrumentos técnicos que permitem a quantificação das emissões associadas às atividades diretas e indiretas da organização, incluindo consumo de combustíveis e energia. Esses inventários possibilitam a identificação das principais fontes emissoras, o acompanhamento temporal das emissões e a definição de estratégias voltadas à sua redução, constituindo como a etapa inicial para as medidas voltadas para a descarbonização (STJ/CNJ, 2025). Contudo, a elaboração de um inventário envolve diferentes setores da organização, tornando complexa a operação colaborativa e multidisciplinar, uma vez que a coleta de dados é proveniente de múltiplas fontes e setores institucionais. Nesse cenário, é comum que o processo de elaboração seja centralizado em apenas um único ponto focal e baseado apenas em processos manuais, o que pode resultar em inconsistências, retrabalho, dificuldades de consolidação e limitações na rastreabilidade dos dados.

Diante dessas limitações, torna-se fundamental a adoção de metodologias reconhecidas internacionalmente que integrem o trabalho intersetorial, maior padronização, comparabilidade e confiabilidade na quantificação das emissões. No contexto do Poder Judiciário, persistem desafios relacionados à integração de dados, à governança das informações e à eficiência operacional dos processos do inventário. Nesse sentido, observou-se uma lacuna no que se refere ao uso de ferramentas capazes de integrar as diferentes etapas de elaboração de inventários de GEE, desde a coleta e validação dos dados até a consolidação e geração de relatórios. A utilização de plataformas digitais surge como uma alternativa promissora para superar essas limitações, ao possibilitar a automação de processos, o aumento da rastreabilidade das informações e a colaboração entre diferentes unidades institucionais. Desta forma, o presente estudo tem por objetivo apresentar uma plataforma digital desenvolvida para Poder Judiciário brasileiro, com foco na integração entre diferentes unidades institucionais na elaboração de inventários de gases de efeito estufa (GEE), de forma colaborativa e em conformidade com as diretrizes do Programa Brasileiro *GHG Protocol*.

Material e métodos

A plataforma online SIGEE-AA (Sistema de Inventário de Gases de Efeito Estufa – Arvut & Arkium) foi desenvolvida para a elaboração de inventários de gases de efeito estufa no âmbito do Poder Judiciário, com base em referenciais metodológicos amplamente reconhecidos. O desenvolvimento da plataforma ocorreu por meio da parceria entre a Arvut Engenharia e Meio Ambiente e a Arkium Soluções a partir da identificação da necessidade de uma ferramenta que possibilitasse a elaboração colaborativa de inventários no Sistema Judiciário. Desta forma, o design da plataforma foi concebido para assegurar a padronização dos inventários, a transparência e confiabilidade das informações reportadas, bem como a visualização histórica das emissões.

O sistema foi estruturado com base nos princípios e diretrizes estabelecidos pelo Programa Brasileiro *GHG Protocol*, em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 14064-1:2020 e com os Guias Metodológicos do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; 2019). Adicionalmente, foi considerada a Resolução CNJ nº 594/2024, que estabelece as diretrizes para a gestão de sustentabilidade e governança climática no âmbito do Poder Judiciário. A interface da plataforma foi desenvolvida em ambiente digital, com estrutura modular que permite a integração de dados provenientes de múltiplos usuários (pontos focais).

O sistema contempla todas as etapas do processo de elaboração de um inventário de GEE, incluindo: (i) planejamento e definição dos limites organizacionais e operacionais; (ii) categorização das emissões em escopos; (iii) coleta de dados das atividades da organização; (iv) armazenamento dos dados e evidências para fins de auditoria; (v) cálculo das emissões; e (vi) geração dos relatórios. Dessa forma, os processos foram planejados para facilitar a inclusão de registros por diferentes usuários, organizar uma continuidade padrão de preenchimento e para garantir a transparência das informações. No fluxograma abaixo é possível visualizar o processo descrito anteriormente.

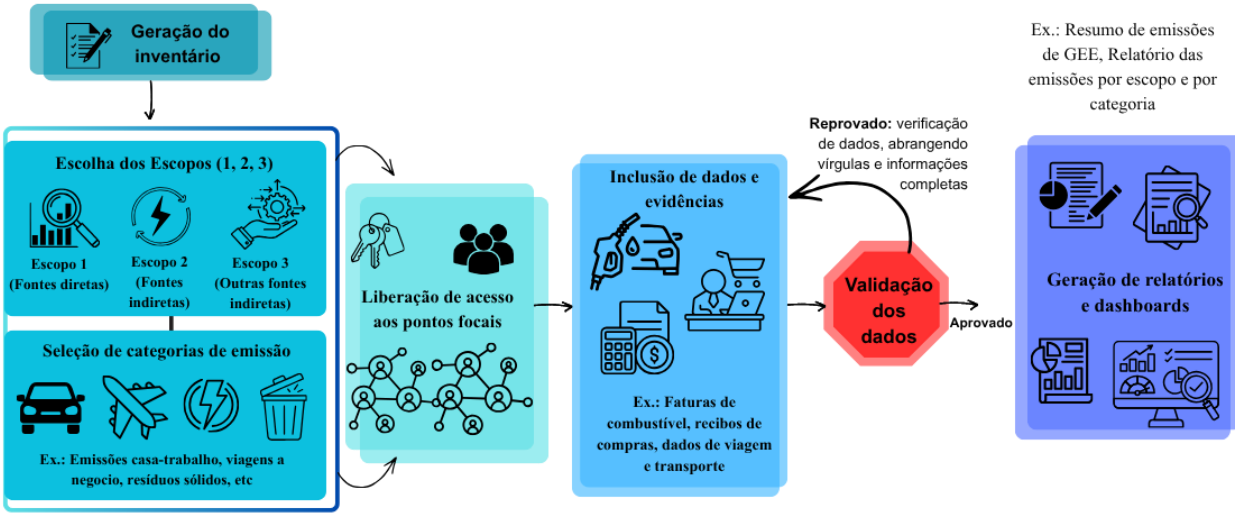


Figura 02. Etapas utilizadas como base para a definição da estrutura funcional do sistema da plataforma online. Fonte: Elaborado pelos autores.

A interface foi organizada em módulos (menus) funcionais correspondentes às etapas do inventário e à administração do sistema. O módulo de coleta de dados foi subcategorizado para contemplar as emissões de gases de efeito estufa de acordo com o Programa Brasileiro *GHG Protocol*. Portanto, o sistema foi elaborado para abranger as emissões diretas (Escopo 01) e indiretas (Escopo 02 e Escopo 03) associadas às atividades da organização. No Quadro 01 são descritos os escopos que foram considerados na plataforma.

Quadro 01. Escopos de emissões de gases de efeito estufa, de acordo com *GHG Protocol*.

ESCOPOS	DESCRIÇÃO
Escopo 01	**Emissões diretas:** emissões provenientes de fontes estacionárias, móveis e fugitivas sob controle operacional da organização (FGVces, 2018[a]).
Escopo 02	**Emissões indiretas de energia:** emissões associadas à geração de eletricidade adquirida de terceiros, contabilizadas pela abordagem baseada na localização e pela abordagem baseada na escolha de compra, referentes ao consumo em instalações sob responsabilidade da organização (FGVces, 2018[b]).
Escopo 03	**Outras emissões indiretas:** emissões de GEE que não estão sob controle direto da organização, mas que ocorrem em decorrência de suas atividades, incluindo emissões *upstream* e *downstream* (FGVces, 2018[c]).

A inserção dos dados foi estruturada para permitir o registro de informações de atividades por usuários previamente cadastrados, vinculados a unidades organizacionais. O sistema foi projetado com controle de acesso de perfil de usuário, restringindo permissões de visualização e edição de acordo com as responsabilidades atribuídas. Dessa forma, a plataforma permite que diferentes unidades organizacionais participem de forma colaborativa e ativa na construção do inventário, possibilitando que cada usuário insira informações relativas às atividades sob sua responsabilidade, conforme os escopos e categorias definidos durante a gestão do inventário.

Além disso, o sistema contempla mecanismos de registro e armazenamento de evidências associadas aos dados inseridos, permitindo a verificação das informações. Dessa forma, facilita o rastreamento dos dados incluídos no sistema e a realização de auditoria por terceiros. A estrutura da plataforma também possibilita o acompanhamento do histórico de inserções e alterações, favorecendo a rastreabilidade ao longo do processo da quantificação das emissões.

Por fim, os dados de atividades inseridos no sistema constituem a base para os cálculos de emissões de GEE, realizados a partir da aplicação das fórmulas disponibilizadas na ferramenta do *GHG Protocol*. Foram utilizados fatores de emissão atualizados, conforme a versão mais recente da ferramenta. Logo, a consolidação dos resultados ocorre de forma automatizada, a partir da integração entre fórmulas, fatores de emissão e dados inseridos por diferentes usuários.

Resultados

A interface inicial da plataforma centraliza as principais funcionalidades do sistema em um painel de controle, onde permite o acesso direto aos dados cadastrados e às etapas do processo de elaboração de um inventário. Os módulos possuem funcionalidades de acordo com as etapas da quantificação de GEE e da gestão do sistema, abrangendo: (i) Usuários e Permissões – destinado para o gerenciamento de perfis de acesso, permitindo o controle das permissões de visualização e edição de responsabilidades dos usuários; (ii) Configurações do sistema – permite a parametrização geral da plataforma, incluindo ajustes operacionais; (iii) Cadastro de inventário – possibilita a criação e configuração de novos inventários, incluindo a definição do ano-base e categorias de cada escopo; (iv) Coleta de dados – permite a inserção das informações e evidências das atividades da organização, conforme escopos e categorias previamente definidos; (v) Fatores de emissão – contempla o cadastramento e atualização dos fatores de emissão e demais bancos de dados utilizados nos cálculos de emissões, conforme metodologia adotada; e (vi) Relatórios – permite a visualização e exportação dos resultados do inventário de GEE.

A estrutura operacional da plataforma SIGEE-AA é apresentada na Figura 03. As entradas do sistema (*inputs*) correspondem às informações necessárias para a elaboração do inventário de GEE. Entre os *inputs* estão os dados da organização, como unidades e responsáveis pelo inventário; a definição do inventário, incluindo ano-base de referência, escopos e categorias que serão reportadas; fatores de emissão e demais bancos de dados utilizados nos cálculos e cadastros de informações; e documentos comprobatórios das atividades. A etapa de operação da plataforma abrange o cadastro e gerenciamento do inventário; a inserção das informações das atividades da organização de acordo com os escopos; os cálculos das emissões conforme a associação com o banco de dados dos fatores de emissão; validação técnica das informações, incluindo revisão de vírgulas e dados reportados; e por fim, a consolidação dos relatórios. Já as saídas do sistema (*outputs*) correspondem aos relatórios de emissões gerados a partir da quantificação de GEE, assim como, a base padronizada dos dados para fins de reporte e gestão.

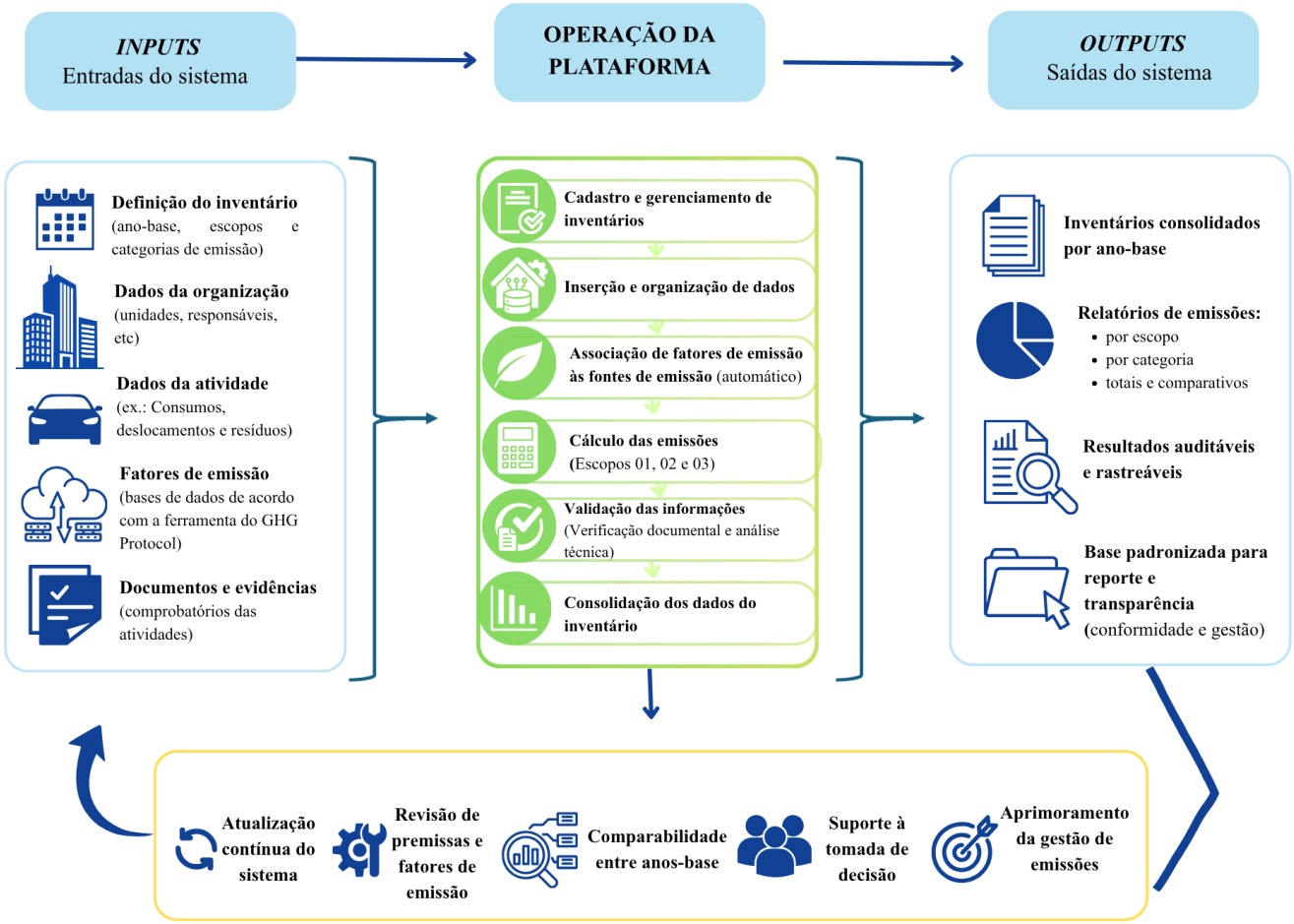


Figura 03. Estrutura operacional da plataforma SIGEE-AA. Fonte: Elaborado pelos autores.

Nas subcategorias dos três escopos, são disponibilizadas as fontes de emissão previamente definidas pelos administradores do inventário, acompanhadas de descrições padronizadas que orientam o usuário quanto ao preenchimento dos dados. A interface permite que o ponto focal tenha acesso apenas às fontes aplicáveis à sua unidade organizacional e realize os registros de forma individualizada, garantindo maior controle e consistência nas informações inseridas. Além disso, a inserção dos dados na plataforma é realizada por meio de formulários padronizados, definidos de acordo com as fontes de emissão estabelecidas pela ferramenta do *GHG Protocol*. Dessa forma, os campos de preenchimento foram estruturados para contemplar as informações necessárias para os cálculos das emissões, abrangendo, por exemplo, dados relacionados a combustíveis, transporte e consumo de energia. Essa padronização orienta o usuário durante o preenchimento e assegura que os dados inseridos estejam em conformidade com os requisitos metodológicos adotados. Além disso, isso promove a uniformidade das informações registradas entre diferentes unidades, considerando que diferentes pontos focais podem inserir dados para uma mesma fonte de emissão.

O sistema também permite a rastreabilidade das informações inseridas, por meio do registro automático da data e horário da criação, bem como das alterações realizadas. Essa funcionalidade torna-se essencial durante as revisões das informações, considerando que é permitido acompanhar em tempo real a atualização nos resultados dos cálculos dos fatores e no período em que ocorreram. Também é possível identificar as categorias já contabilizadas, contudo, vale destacar que apenas os usuários que estiverem cadastrando as informações terão conhecimento do progresso de inclusão das informações. Já que estes terão conhecimento da quantidade de informações que deverão inserir no sistema. Além do mais, a interface permite filtrar os registros cadastrados de acordo com o ano-base e os registros históricos, contribuindo para a validação dos dados.

Administração do sistema

O gerenciamento do sistema é realizado pelos administradores da organização e pelos desenvolvedores (Arvut&Arkium). Os administradores da organização possuem acesso amplo à plataforma, podendo cadastrar usuários (pontos focais), definir permissões conforme as responsabilidades atribuídas, configurações dos parâmetros do sistema, visualização do histórico de alterações, atualização e cadastro de bancos de dados e geração de relatórios. Por sua vez, os administradores da equipe de desenvolvedores são responsáveis pela gestão dos perfis de administradores da organização e dos usuários, bem como pelo monitoramento do sistema, incluindo atualizações, ajustes de configuração e de segurança, acompanhamento de acessos e suporte à organização. Os processos de gestão e as responsabilidades dos administradores do sistema são apresentados na figura abaixo.

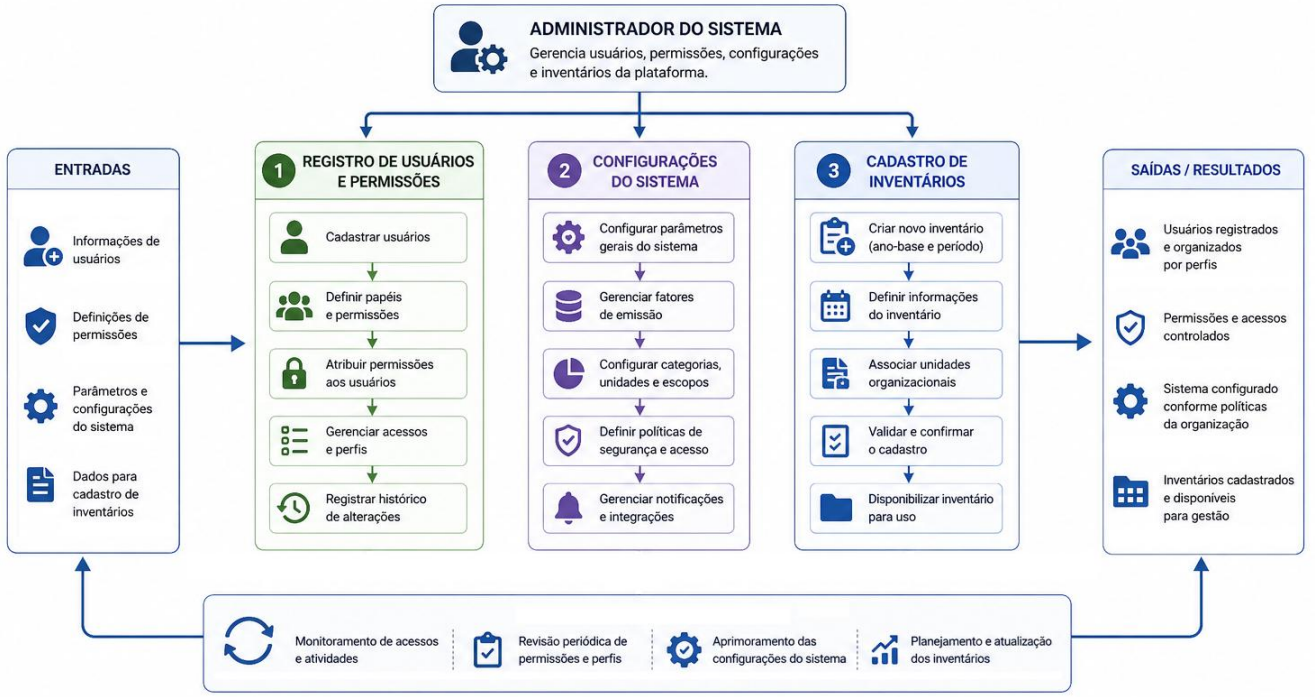


Figura 04. Estrutura do gerenciamento de inventários de gases de efeito estufa pela plataforma SIGEE-AA. Fonte: Elaborado pelos autores.

Fluxo do usuário

Os usuários do sistema, referentes aos pontos focais das unidades organizacionais, são responsáveis pelo cadastro dos dados de atividades que compõem o inventário de gases de efeito estufa. O processo de inserção das informações é realizado de forma estruturada, iniciando pela seleção do inventário correspondente ao ano-base, acesso às categorias de emissões e cadastro de informações sobre as atividades da organização e anexação de documentos comprobatórios. Os processos relacionados aos pontos focais são apresentados na Figura 05.

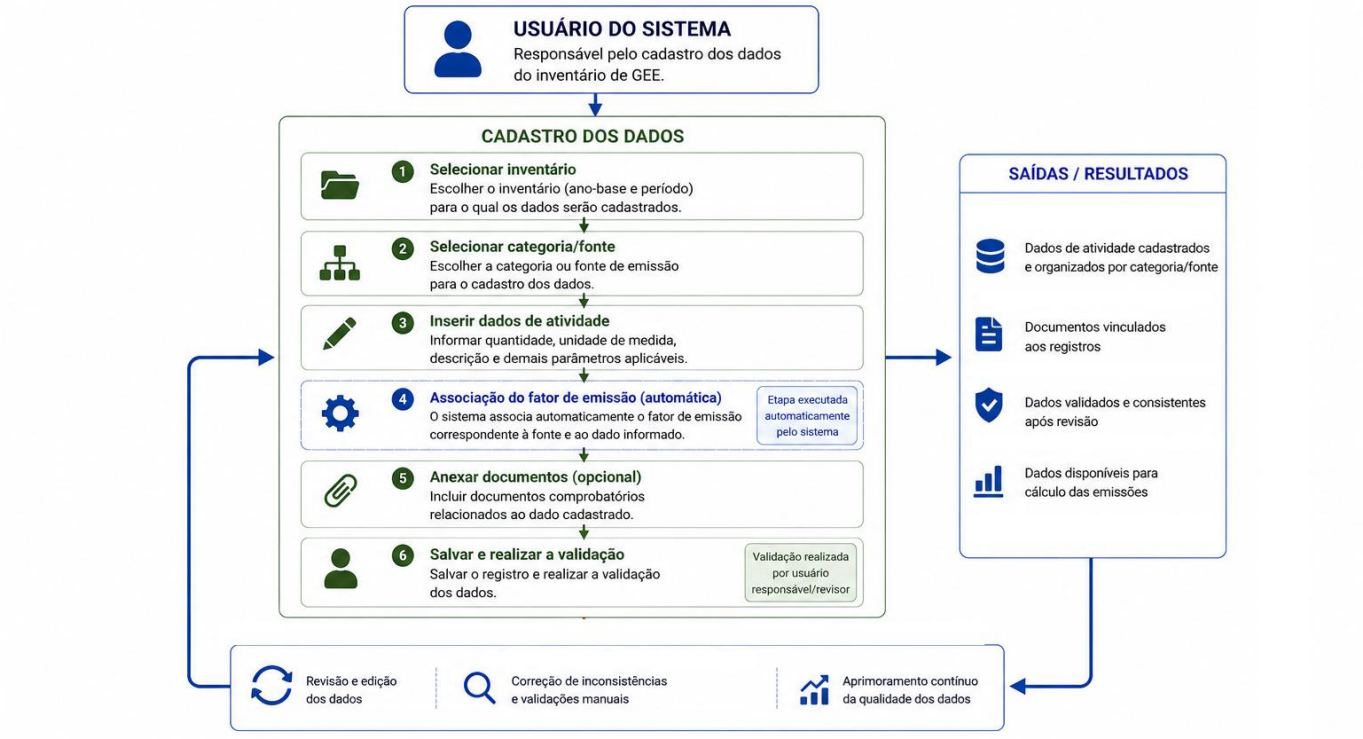


Figura 05. Cadastro de dados realizado pelos usuários da plataforma. Fonte: Elaborado pelos autores.

Arquitetura dos resultados

A geração dos relatórios, uma das etapas finais da elaboração do inventário, ocorre por meio da consolidação e apresentação dos resumos dos cálculos, conforme a ferramenta *GHG Protocol*. Portanto, os relatórios são apresentados em formatos de quadros contendo as informações resultantes das quantificações de emissões, nas extensões xls, csv, docx e pdf. São disponibilizados quatro relatórios principais por ano-base: (i) resumo das emissões totais, (ii) quantificação das emissões dos escopos desagregadas por categoria, (iii) quantificação de emissões de outros GEE não contemplados pelo Protocolo de Quioto, e (iv) resumo das emissões de GEE da organização por escopo e categoria.

Atualizações do sistema e suporte

Considerando as atualizações periódicas disponibilizadas pela ferramenta do *GHG Protocol*, assim como a necessidade de inclusão de novos parâmetros, a plataforma permite a atualização e o cadastro dessas informações, incluindo fatores de emissão e bases auxiliares, como aeroportos. Dessa forma, as informações reportadas permanecem alinhadas às versões mais recentes dos referenciais metodológicos adotados. A execução dessas atividades é realizada por especialistas e desenvolvedores, responsáveis pela manutenção e pelo aprimoramento contínuo da plataforma. Destaca-se que a plataforma possui um suporte técnico que visa auxiliar os usuários no processo de inserção dos dados e na interpretação de diretrizes metodológicas, ajudando na padronização e transparência dos resultados.

Discussões

Os resultados obtidos no presente estudo evidenciam que a utilização da plataforma SIGEE-AA contribui para a superação das limitações associadas à elaboração de inventários de GEE em instituições complexas, como tribunais e conselhos do Poder Judiciário. O uso de um ambiente digital integrado, que possibilita a descentralização na inserção de dados, demonstra o potencial da plataforma em promover uma maior organização e redução de inconsistências. Além disso, a padronização dos formulários conforme a ferramenta *GHG Protocol* permite uma uniformidade dos registros, facilitando a compatibilidade dos resultados históricos. Contudo, a qualidade dos resultados está diretamente relacionada à consistência das informações inseridas pelos usuários, situação que evidencia a necessidade de reuniões, capacitação contínua e acompanhamento técnico entre as equipes envolvidas no processo de elaboração do inventário.

Durante o período de testes da plataforma, percebeu-se que a qualidade das informações tende a melhorar entre inventários à medida que as equipes compreendem de forma mais clara os dados que devem ser reportados. Além disso, a continuidade da inserção de dados por um mesmo ponto focal ao longo dos anos-base contribui para o acúmulo de conhecimento sobre os processos e fontes de emissão, favorecendo à consistência e à confiabilidade das informações. Devido a isso, sugere-se já que mais de um ponto focal por unidade da organização receba treinamento e acompanhe os processos do inventário.

Por fim, no âmbito do Poder Judiciário, a utilização de ferramentas como a SIGEE-AA pode fortalecer os processos de governança climática ao facilitar o atendimento às diretrizes normativas relacionadas à mensuração, reporte e acompanhamento do histórico das emissões (Resolução CNJ n°594/2024). Dessa forma, o Poder Judiciário passa a atuar como referência e incentivador para a tomada de decisões no setor público e privado no controle de suas emissões à médio e longo prazo. Nesse sentido, a plataforma representa um instrumento de apoio à implementação de políticas públicas voltadas à descarbonização e evidencia um cenário promissor para a redução e compensação das emissões de GEE do país.

Considerações Finais

A aplicação da plataforma SIGEE-AA possibilitou a operacionalização do processo de elaboração de inventários de GEE em ambiente digital, permitindo a completa inserção descentralizada de informações por diferentes unidades organizacionais, mantendo a padronização e a rastreabilidade de todo o processo. Dessa forma, a utilização da plataforma contribui para a organização, padronização e confiabilidade das informações relacionadas com as emissões de GEE, além de facilitar a gestão dos dados e o acompanhamento dos resultados ao longo do tempo. Sendo assim, a ferramenta tornou-se uma inovação tecnológica de apoio à tomada de decisões e ao atendimento das diretrizes de governança climática no âmbito do Poder Judiciário.

Por fim, destaca-se que a plataforma está em constante aprimoramento, com a perspectiva de incorporação de ferramentas de análise de dados, como dashboards e recursos de *Business Intelligence* (BI), que possibilitarão a visualização dinâmica das informações e maior integração dos dados. Esse constante aperfeiçoamento contribui para o fortalecimento do processo de tomada de decisões, ampliando a aplicabilidade da plataforma SIGEE-AA no contexto de gestão climática do Poder Judiciário.

Agradecimentos

Os autores agradecem à equipe técnica da Arvut Engenharia e Meio Ambiente pelo apoio na validação das funcionalidades da plataforma, bem como pelas revisões dos bancos de dados incluídos no sistema. Também agradecem à Camila Jaeger pela contribuição no processo de compreensão dos cálculos e pelas trocas de conhecimento relacionadas à inventários de gases de efeito estufa.

Referências Bibliográficas

DA SILVA, D.F.; LIMA, M.J.S.; DE SOUZA NETO, P.F.; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; ALMEIDA, H.R.R.C.; PEREIRA, M.P.S. & COSTA, R.L.. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação para o leste do Nordeste. Revista Brasileira de Geografia Física, 2020. 13(2): 449-464.

DECRETO N°2.652/1998. Promulga a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, assinada em Nova York em maio de 1992. Presidência da República, 1998.

FGVces; WRI. Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol: Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2. ed. São Paulo: FGV, 2010.

FGVces[a]. Programa Brasileiro GHG Protocol. Nota técnica: Definição das categorias de emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 1. FGVces; Programa Brasileiro, 2018. v4.0

FGVces[b]. Programa Brasileiro GHG Protocol. Nota técnica: Definição das categorias de emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 2. FGVces; Programa Brasileiro, 2018. v.1.0

FGVces[c]. Programa Brasileiro GHG Protocol. Nota técnica: Definição das categorias de emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 3. FGVces; Programa Brasileiro, 2018. v.2.0

IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gás Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

IPCC. Aquecimento global de 1,5°C. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: Suíça, 2018.

IPCC. Mudança do clima e terra. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: Suíça, 2020.

IPCC. O oceano e a criosfera em um clima em mudança. *In:* Painel Intergovernamental sobre mudança do clima. Intergovernmental Panel on Climate Change, Governo do Brasil, 2019.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. pp. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

LAZZARI, D.; GARCEZ, A.; POLTOZI, N.; POZZI, G. & BRITO, C.. Identification of extreme weather events and impacts of the disasters in Brazil. Springer Nature, 2024.

NASA. What is the greenhouse effect? Disponível em: https://science.nasa.gov/climate-change/faq/what-is-the-greenhouse-effect/ Acesso em: Fevereiro de 2026.

PBGHGP. Programa Brasileiro GHG Protocol: Ferramenta de cálculo de emissões de GEE. Disponível em: https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol. Acesso em: Abril de 2026.

Resolução CNJ n°400, de junho de 2021. Dispõe sobre a política de sustentabilidade no âmbito do Poder Judiciário. Disponível em: https://atos.cnj.jus.br/files/original1235542021061860cc932a97838.pdf

Resolução CNJ n°594, de novembro de 2024. Institui o Programa Justiça Carbono Zero e altera a Resolução CNJ n°400/2021. Disponível em: https://atos.cnj.jus.br/files/original144529202411136734bb89548b2.pdf

SEDEC/MIDR. Atlas digital de desastres no Brasil: dashboard. Disponível em: https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/graficos.xhtml. Acesso em: Março de 2026.

STJ/CNJ. Cartilha para implementação da Resolução CNJ n°594/2024. Supremo Tribunal Federal e Conselho Nacional de Justiça, 2025.

WADANAMBI, R.T.; WANDANA, L.S.; CHATHUMINI, K.K.G.L.; DASSANAYAKE, N.P.; PREETHIKA, D.D.P. & UDARA, S.P.R.. The effects of industrialization on climate change. Journal of Research Technology and Engineering, 2020. 1(4): 86-94.

AVALIAÇAO DAS EQUAÇÕES DE VAN DER WAALS E CLAPEYRON EM COMPOSTOS DE CARBONO

1 Tarcisio Barcellos Bellinaso, 2 Alexander Bervian, 3 Leonir Terezinha Uhde, 4 Vania Elisabete Schneider
1 Departamento Municipal de Água e Esgotos; tarcisiobellinaso@gmail.com; 2Autarquia Água de Ivoti, alexbervian@yahoo.com.br; 3Unijuí, uhde@unijui.edu.br; 4Universidade de Caxias do Sul, veschnei@ucs.br

Palavras-chave: Equação de Van Der Waals; Equação de Clapeyron; Compostos de Carbono.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo realizar a avaliação das equações de Van Der Waals e Clapeyron utilizando os principais compostos de carbono presentes no ar: o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o monóxido de carbono (CO), para obtenção da pressão. Foram realizadas as avaliações das equações de estado, utilizando a equação para os gases reais: a equação de Van Der Waals e a equação de Clapeyron, com objetivo de obter a pressão. Foi verificado que quando temos o volume específico molar (υ^*) com valor baixo, por exemplo, 0,07 x 10^{-3} m³/mol, a obtenção da pressão pela equação de Clapeyron é menor que a pressão obtida pela equação de Van Der Waals. Este fato ocorre porque a equação de Van Der Waals é uma correção da equação de Clapeyron, utilizados para gases ideais ou perfeitos. Existem duas correções na equação de Van Der Waals, a correção para o volume das partículas e a correção para as forças de atração intermoleculares, com o objetivo de corrigir a pressão e o volume. Na correção para o volume das partículas, a lei dos gases perfeitos assume que as partículas de gás não possuem volume próprio e que as partículas não ocupam espaço. A equação de Van Der Waals corrige essa falha, introduzindo a constante *b* que representa o volume das moléculas do gás. Na correção para as forças de atração intermoleculares, a lei dos gases perfeitos também ignora as forças de atração entre as partículas de gás. A equação de Van Der Waals corrige essa falha, introduzindo uma constante a que representa a força de atração intermolecular. Logo, foi proposto por Van Der Waals que estas duas correções, para determinado gás ideal, se aproxime do comportamento dos gases reais referente à pressão e o volume. Lembrando que esta equação é um modelo, desenvolvido por Van Der Waals para representar o comportamento de um gás real, sendo possível melhorar este modelo colocando mais termos ou parâmetros que relacionam cada tipo de gás. É importante salientar que existem outras equações de estado que podem ser utilizadas para obter a pressão dos compostos de carbono e realizar suas análises, entre elas podemos citar a equação de Berthelot (1899), a equação de Peng-Robinson (1976), a equação de Redlich–Kwong (1949), a equação de Elliott, Suresh & Donohueentre (1990), entre outras.

EVALUATION OF THE VAN DER WAALS AND CLAPEYRON EQUATIONS IN CARBON COMPOUNDS

Keywords: Van Der Waals Equation; Clapeyron Equation; Carbon Compounds.

Abstract

This work aims to evaluate the Van Der Waals and Clapeyron equations using the main carbon compounds present in the air: Carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and carbon monoxide (CO) are used to determine pressure. Evaluations of the equations of state were carried out using the equations for real gases: the Van Der Waals equation and the Clapeyron equation, with the aim of obtaining the pressure. It has been verified that when we have a low molar specific volume (υ^*), for example, 0.07 x 10^{-3} m³/mol, the pressure obtained using the Clapeyron equation is lower than the pressure obtained using the Van Der Waals equation. This occurs because the Van Der Waals equation is a correction of the Clapeyron equation, which is used for ideal or perfect gases. There are two corrections to the Van Der Waals equation: a correction for particle volume and a correction for intermolecular attractive forces, aimed at correcting for pressure and volume. In correcting for the volume of particles, the ideal gas law assumes that gas particles have no volume and that the particles do not occupy space. The Van Der Waals equation corrects this flaw by introducing the constant *b*, which represents the volume of the gas molecules. In correcting for intermolecular attractive forces, the ideal gas law also ignores the attractive forces between gas particles. The Van Der Waals equation corrects this flaw by introducing a constant *a* that represents the intermolecular attractive force. Therefore, Van Der Waals proposed that these two corrections, for a given ideal gas, approximate the behavior of real gases with respect to pressure and volume. Remember that this equation is a model, developed by Van der Waals to represent the behavior of a real gas, and it is possible to improve this model by adding more terms or parameters that relate to each type of gas. It is important to point out that there are other equations of state that can be used to obtain the volume of carbon compounds and perform their analyses, among them we can mention the Berthelot equation (1899), the Peng-Robinson equation (1976), the Redlich-Kwong equation (1949), the Elliott, Suresh & Donohue equation (1990), among others.

Introdução

O carbono é um elemento químico sólido à temperatura ambiente, que não existe como gás puro. No entanto, compostos de carbono, como o dióxido de carbono (CO_2) e o monóxido de carbono (CO) podem ser tratados como gases ideais em certas condições para fins de estudo, mesmo que, na prática, sejam gases reais. Esses compostos de carbono, embora reais, podem aproximar o comportamento de um gás ideal sob certas condições, como um Ciclo de Carnot operando entre diferentes reservatórios de temperatura. A ideia de um gás ideal é um modelo teórico, e gases reais como o CO_2 e o CO só se comportam de forma semelhante ao gás ideal em altas temperaturas e baixas pressões, e ainda, quando as forças intermoleculares e o volume das moléculas são mínimos.

Este trabalho tem como objetivo realizar a avaliação das equações de Van Der Waals e Clapeyron utilizando os principais compostos de carbono presentes no ar: o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o monóxido de carbono (CO), para obtenção da pressão. A equação de Clapeyron é uma expressão matemática que relaciona grandezas como pressão (*P*), volume (*V*), temperatura (*T*) e a quantidade de matéria ou partículas da substância, medida em n° de mols (*n*) que compõem um gás perfeito ou ideal. Essa equação recebe o nome do físico francês Benoît Paul-Émile Clapeyron e pode ser compreendida como uma generalização das leis empíricas dos gases perfeitos referente à Lei de Boyle (1662), Lei de Charles (1787) e a Lei de Gay-Lussac (1802). A equação foi fundamental para o estudo dos gases ideais e possibilitou a evolução das máquinas térmicas, tornando-as cada vez mais eficientes ao longo das últimas décadas (Helerbrock, 2025). A equação de Van Der Waals é uma equação de estado de um fluido composto de partículas com um tamanho não desprezível e com forças intermoleculares, denominada como: as forças de Van Der Waals. A equação, cuja origem remonta a 1873, deve seu nome à Johannes Diderik Van Der Waals, que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1910 por seu trabalho na equação de estado dos gases e líquidos. Essa equação está baseada na modificação da lei dos gases perfeitos para que se aproxime da maneira mais precisa do comportamento dos gases reais, tendo em conta seu tamanho diferente de zero e a atração entre suas partículas (Cengel & Boles, 2002).

Gases perfeitos e gases reais

O gás perfeito tem partículas com volume desprezível e sem interações intermoleculares. As partículas de um gás perfeito estão em movimento contínuo e desordenado, com choques perfeitamente elásticos entre si e com as paredes do recipiente, sem perda de energia cinética. Para se comportar como gás perfeito, um gás real deve estar sob baixa pressão e alta temperatura. O gás real, diferentemente do gás perfeito, apresenta desvios de comportamento em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), devido à existência de volume molecular e forças intermoleculares. Essas características fazem com que as leis dos gases perfeitos ou ideais, nem sempre se apliquem com precisão aos gases reais.

Com isso, a principal diferença entre gases perfeitos e gases reais é que gases perfeitos é um modelo teórico, com partículas pontuais que não interagem entre si e têm volume desprezível, enquanto gases reais são os gases da natureza, que possuem volume próprio, força de atração e repulsão entre suas moléculas, e colidem de forma inelástica em certas condições. Os gases reais se aproximam do comportamento ideal em baixas pressões e altas temperaturas.

Compostos de carbono

Os principais componentes de carbono presentes no ar atmosférico são o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4). Além desses, em certas condições de poluição, outros compostos de carbono podem estar presentes em menores concentrações, como o monóxido de carbono (CO), que é um produto da queima incompleta de combustíveis. O dióxido de carbono (CO_2) é o composto de carbono mais abundante na atmosfera e um dos principais gases de efeito estufa. É um gás incolor, inodoro e composto por um átomo de carbono e dois átomos de oxigênio, fundamental para a vida na Terra, mas que também causa o efeito estufa quando em excesso. É liberado por processos naturais, como a respiração dos seres humanos e animais, a decomposição de matéria orgânica e por atividades humanas, principalmente a queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão, e gás natural), além de ser usado pelas plantas na fotossíntese. Em atividades humanas, também é utilizado em bebidas gaseificadas, extintores e como gelo seco. O metano (CH_4) também é um gás de efeito estufa, presente em menores quantidades que o dióxido de carbono (CO_2), porém com um potencial de aquecimento global consideravelmente maior a curto prazo. É um gás incolor, inodoro e inflamável, formado por um átomo de carbono e quatro de hidrogênio. É o principal componente do gás natural, mas também é um potente gás de efeito estufa, com origem tanto em fontes naturais (como pântanos) quanto em atividades humanas (como agricultura e extração de combustíveis fósseis). O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico, incolor, inodoro e insípido, formado pela queima incompleta de materiais ricos em carbono, como gasolina, carvão e madeira. Sua inalação é perigosa e pode ser fatal, pois impede a oxigenação dos tecidos do corpo, causando tonturas, náuseas e até a morte em altas concentrações.

Material e Métodos

Equação de Clapeyron (1834)

Segundo Helerbrock (2025) a equação de Clapeyron é derivada de três leis empíricas, isto é, leis que foram determinadas a partir de experimentos. Tais leis explicam o comportamento dos gases em transformações gasosas isovolumétricas (Lei de Gay-Lussac), transformações isobáricas (Lei de Charles) e transformações isotérmicas (Lei de Boyle). De acordo com essas leis nas transformações isovolumétricas, a razão entre pressão e temperatura termodinâmica de um gás perfeito permanece constante; nas transformações isobáricas, a razão entre o volume e a temperatura termodinâmica de um gás perfeito é constante e nas transformações isotérmicas, o produto da pressão pelo volume de um gás perfeito permanece constante. Conforme Ieno & Negro (2004) a equação de Clapeyron é expressa da seguinte forma:

$$P.V = n.\Re.T \quad (1)$$

Onde:
P - é a pressão do gás perfeito;
V - é o volume do gás perfeito;
n - é a quantidade de matéria da substância, medida em n° de mols;
$\Re$ - é a constante universal dos gases perfeitos; e;
T - é a temperatura em Kelvin (K).

A equação de Clapeyron pode também ser expressa da seguinte forma (Ieno & Negro, 2004):

$$P.V = m.R.T \quad (2)$$

Onde:
m - é a massa do gás; e;
R - é a constante de cada gás.

Foram obtidos, a massa molecular ou molar (M), a quantidade de matéria da substância, medida em nº de mols (n) e o volume específico molar (υ*) pelas expressões a seguir (Ieno & Negro, 2004):

$$R = \frac{\Re}{M} \quad (3)$$

Onde:
R - é a constante de cada gás;
$\Re$ - é a constante universal dos gases; e;
M - é a massa molecular ou molar (kg/mol).

$$n = \frac{m}{M} \quad (4)$$

Onde:
n - é a quantidade de matéria da substância, medida em n° de mols;
m - é a massa da amostra (kg); e;
M - é a massa molecular (Kg/mol).

$$\upsilon^* = \frac{V}{n} \quad (5)$$

Onde:
V - é o volume (m³);
n - é a quantidade de matéria da substância, medida em n° de mols; e;
υ* - é o volume específico molar.

Equação de Van Der Waals (1873)

Van Der Waals formulou a equação a partir de dados obtidos experimentalmente, ou seja, a equação de Van Der Waals é uma equação de estado empírica, e pode ser representada por:

$$\left(P + \frac{a}{\upsilon^{*2}}\right).\left(\upsilon^* - b\right) = \Re.T \quad (6)$$

Onde:
P - é a pressão do gás perfeito;
υ* - é o volume específico molar;
$\Re$ - é a constante universal dos gases perfeitos; e;
T - é a temperatura em Kelvin (K).

E as constantes empíricas que variam para cada tipo de gás obtidas por Van Der Waals:
a - é a constante que corrige a pressão depende das forças atrativas intermoleculares ou interatômicas do gás;
b - é a constante que corrige o volume e está relacionado ao volume finito ocupado pelos átomos e moléculas constituintes da substância.

A constante a está relacionada com as forças de atração intermoleculares e a constante b está relacionada com o volume molecular. A Tabela 1 nos traz os valores de a e b para alguns gases.

Tabela 1 - Constantes de Van Der Waals.

Gás	*a* (litro².atm/mol²)	*b* litro/mol²
Hidrogênio (H_2)	0,2444	0,02661
Hélio (He)	0,03412	0,02370
Nitrogênio (N_2)	1,390	0,03913
Oxigênio (O_2)	1,360	0,03183
Monóxido de Carbono (CO)	1,485	0,03985
Monóxido de Nitrogênio (NO)	1,340	0,02789
Dióxido de Carbono (CO_2)	3,592	0,04267
Água (H_2O)	5,464	0,03049
Metano (CH_4)	0,2287	0,04278
Cloro (Cl_2)	6,343	0,05422
Ozônio (O_3)	3,570	0,0487
Enxofre (S)	24,3	0,0660
Dióxido de Enxofre (SO_2)	6,714	0,05636
Flúor (F_2)	1,171	0,02896

Resultados e Discussão

Foram analisadas a equação para os gases reais: a equação de Van Der Waals e a equação para os gases perfeitos: a equação de Clapeyron, com objetivo de obter a pressão e realizar suas avaliações. Foram utilizados os principais compostos de carbono presentes no ar: o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o monóxido de carbono (CO). Foi obtida a pressão para os três compostos de carbono supramencionados, utilizando os mesmos valores de volume (V), temperatura (T), massa da amostra (m), o respectivo nº de mols (n) para cada composto, o respectivo volume específico molar (υ^*) para cada composto e a constante universal dos gases ($\Re$). Na Tabela 2 são apresentadas as grandezas volume (V), temperatura (T), nº de mols (n) e a constante universal dos gases ($\Re$) para obtenção da pressão pela equação de Clapeyron. Na Tabela 3 são apresentadas as grandezas de volume (V), temperatura (T), o volume específico molar (υ^*), a constante universal dos gases ($\Re$), a constante da pressão devido às forças intermoleculares (a) e a constante do volume próprio das moléculas (b) para cada composto.

Tabela 2 - Obtenção da pressão para os três compostos de carbono com equação de Clapeyron.

Compostos de Carbono	*V* (m^3)	*T* (*K*)	*n* (mols)	$\Re$ ($Pa.m^3/mol.K$)	*P* (N/m^2)
Dióxido de Carbono (CO_2)	150	450,15	2,00	8,31	49,88
Metano (CH_4)	150	450,15	5,49	8,31	136,91
Monóxido de Carbono (CO)	150	450,15	3,14	8,31	78,31

Onde:
V - Volume (m^3);
T - Temperatura em Kelvin (K);
n - Quantidade de matéria da substância (nº de mols);
$\Re$ - Constante universal dos gases ($\frac{Pa.m^3}{mol.K}$); e;
P - Pressão ($\frac{N}{m^2}$).

Tabela 3 - Obtenção da pressão para os três compostos de carbono com equação de Van Der Waals.

Compostos de Carbono	*V* (m^3)	*T* (*K*)	*n* (mols)	υ^* (m^3/mol)	$\Re$ ($Pa.m^3/mol.K$)	*a* ($J.m^3/mol^2$)	*b* (m^3/mol)	*P* (N/m^2)
Dióxido de Carbono (CO_2)	150	450,15	2	75	8,31	0,3592	0,00004267	49,88
Metano (CH_4)	150	450,15	5,49	27,32	8,31	0,02287	0,00004278	136,92
Monóxido de Carbono (CO)	150	450,15	3,14	47,77	8,31	0,1485	0,00003985	78,31

Onde:
V - Volume (m^3).
T - Temperatura em Kelvin (K);
n - Quantidade de matéria da substância (nº de mols);
υ^* - Volume específico molar (m^3/mol);
$\Re$ - Constante universal dos gases ($\frac{Pa.m^3}{mol.K}$);
a - Constante da pressão devido as forças intermoleculares ($\frac{J.m^3}{mol^2}$);
b - Constante do volume próprio das moléculas ($\frac{m^3}{mol}$);
J - Joule; e;
P - *Pressão* ($\frac{N}{m^2}$).

Conforme verificado nas Tabelas 2 e 3, a obtenção da pressão pela equação de Clapeyron e equação de Van Der Waals, para os três tipos de compostos carbono: o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o monóxido de carbono (CO) são iguais. Porém, são apresentados nas Tabelas 4 e 5, outra situação para obtenção da pressão para o CO_2, CH_4 e CO utilizando o volume específico molar (υ^*) baixo para os três compostos, com valor de 0,07 x 10^{-3} m³/mol, com as duas equações supramencionadas, onde a pressão obtida pela equação de Van Der Waals é maior que a pressão obtida pela equação de Clapeyron.

Tabela 4 - Obtenção da pressão com equação de Clapeyron.

Compostos de Carbono	υ^* (m^3/mol)	T (K)	$\Re$ (Pa.m^3/mol.K)	P (N/m^2)
Dióxido de Carbono (CO_2)	0,07 x 10^{-3}	450,15	8,31	5,3439 x 10^7
Metano (CH_4)	0,07 x 10^{-3}	450,15	8,31	5,3439 x 10^7
Monóxido de Carbono (CO)	0,07 x 10^{-3}	450,15	8,31	5,3439 x 10^7

Tabela 5 - Obtenção da pressão com equação de Van Der Waals.

Compostos de Carbono	T (K)	υ^* (m^3/k.mol)	$\Re$ (Pa.m^3/mol.K)	a (J.m^3/k.mol^2)	b (m^3/k.mol)	P (N/m^2)
Dióxido de Carbono (CO_2)	450,15	0,07	8,31	359,2	0,04267	6,3567 x 10^7
Metano (CH_4)	450,15	0,07	8,31	22,87	0,04278	13,2759 x 10^7
Monóxido de Carbono (CO)	450,15	0,07	8,31	148,5	0,03985	9,3765 x 10^7

Vale ressaltar que a equação de Van Der Waals descreve o comportamento de gases reais, enquanto a equação de Clapeyron descreve o comportamento de gases perfeitos. A equação de Clapeyron relaciona pressão, volume, temperatura, e número de mols de um gás perfeito. É usada para medir a pressão de gases e líquidos. A equação de Clapeyron implica que se dois gases perfeitos têm a mesma pressão, volume e temperatura, então os gases têm o mesmo número de partículas.

A equação de Van Der Waals corrige as hipóteses da equação de estado de um gás perfeito e considera que as partículas ocupam um volume e interagem entre si. É semelhante à lei dos gases ideais e considera a atração entre as moléculas de gás, isto é, a constante da pressão devido às forças intermoleculares (a) e a constante do volume próprio das moléculas (b). A equação de Van Der Waals é um modelo teórico mais complexo que descreve o comportamento de gases perfeitos em diferentes condições.

Conclusões

A equação de Van Der Waals é fundamental na Química e na Termodinâmica por descrever com mais precisão o comportamento dos gases reais, em comparação com a lei dos gases perfeitos. A equação de Van Der Waals corrige a lei dos gases perfeitos, considerando o volume próprio das moléculas e as forças de atração intermoleculares entre elas, que não são consideradas na lei dos gases perfeitos. Concluímos que quando temos o volume específico molar (υ^*) com valor baixo, por exemplo, 0,07 x 10^{-3} m³/mol, a obtenção da pressão pela equação de Clapeyron é menor que a pressão obtida pela equação de Van Der Waals. Este fato ocorre porque a equação de Van Der Waals é uma correção da equação de Clapeyron utilizada para gases ideais ou perfeitos. Existem duas correções na equação de Van Der Waals, a correção para o volume das partículas e a correção para as forças de atração intermoleculares, com o objetivo de corrigir a pressão e o volume. Na correção para o volume das partículas, a lei dos gases perfeitos assume que, as partículas de gás não têm volume e que as partículas não ocupam espaço. A equação de Van Der Waals corrige essa falha, introduzindo a constante b que representa o volume das moléculas do gás. Na

correção para as forças de atração intermoleculares, a lei dos gases perfeitos também ignora as forças de atração entre as partículas de gás. A equação de Van Der Waals também corrige essa falha, introduzindo uma constante *a* que representa a força de atração intermolecular. Logo, foi proposto por Van Der Waals que estas duas correções, para determinado gás perfeito, se aproxime do comportamento dos gases reais referente à pressão e o volume. Lembrando que esta equação é um modelo, desenvolvido por Van Der Waals para representar o comportamento de um gás real, sendo possível melhorar este modelo colocando mais termos ou parâmetros que relacionam cada tipo de gás. É importante salientar que existem outras equações de estado que podem ser utilizadas para obter a pressão e o volume dos compostos de carbono e realizar suas análises, entre elas podemos citar a equação de Berthelot (1899), a equação de Peng-Robinson (1976), a equação de Redlich–Kwong (1949), a equação de Elliott, Suresh & Donohue (1990), entre outras.

Agradecimentos

A todos os pesquisadores que contribuíram com este trabalho através de suas publicações.

Referências Bibliográficas

BERTHELOT, D. J. 1899. *Sur Une Méthode Purement Physique Pour La Détermination des Poids Moléculaires des Gaz et des Poids Atomiques de Leurs Éléments*. J. Phys., 8, p. 263-274.

CENGEL, Y. A. & BOLES, M. A. 2002. *Thermodynamics: an engineering approach.* Boston: McGraw-Hill. pp. 91-93. ISBN 0-07-121688-X

ELLIOTT, J. R. Jr; SURESH, S. J. & DONOHUE, M. D. 1990. *A Simple Equation of State for Nonspherical and Associating Molecules*. Ind. Eng. Chem. Res. 29 (7): 1476–1485. doi:10.1021/ie00103a057

HELERBROCK, R. A Equação de Clapeyron. Disponível online em: https://brasilescola.uol.com.br/fisica/a-equacao-clapeyron.htm. Acesso em 07 de abril de 2025.

IENO, G. & NEGRO, L. 2004. Termodinâmica. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 227p.:il. ISBN: 978-85-87918-75-8

LEE, J. F. & SEARS, F. W. 1969. Termodinâmica. São Paulo: Ao Livro Técnico, Editora da USP, 1969. 667p.: il.

PENG, D. Y. & ROBINSON, D. B. 1976. *A new two-constant equation of state.* Ind. Eng. Chem. Fundam. v. 15, p. 59-64.

REDLICH, O. & KWONG, J. N. S. 1949. *On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions.* Chemical Reviews. 44 (1): p. 233-244. doi: 10.1021/cr60137a013. ISSN 0009-2665

VAN DER WAALS, J. D. 2010. *The equation of state for gases and liquids*. *Journal of Supercritical Fluids*, 55, p. 403-414.

O POTENCIAL DAS AGROFLORESTAS NA PRESERVAÇÃO DO CERRADO FRENTE AO MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO COMO INSTRUMENTO DE SUSTENTABILIDADE

1 Allandelon Silva Maciel, 2 Antonio Gabriel Rocha Silva, 3 Danyella Santos Silveira, 4 Davi de Souza Ferreira, 5 Fabrissa Cotrim Pires, 6 Joseane Oliveira da Silva, 7 Magno Lucas Alcantara Silva, 8 Maria Laura Souza Silva

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - Campus Vitória da Conquista, e-mail: allandelonmaciel45@gmail.com; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - Campus Vitória da Conquista, e-mail: gabrielpessoa541@gmail.com; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - Campus Vitória da Conquista, e-mail: danyella2024silveira@gmail.com; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - Campus Vitória da Conquista, email: dsferreira0705@gmail.com; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - Campus Vitória da Conquista, email: fahcotrim4@gmail.com; 6 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - Campus Vitória da Conquista, email: joaseaneos@ifba.edu.br; 7 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - Campus Vitória da Conquista, email: lucasalcantara2501@gmail.com; 8 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - Campus Vitória da Conquista, email: marialaura@ifba.edu.br

Palavras-chave: Agroflorestas; Crédito de Carbono; Cerrado.

Resumo

O desenvolvimento do setor agropecuário configura-se como um dos principais vetores de uso e ocupação do solo no bioma Cerrado nas últimas décadas, resultando na supressão da vegetação nativa e na descaracterização de seus ecossistemas. Esse processo contribui para a liberação de carbono anteriormente armazenado nos solos, intensificando as emissões atmosféricas e ampliando os impactos ambientais associados. Nesse contexto, os sistemas agroflorestais surgem como uma alternativa capaz de promover o equilíbrio entre a produção agrícola e a preservação ambiental do bioma. Com o objetivo de avaliar o potencial desses sistemas, o presente estudo baseia-se na análise de trabalhos e documentos científicos selecionados em plataformas como o Google Acadêmico, concentrando-se, majoritariamente, em publicações no período de 2020 a 2026, caracterizando-se como uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e qualitativo. Além disso, foi realizada análise documental da Lei nº 15.042, de 2024, a fim de compreender o funcionamento do mercado de créditos de carbono no Brasil e sua relação com práticas sustentáveis no setor agropecuário. Ademais, utilizaram-se dados coletados na rede colaborativa MapBiomas para a elaboração de um mapa comparativo de uso e ocupação do solo nos anos de 1985 e 2024, por meio do uso do sistema de informações geográficas QGIS. Espera-se, ao final, discutir e evidenciar os benefícios dos sistemas agroflorestais em relação à agricultura convencional, destacando sua contribuição para a manutenção das características ambientais do Cerrado, bem como seu potencial na geração de ativos no mercado de créditos de carbono, promovendo, assim, uma fonte de renda associada à sustentabilidade.

Introdução

O Brasil é representado por um território cuja cobertura vegetal se destaca pela complexidade de seus biomas e formações florestais, com estruturas diversificadas e características únicas, que as colocam em um patamar de extrema importância nos âmbitos ambiental, social e econômico em escala global. No país, podem ser encontrados seis tipos de biomas: Amazônia, Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Pampa e Pantanal. Esses biomas são importantes não apenas como recursos naturais no território nacional, mas também se destacam como ambientes de grande riqueza de biodiversidade no planeta. Além disso, exercem funções ecológicas essenciais, como a manutenção da biodiversidade, a regulação do clima e a proteção dos recursos hídricos, sendo diretamente influenciados pelas dinâmicas de uso e ocupação do solo ao longo do tempo (IBGE, 2026a). Um exemplo significativo de tal importância são as discussões frequentes envolvendo a floresta Amazônica e sua relevância como a maior floresta tropical do mundo, sendo considerada a maior diversidade de reserva biológica do planeta. Outra referência de destaque é o apelo à proteção do bioma mais ameaçado do Brasil, a Mata Atlântica, que possui recursos hídricos essenciais para o abastecimento humano e está ocupada por mais de 50% da população brasileira. Ademais, os demais biomas, embora não sejam tão discutidos quanto os dois primeiros, exercem importância similar, tanto por suas funções socioambientais quanto por abrigarem exemplares únicos da fauna, da flora e dos recursos naturais brasileiros, sendo que alguns deles se encontram ameaçados pelo avanço das atividades agropecuárias, como a Caatinga e o Cerrado (IBGE, 2026a).

O Cerrado, reconhecido como a Savana mais rica do mundo em biodiversidade (com mais de 10.000 espécies), é frequentemente referido como “bioma da integração nacional” devido à sua influência em diversas regiões do Brasil e à sua localização estratégica. Esse título reflete a importância do Cerrado na coesão ecológica e social do país, assumindo o cargo de segundo maior bioma da América Latina, atrás apenas da Floresta Amazônica (Weichert et al., 2023). O bioma ocorre principalmente no Planalto Central Brasileiro, estando presente em Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Distrito Federal, Maranhão, Piauí, Rondônia, São Paulo e Paraná, ocupando 24% do território nacional (IBGE, 2026b).

O bioma assume uma relevância ambiental de alto nível na regulação do clima, principalmente por sua influência nas chuvas regionais. Sua vegetação é uma das principais variáveis determinantes neste contexto, juntamente a sua capacidade de armazenamento de água, configurando-se em um reservatório de água significativo para o território nacional (Weichert et al., 2024). As Veredas, reconhecidas por sua relevância na heterogeneidade ambiental do Cerrado, constituem uma fitofisionomia composta por formações arbustivo-herbáceas de densidade variável. Sua ocorrência está associada ao afloramento do lençol freático, o que favorece condições alagadas. Além disso, esses ambientes exercem papel essencial na formação de nascentes no Planalto Central brasileiro, contribuindo para a alimentação de importantes cursos d'água e sendo, por isso, denominados "berço das águas" do Cerrado e do Brasil (Frota et al., 2022).

As áreas úmidas, nas quais as veredas se encaixam, despertam grande interesse como áreas de retenção de carbono devido à sua elevada capacidade de armazenamento de grandes volumes de dióxido de carbono, contribuindo para a regulação do clima aliada à sua capacidade de armazenamento de água. Outros sistemas importantes do Cerrado são as turfeiras e demais zonas úmidas, abastecidas pelas águas subterrâneas provenientes de aquíferos. Os maiores estoques de carbono do Cerrado estão presentes em veredas e florestas ripárias de pântano com solos de turfa, capazes de armazenar volumes da ordem de 3,19 Gt, correspondendo a 13,3% do carbono disponível nos solos do bioma, estimado em aproximadamente 24 Gt (Beer et al., 2024).

No entanto, todo esse ecossistema esteve e permanece submetido a constante pressão do desenvolvimento econômico e da ocupação social no país. O bioma se manteve quase que inteiramente intacto até a década de 1950, somente a partir da abertura da rede rodoviária na década de 1960, resultante da transferência da Capital Federal do Rio de Janeiro para Brasília, a cobertura vegetal primária começou a ser suprimida para privilegiar os avanços na pecuária e agricultura intensiva (IBGE, 2026b).

O crescimento das atividades agropecuárias no Cerrado, intensificado nas décadas passadas, tem resultado em alterações expressivas no uso e na cobertura do solo, conforme apontam Freitas e Maciente (2016). Esse processo tem afetado principalmente ambientes mais vulneráveis, levando à descaracterização de ecossistemas naturais. Nesse contexto, áreas como veredas e zonas ripárias figuram entre as mais impactadas, uma vez que a vegetação nativa tem sido gradualmente substituída por pastagens e lavouras destinadas à produção agrícola.

Neste contexto, as agroflorestas emergem como um sistema de produção agrícola-florestal. Nesses sistemas, espécies arbóreas e arbustivas, sejam nativas ou exóticas, são combinadas a cultivos agrícolas por diferentes meios de manejo do solo, de maneira intencional e planejada, em uma mesma área, ao mesmo tempo ou em uma sequência de tempo pré-determinada. Dessa maneira, aprimora-se a geração de renda, diversifica-se a produção e promove a participação da comunidade local, bem como a preservação da água, a proteção e regeneração do solo contra processos erosivos (SENAR, 2017).

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) foram adotados há milênios por comunidades indígenas e populações tradicionais em áreas tropicais úmidas, através da aplicação prática do conhecimento ecológico tradicional. Esse conhecimento, acumulado ao longo de gerações por meio da relação contínua com o ambiente natural, constitui um saber empírico que orienta o manejo dos ecossistemas e, em diversas situações, revela-se mais eficaz do que métodos convencionais de gestão ambiental (Silva et al., 2024).

Os benefícios decorrentes da adoção desses sistemas são amplamente reconhecidos. No entanto, é importante ressaltar que nem todos os SAFs apresentam os mesmos resultados sob a perspectiva da sustentabilidade ambiental, considerando que pesquisas recentes demonstram que modelos mais complexos, que tendem a "imitar" a dinâmica de florestas nativas, apresentam perdas de biodiversidade significativamente menores em comparação às monoculturas e a outros modelos mais simplificados. Um tipo de sistema misto, denominado SAF sucessional, constitui um exemplo relevante, do qual derivam metodologias intensivas, como a agricultura sintrópica. Esse sistema baseia-se nos princípios da sucessão ecológica aplicados à sucessão de culturas, aproveitando de forma estratégica os espaços horizontal e vertical da área, por meio do adensamento de espécies em diferentes estágios (pioneiras, secundárias e clímax). Dessa forma, é possível explorar os diferentes estágios da floresta e estabelecer um índice considerável de cobertura vegetal do solo ao longo do ano (SENAR, 2017; Wynter et al., 2025).

Além de contribuírem para a regularização das vazões dos mananciais hídricos, por meio da presença da cobertura vegetal, e para a redução da pressão sobre a vegetação nativa, os SAFs também atuam em uma questão crucial em torno das discussões frequentes sobre o aquecimento global: o sequestro de carbono atmosférico, por intermédio do processo fotossintético da biodiversidade que os compõe (Souza, 2018). Nesse cenário, sua contribuição se estende também às dinâmicas do mercado global de créditos de carbono.

No contexto do financiamento climático, um crédito de carbono representa a autorização para emitir uma certa quantidade de dióxido de carbono (CO_2) ou outros gases de efeito estufa (GEE). Esse sistema foi estruturado internacionalmente com o Protocolo de kyoto, que definiu unidades chamadas Reduções Certificadas de Emissão para controlar e acompanhar as emissões. Os créditos de carbono podem ser negociados como instrumentos financeiros, enquanto o termo "licenças de emissão" costuma ser utilizado para sistemas regulados, como os vinculados ao Protocolo de Kyoto (Kalu, 2023).

Nos últimos anos, o Brasil tem ampliado sua participação no mercado de crédito de carbono com a promulgação da Lei nº 15.042, de 2024, que estabelece diretrizes para o funcionamento desse mercado no país. De acordo com o art. 1º, § 1º , a referida lei "aplica-se às atividades, às fontes e às instalações localizadas no território nacional que emitam ou possam emitir GEE, sob responsabilidade de operadores, pessoas físicas ou jurídicas". A lei também institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), que tem entre suas finalidades a redução das emissões de gases de efeito estufa, a promoção do desenvolvimento sustentável e a criação de um mercado regulado de carbono, em consonância com os objetivos e metas estabelecidos pela Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) (BRASIL, 2024).

O SBCE estabelece limites máximos de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para os agentes regulados, aos quais são atribuídas cotas que lhes conferem o direito de emitir determinado volume de emissões, denominadas Cotas Brasileiras de

Emissão (CBE), caracterizadas como ativos que representam a autorização para emitir uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO_2e). Nesse contexto, as empresas ficam obrigadas a realizar o monitoramento contínuo de suas emissões, devendo posteriormente reportá-las por meio de relatórios submetidos a processo de avaliação de conformidade por organismos acreditados. Ademais, as reduções ou remoções de emissões, verificadas e registradas podem ser convertidas em Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVEs), que constituem créditos de carbono negociáveis no âmbito do mercado regulado, podendo ser adquiridos por empresas que excedam seus limites de emissão, conforme os critérios estabelecidos pela legislação. Paralelamente, tais créditos também podem ser direcionados ao mercado voluntário, conforme o interesse dos agentes. (BRASIL, 2024).

Diante disto, observa-se que a busca por metodologias e sistemas voltados à redução da concentração de carbono na atmosfera tem se intensificado no cenário nacional, impulsionada pelas crescentes demandas climáticas dos últimos anos. Nesse sentido, o bioma Cerrado ganha destaque por desempenhar papel estratégico como importante sumidouro de carbono (Weichert et al., 2024). Entretanto, o avanço acelerado da ocupação agropecuária e a consequente degradação deste bioma reforçam a necessidade de soluções sustentáveis para a gestão ambiental desses territórios. Os sistemas agroflorestais são uma alternativa promissora, ao conciliar produção e proteção ambiental, apresentando elevado potencial para contribuir com a sustentabilidade ecossistêmica. Assim, o presente trabalho tem como objetivo investigar e analisar esse potencial, especialmente em sua articulação com a dinâmica do mercado nacional de créditos de carbono.

Material e Métodos

A obtenção de informações e dados relevantes para a caracterização do bioma Cerrado, bem como para a análise da degradação associada ao avanço das atividades agropecuárias e do potencial dos sistemas agroflorestais na preservação desses ecossistemas, foi realizada a partir de uma revisão bibliográfica. Para isso, realizou-se o levantamento, seleção e análise de trabalhos científicos, artigos acadêmicos e documentos legislativos pertinentes à temática. A revisão bibliográfica consistiu no gerenciamento sistemático de informações disponíveis em diferentes fontes, permitindo a construção de uma base teórica sólida para a investigação proposta. Conforme destacado por Ocáña-Fernández e Fuster-Guillén (2021), esse método possibilita a síntese e a integração de conhecimentos previamente produzidos, contribuindo para a compreensão aprofundada do objeto de estudo e para a identificação de lacunas na literatura. Ademais, a revisão bibliográfica constitui uma abordagem essencial para a produção de conhecimento científico, ao ampliar o alcance analítico do pesquisador e fundamentar suas interpretações a partir do contexto investigado.

O mapeamento e a interpretação das informações constituem uma etapa importante para orientar a organização dos dados, conferindo à pesquisa um caráter exploratório de abordagem qualitativa. Esse delineamento é adequado à análise de fenômenos complexos e ainda pouco sistematizados, permitindo uma compreensão mais aprofundada de suas variáveis e relações. A pesquisa exploratória qualitativa possibilita a familiarização com o objeto de estudo, além da identificação de padrões e da formulação de hipóteses para investigações futuras. Nesse contexto, prioriza-se a análise interpretativa dos dados, com foco na compreensão dos significados e contextos envolvidos. Diferentemente da abordagem quantitativa, centrada na mensuração de variáveis, a perspectiva qualitativa adotada busca uma análise mais aprofundada do fenômeno, alinhando-se aos objetivos propostos neste estudo (Lösch et al,. 2023).

O estudo se fundamenta em diferentes abordagens e evidências sobre o tema, com dados provenientes, principalmente, de órgãos oficiais como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR). O estudo foi complementado por análise documental das diretrizes estabelecidas pela Lei nº 15.042, de 2024, que orienta a dinâmica do mercado de crédito de carbono ao âmbito do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). A coleta de dados foi realizada por meio de buscas com palavras-chave como “Sistemas Agroflorestais”, “Crédito de Carbono” e “Veredas do Cerrado”, em plataformas como Google Acadêmico. Priorizaram-se estudos publicados entre 2020 e 2026, com o intuito de contemplar produções mais recentes, complementadas por referências relevantes no período de 2015 a 2026.

Por fim, para a elaboração do mapa comparativo do avanço da agropecuária entre os anos de 1985 e 2024, maior intervalo disponível na plataforma, utilizaram-se dados coletados junto à rede colaborativa multi-institucional MapBiomas, processados e analisados no sistema de informação geográfica QGIS.

Resultados e Discussão

Como citado anteriormente por IBGE (2026b), a ocupação gradual do Cerrado ao longo das décadas, associada à contínua degradação do bioma, está diretamente relacionada à expansão e intensificação das atividades agropecuárias, que tomaram impulso na década de 1960 e se mantiveram em trajetória ascendente até os dias atuais. Os mapas a seguir apresentam uma comparação do uso e ocupação do solo entre os anos de 1985 e 2024, evidenciando as principais alterações ocorridas ao longo desse período. Por meio dessa análise comparativa, torna-se possível observar a magnitude das mudanças espaciais e temporais no território do Cerrado, permitindo uma melhor compreensão das transformações associadas à expansão das atividades agropecuárias.

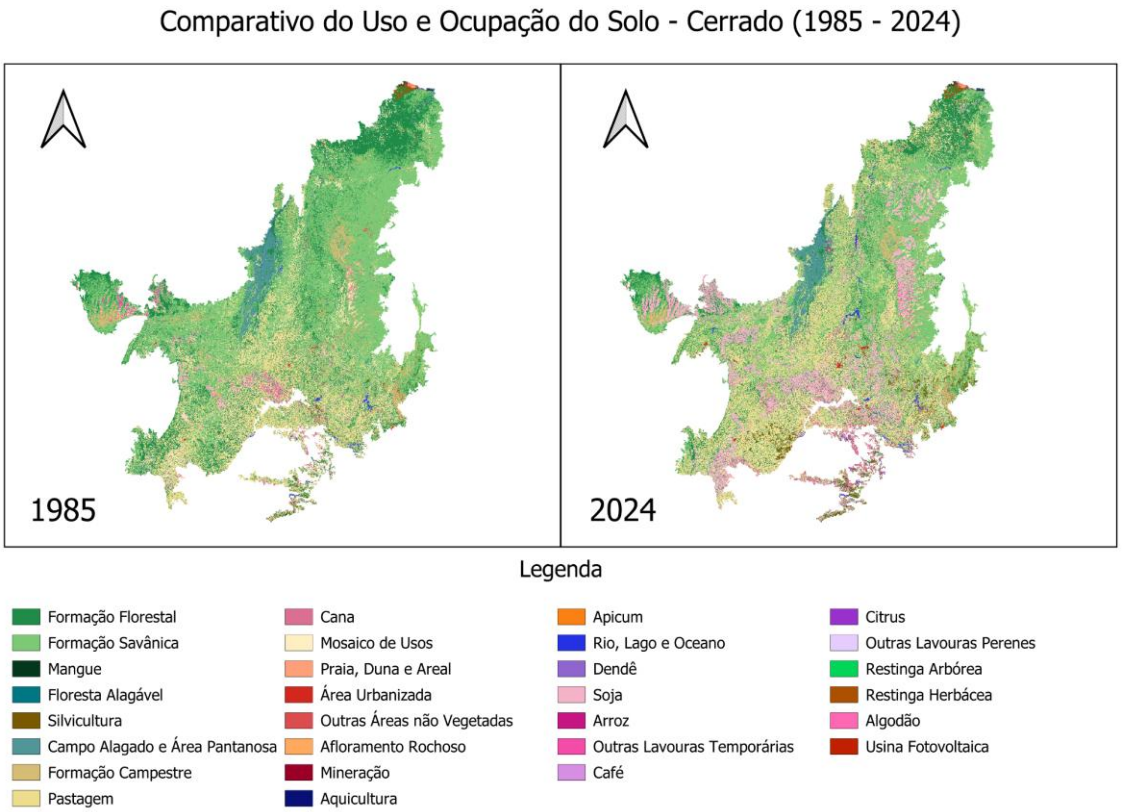


Figura 01: Mapa Comparativo do Uso e Ocupação do Solo - Cerrado (1985 - 2024)
Fonte: Adaptado de MapBiomas (2026)

O mapa demonstra a intensa expansão das atividades agropecuárias no bioma, marcada pela significativa supressão da vegetação nativa e sua substituição por diferentes usos do solo. Observa-se o predomínio de culturas agrícolas, com destaque para o cultivo de soja, seguido por algodão, cana-de-açúcar e outras culturas, além da expressiva presença de pastagens. Esses elementos, em conjunto, configuram o avanço do domínio agropecuário ao longo do tempo nas áreas de mata, contribuindo com a redução das formações savânicas e florestais. Nota-se ainda que essa ocupação se estende, em muitos casos, até as áreas próximas aos corpos hídricos do bioma, conforme evidenciado no mapa.

A supressão da vegetação nativa é uma problemática que vai além da perda de biodiversidade. Como destacado por Beer et al. (2024), veredas e florestas ripárias paludosas, associadas a solos turfosos, apresentam os maiores estoques de carbono do Cerrado. As turfeiras do bioma, caracterizadas como zonas úmidas com elevada concentração de matéria orgânica, armazenam grandes quantidades de carbono, visto que uma camada de 15 cm de turfa pode reter um volume equivalente ao carbono presente em uma floresta tropical com elevado estoque carbonífero. Quando drenadas, essas áreas podem liberar entre 2,6% e 3,8% das emissões antrópicas anuais globais.

Dessa maneira, é possível inferir que a retirada da cobertura vegetal potencialmente reduz os índices de matéria orgânica desses solos, enquanto o desmatamento contribui para sua drenagem, alterando, consequentemente, a capacidade de armazenamento de carbono do bioma e favorecendo a liberação desse elemento na atmosfera.

Para averiguar o potencial das agroflorestas neste sentido, Stöcker et al. (2018) avaliaram os estoques de carbono e a densidade do solo em um Argissolo sob três usos: SAF agroecológico, mata nativa e pomar, em área da Embrapa em Pelotas, no Rio Grande do Sul. O SAF, implantado há três anos, foi estruturado com diferentes espécies arbóreas, frutíferas e culturas agrícolas, combinadas com plantas destinadas à produção de biomassa e recuperação da fertilidade do solo. Nesse sistema, a biomassa produzida foi constantemente manejada e redistribuída para as linhas das árvores, com o intuito de favorecer a ciclagem de nutrientes e o acúmulo de matéria orgânica. As amostras de solo foram coletadas nas linhas e entrelinhas dos diferentes tratamentos, e os estoques de carbono foram determinados com base na densidade do solo, teor de carbono e profundidade amostrada. Os resultados indicaram que o SAF apresentou acúmulo de carbono semelhante ao da vegetação nativa até 0,2 m de profundidade, além de contribuir para a redução da densidade do solo nas entrelinhas, evidenciando seu potencial para a fixação de carbono.

Percebe-se que sistemas agroflorestais possuem particularidades que as destacam em comparação a agricultura convencional intensiva, se tratando principalmente da capacidade de inserir uma biodiversidade maior de espécies do que as monoculturas, permitindo que espécies arbóreas, muitas vezes nativas do próprio bioma, participem do plantio em meio a outras culturas. Outro ponto positivo já destacado é a sintonia com a dinâmica florestal em SAFs sucessionais, impedindo que o solo fique exposto por longos períodos graças à diferença de estágio das espécies na sucessão ecológica, um fator importante para a manutenção ambiental das veredas e turfeiras do Cerrado.

Além disso, a diminuição da pressão sobre a vegetação nativa, proporcionada pela adoção de SAFs, favorece o aumento do potencial regenerativo do bioma, tendo em vista que Souza (2018) destaca o incremento da biodiversidade e a regulação do microclima local, no qual o próprio sistema se torna abrigo para animais silvestres, estimulados pela maior estabilidade ecológica, o que contribui para o aumento da produtividade. Assim, a ciclagem de nutrientes torna-se suficiente para favorecer a fertilidade do solo e a recuperação de áreas degradadas nessas regiões.

A capacidade desses sistemas na retenção de CO_2 se transfigura em valor por meio da geração de créditos de carbono associada à sua própria estrutura funcional. Isso ocorre porque, de acordo a Cardoso et al. (2015), embora o total de carbono armazenado no solo seja proporcionalmente superior ao encontrado na biomassa aérea e radicular, a quantidade de carbono retida por espécies arbóreas é significativamente maior do que aquela observada em culturas agrícolas, significando que a implantação de SAFs contribui de forma expressiva para o aumento da capacidade de armazenamento de carbono.

Pela Lei nº 15.042, de 2024, as remoções de emissões podem ser convertidas em CRVEs dentro do mercado regulado de carbono, desde que obedeçam aos critérios estabelecidos por ela, como a comprovação e a verificação da redução das emissões. Nessa lógica, se um agricultor passar a adotar um manejo de cultivo baseado em sistemas florestais, especialmente no modelo de SAFs sucessionais, no qual a cobertura vegetal do solo se mantém durante quase todo o período anual, a captura de carbono promovida pelo sistema poderá ser tratada de forma semelhante, tornando-se um ativo dentro desse mercado a partir do princípio da remoção de carbono da atmosfera, ao mesmo tempo em que se preserva o ambiente as características ambientais do local. A venda desses ativos pode ser feita para empresas e indústrias que necessitem do crédito pela emissão acima da CBE, colaborando com a renda bruta final do respectivo agricultor.

No Cerrado, essa configuração torna-se ainda mais essencial nos tempos atuais, tendo em vista o constante avanço da agricultura intensiva sobre a ocupação do bioma. A consonância entre o cultivo agrícola e o equilíbrio ecossistêmico, aliada à manutenção da capacidade regenerativa do solo para a preservação do próprio ecossistema, constitui uma realidade desejável para que o bioma ainda seja capaz de manter suas características originais, mesmo diante do avanço do desenvolvimento agropecuário na sociedade. Corroborando as ideias de Souza (2018) e Beer et al. (2024), com o manejo adequado desses sistemas e a presença do adensamento de diversas espécies na cobertura vegetal do solo, observa-se a manutenção e a preservação das características ambientais e da capacidade de armazenamento nos solos do Cerrado. Além disso, quando utilizados com a participação de espécies nativas do bioma, esses sistemas mantêm, em certo nível, a biodiversidade original da região, especialmente no que se refere à prevalência da cobertura vegetal nos solos das veredas e nas zonas de turfeiras, áreas de elevada capacidade de retenção e armazenamento de carbono.

Em resumo geral, ao se beneficiar da capacidade natural do bioma de capturar dióxido de carbono da atmosfera e transformar essa capacidade em um ativo financeiro no mercado, a preservação dos recursos que lhe conferem tal capacidade surge como consequência. Dessa forma, os SAFs tornam-se um meio promissor de se inserir nessa prática sem necessariamente prejudicar o desenvolvimento socioeconômico no âmbito da agricultura. O interesse e a adesão dos agricultores mostram-se partes imprescindíveis para o sucesso da aplicação dessa metodologia, pois constituem o alicerce para a execução do sistema e figuram como beneficiários no SBCE.

Entretanto, de acordo ao o art. 1º, § 2º, da Lei nº 15.042, de 2024, “para os fins desta Lei, a produção primária agropecuária, bem como os bens, as benfeitorias e a infraestrutura no interior de imóveis rurais a ela diretamente associados, não são considerados atividades, fontes ou instalações reguladas e não se submetem a obrigações impostas no âmbito do SBCE.”. Ou seja, a lei considera que produtores rurais não estão sujeitos às obrigações de limitação e compensação de emissões dentro do sistema SBCE, mas também não limita a participação como agentes voluntários na geração e comercialização de créditos dentro do mercado voluntário.

Este detalhe é importante para incentivar a migração da agricultura convencional para sistemas agroflorestais mais sustentáveis, especialmente na agricultura familiar, na qual o agricultor teria maior apoio financeiro por meio da venda dos créditos de carbono por ele acumulados. Afinal, embora a lei não considere a produção primária agropecuária como atividade regulada e sujeita a obrigações no âmbito do SBCE, é discutível o papel dos setores agropecuários na questão das emissões de carbono, tendo em vista que a supressão vegetal para esses fins prejudica a captura de carbono em processos fotossintéticos, como citado por Souza (2018), bem como descaracteriza importantes ecossistemas de armazenamento de carbono em biomas como o Cerrado, contribuindo para as emissões globais.

Apesar da relevância dos SAFs nesse contexto, sua inserção no mercado de créditos de carbono ainda enfrenta desafios significativos para sua consolidação em larga escala. Entre esses entraves, destacam-se a limitação de apoio técnico na aplicação de metodologias de mensuração, relato e verificação aplicáveis ao setor agropecuário. Tal cenário pode ser compreendido à interpretação da Lei nº 15.042/2024, especialmente a partir da análise do art. 1º, § 2º, e do art. 30, § 2º, os quais indicam, respectivamente, que a produção agropecuária não integra o ramo de atividades reguladas pelo SBCE e que as obrigações previstas no sistema se aplicam apenas às atividades para as quais existam metodologias consolidadas de mensuração, relato e verificação, definidas pelo órgão gestor e ajustadas às especificidades de cada atividade.

Diante desse contexto, é perceptível que a inserção dos SAFs no mercado de créditos de carbono ainda apresenta fragilidades significativas e limitações quanto à sua implementação em larga escala. Não obstante, é importante reconhecer que os fundamentos conceituais que sustentam essa abordagem dispõem de sólido embasamento teórico, o que permite concebê-la como uma alternativa promissora para o avanço da sustentabilidade ambiental. Tal potencial manifesta-se de forma relevante nas interações entre o desenvolvimento agropecuário e a conservação de ecossistemas singulares e vulneráveis, como os do bioma Cerrado, interações estas mediadas e promovidas pelos próprios SAFs, ao articularem práticas produtivas com funções

ecológicas. Nesse sentido, se evidencia a necessidade de aprofundamento de investigações científicas que subsidiem o desenvolvimento técnico e metodológico capaz de superar as limitações existentes, favorecendo a ampliação e consolidação desses sistemas no âmbito do mercado de carbono.

Considerações Finais

Diante do exposto, conclui-se que o processo histórico de ocupação do Cerrado, impulsionado pela expansão e intensificação das atividades agropecuárias, têm desempenhado papel central na degradação do bioma e na redução de sua capacidade de armazenamento de carbono. A supressão da vegetação nativa, especialmente em áreas sensíveis como veredas e turfeiras, não apenas compromete a biodiversidade, mas também contribui diretamente para o aumento das emissões de carbono, evidenciando a relevância ambiental dessas formações na regulação climática.

Nesse contexto, as SAFs se apresentam como uma alternativa consistente para promover a integração entre produção agrícola e preservação ambiental. Os resultados analisados demonstram que esses sistemas possuem capacidade significativa de acúmulo de carbono, além de favorecerem a melhoria das propriedades do solo, o aumento da biodiversidade e a recuperação de áreas degradadas. Assim, os SAFs alinham-se a uma lógica produtiva mais sustentável, capaz de manter funções ecológicas essenciais do Cerrado.

Adicionalmente, a inserção dos SAFs no mercado de créditos de carbono surge como um mecanismo estratégico para valorização econômica dessas práticas, incentivando sua adoção, especialmente no sistema agropecuário brasileiro. No entanto, a efetiva consolidação dessa inserção ainda enfrenta desafios, como a limitação de metodologias específicas de mensuração, relato e verificação aplicáveis ao setor agropecuário, bem como lacunas institucionais no âmbito regulatório. Dessa forma, embora existam entraves à sua implementação em larga escala, os SAFs configuram uma alternativa promissora para o desenvolvimento sustentável no Cerrado. Sua efetividade se estabelecerá através do fortalecimento de políticas públicas, do avanço técnico-científico e da adesão dos produtores rurais, de modo a viabilizar a conciliação entre produtividade e sustentabilidade ambiental.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, nº 12.651, de 25 de maio de 2012, nº 6.385, de 7 de dezembro de 1976, e nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15042.htm. Acesso em: 28 abr. 2026.

BEER, F. et al. Peatlands in the Brazilian Cerrado: insights into knowledge, status and research needs. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 22, p. 260–269, 2024. DOI: 10.1016/j.pecon.2024.07.003.

FREITAS, R. E. MACIENTE, A. N. Culturas agrícolas líderes nas mesorregiões mais dinâmicas. *Radar da Tecnologia, Produção e Comércio Exterior*, v. 43, p. 63-74, 2016.

FROTA, A. V. B. et al. Bird dependence on wetlands determines functional responses to flood pulse in the Brazilian Pantanal. *Ornithology Research*, v. 30, n. 3, p. 190–203, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Biomas brasileiros*. Rio de Janeiro: IBGE, 2026a. Disponível em: https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomas-brasileiros.html. Acesso em: 26 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Síntese da descrição dos biomas brasileiros*. Rio de Janeiro: IBGE, 2026b. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/biomas/documentos/Sintese_Descricao_Biomas.pdf. Acesso em 09 abr. 2026

KALU, J. U. et al. Determinants of voluntary carbon disclosure in the property-liability insurance industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 272–279, 2023.

LÖSCH, S. et al. A pesquisa exploratória na abordagem qualitativa em educação. *Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação*, Araraquara, v. 18, n. 00, p. e023141, 2023. DOI: 10.21723/riaee.v18i00.17958.

MapBiomas. *Coleções MapBiomas*. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/. Acesso em: 3 maio 2026.

OCÁÑA-FERNÁNDEZ, Y.; FUSTER-GUILLÉN, D.. The bibliographical review as a research methodology. *Revista Tempos e Espaços em Educação,* v. 14, n. 33, e15614, 2021. Disponível em: https://www.redalyc.org/journal/5702/570272348038/. Acesso em: 29 abr. 2026

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL (SENAR). *Sistemas agroflorestais (SAFs)*: *conceitos e práticas para implantação no bioma amazônico*. 1. ed. Brasília: SENAR, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/informe-ao-cacauicultor/manejo/cartilhas-senar/199-sistemas-agroflorestais.pdf. Acesso em: 27 abr. 2026.

SILVA, E. C. et al. The importance of traditional communities in biodiversity conservation. *Biodiversity and Conservation*, v. 34, p. 685–714, 2024.
.

STÖCKER, C. M. et al. Estoques de carbono de um Argissolo sob sistema agroflorestal. *Cadernos de Agroecologia*, v. 13, n. 1, 2018. Disponível em: https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/1064. Acesso em: 28 abr. 2026.

WEICHERT, R. F. et al. Cerrado em destaque: o papel vital do Cerrado na biodiversidade do planeta. In: *ÁRVORES, plantas e frutos do Cerrado: aplicações e possibilidades*. Rio de Janeiro: Editora Científica Digital, 2024. v. 1. DOI: https://doi.org/10.37885/240315956.

WEICHERT, R. F. et al. *Árvores do Cerrado - Importância Econômica e Social na Educação Ambiental*. 1. ed. [s.l: s.n.]. v. 1, 2023.

WYNTER, V. et al. A global comparison of the biodiversity impacts of coffee agricultural systems—From monoculture to diverse agroforestry. *Agricultural Systems*, v. 229, e104449, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104449

IMPOSTOS DE CARBONO NA CONSTRUÇAO CIVIL; TRANSIÇÃO VERDE OPORTUNIZADA PELAS TAXAS DE CO2

1 Maria Heloísa dos Santos Oliveira, 2 Maria Luiza Resende Vasconcelo, 3 Joanderson Borges de Lima, 4 Soraya Giovanetti El-Deir

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: maria.heloisa@ufrpe.br 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: maria.resende@ufrpe.br, 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco e-mail: joanderson.lima@ufrpe.br Universidade Federal e-mail: sorayageldeir@gmail.com

Palavras-chave: Descarbonização; Emissão; Sustentabilidade

Resumo

Este artigo analisa a aplicação de impostos de carbono na construção civil como ferramenta para mitigar os impactos das mudanças climáticas, incentivando práticas mais sustentáveis no setor. O estudo aborda como esses impostos promovem a adoção de tecnologias limpas e eficiência energética, alinhando-se a acordos internacionais, como o Acordo de Paris. Por meio de uma revisão bibliográfica de publicações recentes, o artigo investiga a relação entre a política fiscal ambiental e o avanço para uma transição verde. Os resultados indicam que os impostos de carbono podem não apenas reduzir emissões, mas também criar oportunidades econômicas no setor, fomentando a inovação e a sustentabilidade. Contudo, é evidente os desafios para a aplicação desses impostos, como a resistência de construtoras. O estudo destaca que, apesar dos desafios, a aplicação de impostos de carbono pode reestruturar o setor em direção a uma economia de baixo carbono.

Introdução

A emissão de carbono está diretamente relacionada à dependência global de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, que são amplamente utilizados como fontes de energia (Piva, 2010, p. 9). Esses combustíveis são altamente eficientes, gerando grandes quantidades de energia a partir de volumes pequenos, o que os torna economicamente acessíveis, especialmente em regiões com reservas abundantes (Miranda, 2013). O consenso científico é claro ao afirmar que as tendências de aquecimento global ao longo do último século são em grande parte causadas pelas atividades humanas que aumentaram as emissões de CO2 e outros gases de efeito estufa (GEE) (Omolore, 2024).

Na construção civil, o uso de combustíveis fósseis é intenso, tanto na operação de máquinas quanto na produção de materiais como cimento e aço. Essas emissões são um dos principais motores do aquecimento global, contribuindo para as mudanças climáticas e seus impactos negativos, conforme relatado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Apesar de seu papel econômico e social, a construção civil é uma das áreas que mais emite carbono (Omolore, 2024).

Embora os combustíveis fósseis ainda sejam predominantes devido à sua eficiência e custo relativamente baixo, há um esforço crescente para reduzir a emissão de carbono, incluindo a adoção de fontes de energia renováveis, como solar, eólica e hidroelétrica. Apesar de fornecerem menor densidade energética e enfrentarem desafios de acessibilidade em algumas regiões, essas fontes oferecem soluções mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis. A transição para fontes limpas é essencial para combater os efeitos das mudanças climáticas e promover um equilíbrio entre a demanda energética global e a preservação ambiental (Lima, 2012). No caso dos impostos sobre carbono, um valor por unidade de poluição é determinado para que a soma das reduções de poluição de cada poluidor atinja o nível de controle desejado. Isso cria um mercado para a negociação desses direitos, resultando em preços de negociação para os mesmos (Motta, 2019).

Os impostos de carbono surgem como uma forma de mitigar as emissões e transformar o setor da construção, pois, ao atribuir custo às emissões, esses impostos incentivam as empresas a reduzirem seus custos, diminuindo a exploração do meio ambiente e a extração de recursos naturais de acordo com o Banco Nacional De desenvolvimento econômico e social (BNDES, 2022). Num mundo ideal, todos os países imporiam um imposto harmonizado sobre o carbono, para que as emissões em qualquer parte do mundo enfrentassem o mesmo preço (Bragagni, 2022). Dessa forma, os impostos promovem a adoção de tecnologias limpas e eficiência energética, e podem não apenas reduzir emissões, mas também criar oportunidades econômicas no setor, fomentando a inovação e a sustentabilidade.

Fundamentação teórica

A construção civil tem suas origens na pré-história, quando os recursos naturais eram os únicos disponíveis para a construção, e o impacto ambiental era limitado, devido à pequena escala das construções (Crutzen, 2002). Com o surgimento das primeiras civilizações, o uso de recursos aumentou, intensificando os efeitos ambientais, especialmente com a construção de pirâmides, zigurates e aquedutos. Na Idade Média, a exploração de recursos florestais aumentou com a construção de castelos e catedrais, mas o impacto ambiental era ainda restrito a áreas específicas. Esse cenário mudou com a Revolução Industrial, que trouxe máquinas a vapor e novos materiais, aumentando a extração de recursos e a poluição (Crutzen, 2002). Nos anos 1970, foi iniciada a conscientização ambiental, mas a construção civil ainda contribui significativamente para as mudanças climáticas, sendo um dos maiores responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) no mundo (Ya Wua *et al*., 2018). A evolução do setor reflete a transição das práticas tradicionais para soluções mais sustentáveis, com uma crescente conscientização sobre

sua contribuição para as mudanças climáticas (Ruth, Garcias, 2011). Avanços em materiais de baixo impacto, construções eficientes e políticas globais mostram um compromisso crescente em reduzir as emissões. A transição para uma construção civil mais sustentável é um desafio técnico e uma responsabilidade urgente para garantir um equilíbrio entre desenvolvimento e preservação ambiental (Rose *et al*., 2023).

Metodologia

A pesquisa tem caráter descritivo, tendo o referencial teórico elaborado por meio de pesquisas bibliográficas, utilizando-se de dados secundários como: artigos científicos e relatórios técnicos sobre tributação ambiental, normas e legislações relacionadas aos impostos de carbono, dados de instituições governamentais e organizações ambientais. A análise dos dados é realizada por meio de comparação entre diferentes políticas adotadas ao redor do mundo, destacando seus efeitos sobre o setor da construção civil. Além disso, a identificação das principais dificuldades enfrentadas pelas empresas do setor diante da tributação do carbono, como também das estratégias que podem ser adotadas para minimizar custos e reduzir emissões. A discussão abordará as implicações econômicas e ambientais da precificação do carbono e a viabilidade de sua implementação como instrumento regulador para a redução de impactos ambientais no setor da construção.

Estudo de Caso

O estudo de caso trabalhado se refere aos avanços da aplicação das taxas de carbono no Estado brasileiro. Pelo mercado de carbono ser um mecanismo muito novo, as ambições são grandes e idealizadas pelo governo, mas não se pode ignorar que as baixas das emissões de carbono são há muito tempo incentivadas pela legislação, mas nada definitivo foi imposto. Com a comodidade das empresas em usarem os mesmos métodos e práticas usuais, a influência para uma transição verde pode ser de alto custo e requerida uma alta logística para o cumprimento dessas modificações.

Destaca-se o estado de São Paulo como líder na indústria de construção civil (Carneiro,2024), podendo se ampliar a pesquisa no quanto esse setor tem emitido gases poluentes e quanto contribui para a taxa total do país. As emissões diretas de CO2 dos edifícios precisam ser reduzidas pela metade até 2030 para encaminhar o setor para a neutralidade climática até 2050.

Acordos Internacionais

Atualmente, com reuniões anuais organizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU), sendo a mais recente a COP 29 (2024), no Azerbaijão, é crucial alinhar ações globais contra a crise climática, garantir financiamento suficiente para países vulneráveis e promover uma transição verde para um futuro sustentável de acordo com a ONU. A Agenda 21 pode ser definida como um instrumento de planejamento para a construção de sociedades sustentáveis. Marco mundial para a introdução de debates globais sobre sustentabilidade, mudanças climáticas e estratégias para reduzir emissões de gases de efeito estufa, a A ECO-92, oficialmente chamada de Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), realizada no Rio de Janeiro em 1992, foi fundamental para criar o terreno político e ideológico que possibilitou a adoção de medidas como impostos de carbono em algumas nações e regiões ao longo das décadas seguintes. Apesar de não ter discutido diretamente os impostos de carbono, a Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento estabeleceu o Princípio 16, que introduziu o conceito de "poluidor-pagador"desempenhando um papel fundamental na base filosófica econômica dos impostos de carbono (ONU, 1992). É notório a preocupação com as mudanças climáticas e a variabilidade climática (ONU, 1992), essas preocupações, juntamente com a poluição do ar e a redução da camada de ozônio, criaram novas demandas por informações científicas, econômicas e sociais para reduzir as incertezas restantes nesses campos e melhor compreensão e previsão das várias propriedades da atmosfera e do ecossistemas afetados, bem como impactos na saúde e suas interações com fatores socioeconômicos. Os impostos de carbono foram desenvolvidos pelo Protocolo de Kyoto, em 1997, transformando o carbono em uma moeda de troca. O objetivo inicial era reduzir em 5,2% a emissão de poluentes entre 2008 e 2012, em comparação com os níveis de 1990 (UNFCCC, 1988). Além de estabelecer formas para a redução de gases, o Protocolo também incentiva a substituição de produtos derivados do petróleo por alternativas de menor impacto ambiental (Souza; Corazza, 2017). O Protocolo de Kyoto promove a cooperação internacional por meio de ações como a reformulação dos setores de energia e transportes, o uso de fontes renováveis, a eliminação de mecanismos financeiros inadequados, a limitação das emissões de metano e a proteção de florestas e sumidouros de carbono, com o objetivo de promover a transição verde (Gutierrez, 2009). A adoção de impostos sobre carbono na construção civil, como parte das políticas de mitigação climática, está alinhada com os princípios do Protocolo. Os países membros da ONU concordaram, no ano de 2000, em cumprir a chamada Declaração do Milênio, que seriam metas a que deveriam ser atingidas até 2015, e a sétima delas, Garantir a Sustentabilidade Ambiental, discutia sobre o meio ambiente em específico. Esse objetivo incentiva a integração de práticas sustentáveis na construção civil, promovendo o uso de materiais ecológicos, a eficiência energética e a redução de impactos ambientais. Essas metas foram outro alavancador para a discussão de estratégias de mitigação climática, incluindo precificação de carbono. Além disso, a dependência dos combustíveis fósseis inibe a concretização de muitos dos ODS, como os Objetivos 7, 11 e 15 (Shulla *et al.,* 2021). A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, incentiva a adoção de políticas e instrumentos econômicos, incluindo precificação de carbono, para alcançar seus objetivos. Alguns pontos dessa agenda implicam indiretamente a taxação do carbono como promovente da transição verde, como a ODS 13, que incentiva a ação contra a mudança global do clima, reconhecendo a necessidade de mecanismos financeiros, como impostos de carbono, para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) e financiar soluções climáticas (ONU). Já o Parágrafo 13 influencia os países a implementar o Acordo de Paris, que promove a precificação de carbono como uma ferramenta essencial para reduzir emissões. O Relatório Global de Desenvolvimento Sustentável 2022 avalia o progresso na implementação da Agenda 2030, analisando dados e indicadores dos 17 Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015). Ao financiar projetos ambientais, o Banco Mundial alinha suas operações com os acordos internacionais entre países, já que seus estatutos determinam que seus recursos sejam destinados a "fins produtivos". O papel do banco é estimular soluções para o desenvolvimento econômico e auxiliar países em desenvolvimento, com foco em alocação de recursos em escala global (Polido, 2017). Essas ações reforçam o compromisso global com a redução das emissões de carbono e outros desafios ambientais. No contexto da construção civil, as operações do Banco Mundial são essenciais para alinhar o crescimento econômico com a preservação ambiental, abordando questões como a destruição de hábitats naturais, degradação do solo, exaustão dos recursos hídricos, poluição e degradação ambiental. Estes tópicos devem receber maior atenção tanto do Banco quanto dos países membros, especialmente os tomadores de empréstimos (Vilarinho, p. 39, 1992).

Principios das Legislações Ambientais

Os princípios gerais do Direito visam preencher a lacuna entre as regras jurídicas e a realidade prática, aproximando políticas públicas e a legislação ambiental brasileira (Garcia, 2015). Esses princípios são essenciais para a formulação, interpretação e aplicação das normas de proteção ambiental e para alcançar a descarbonização (Laclima, 2022). Eles garantem o equilíbrio ecológico e o desenvolvimento sustentável, orientando políticas públicas, regulamentações e decisões judiciais. O Princípio da Vedação ao Retrocesso Ambiental impede que os avanços na preservação ambiental sejam revertidos (Fujiki; Noronha, 2020). A redução das emissões de carbono é uma política progressiva que evita esse retrocesso, ao promover ações ambientais constantes. O Princípio do Desenvolvimento Sustentável busca equilibrar progresso econômico, social e ambiental, e os impostos de carbono alinham-se a esse objetivo ao internalizar os custos ambientais e incentivar tecnologias verdes (ONU, 1978). O Princípio do Ambiente Ecologicamente Equilibrado reconhece a preservação do meio ambiente como um direito fundamental, e os impostos de carbono visam proteger os ecossistemas e reduzir a degradação ambiental (Brasil, 1988). O Princípio da Precaução prioriza a proteção ambiental diante da incerteza e aplica-se ao aumentar os custos das atividades poluentes, estimulando a adoção de energias renováveis (Trennepohl, 2020). O Princípio da Prevenção busca evitar danos ambientais e está presente nas políticas públicas, com os impostos de carbono incentivando o uso de tecnologias limpas (Farias, 2006). O Princípio Pagador responsabiliza o poluidor e permite que os recursos dos impostos de carbono financiem projetos ambientais e compensações (Farias, 2006). O Princípio da Reparação obriga a compensação dos danos ambientais, e a construção civil, ao integrar esse princípio e os impostos de carbono, pode contribuir para um modelo sustentável (Costa; Pinheiro; Ferreira, 2021). Desde sua criação, as taxas de carbono são ferramentas globais para a transição verde, conforme a Declaração de Estocolmo (1972), que destaca a cooperação internacional para resolver questões ambientais globais (ONU, 1972). Por fim, o Princípio da Reserva Legal garante que a criação de tributos, como os impostos de carbono, deve ser feita por meio de lei aprovada pelo Legislativo, asegurando a segurança jurídica (Brasil, 1988). A Política Nacional do Meio Ambiente, PNMA, foi determinada segundo a Lei n. 6938 (Brasil, 1981), sendo definida como constituinte do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA e instituidora do Cadastro de Defesa Ambiental. São diversos os instrumentos da PNMA e, entre os relacionados ao tema dos impostos de carbono, destaca-se o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental, a avaliação de impactos ambientais, e as penalidades disciplinares ou compensatórias ao não cumprimento das medidas necessárias à preservação ou correção da degradação ambiental, todos encontrados no artigo 9º desta lei. (Brasil, 1981) No artigo 4º, ainda da Lei n° 6923 (Brasil, 1981), são definidos os objetivos dessa política, que tratam da compatibilização do desenvolvimento com a preservação ambiental, estabelecendo critérios e normas para o uso dos recursos naturais. Destaca- se também a importância da pesquisa e difusão de tecnologias sustentáveis, a conscientização pública, a preservação e restauração ambiental, além da responsabilização de poluidores e usuários de recursos naturais. Todos esses objetivos estão alinhados com a premissa de limitar e diminuir a emissão do carbono na indústria da construção, uma vez que se relaciona com a preservação da qualidade ambiental e manutenção do equilíbrio ecológico.

Os órgãos responsáveis pela execução da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) integram o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) (Brasil, 1981). O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define normas, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) fiscaliza e licencia atividades, e o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) administra unidades de conservação federais. Além disso, órgãos estaduais e municipais implementam e fiscalizam as políticas ambientais, garantindo a sustentabilidade. A construção civil é um dos setores que mais impactam o meio ambiente como visto anteriormente no artigo. Diante desse cenário, diversas políticas públicas e normativas ambientais foram implementadas no Brasil com o intuito de mitigar os impactos e garantir práticas mais sustentáveis

A construção civil é um dos setores que mais impactam o meio ambiente como visto anteriormente no artigo. Diante desse cenário, diversas políticas públicas e normativas ambientais foram implementadas no Brasil com o intuito de mitigar os impactos e garantir práticas mais sustentáveis Resolução CONAMA 001/1986 Essa resolução é voltada para a implantação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. No Art. 1° da resolução, é definido o Impacto Ambiental como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, sendo resultantes das atividades humanas (Brasil, 1986). Apesar de não ser citado de forma direta, as emissões de carbono consequentes da construção civil afetam de forma direta o ambiente e, a partir da resolução, se tornou necessário o estudo de impacto ambiental desse problema, sendo submetido à aprovação por um órgão estadual competente. O estudo de impacto ambiental envolve, entre as atividades técnicas, o diagnóstico ambiental da área influenciada pelo projeto, previsão da magnitude e alternativas dos prováveis impactos relevantes e um programa de monitoramento. Essas etapas se mostram importantes para o controle e acompanhamento das diversas áreas que uma construção pode chegar a afetar, desde o seu planejamento financeiro até a influência e incidência dos impactos ambientais. Já o Art. 9°, dessa mesma resolução, define que o estudo de impacto

ambiental deve conter a descrição e especificação de cada componente do projeto, especificando as fases de construção e operação, matéria prima e fontes de energia (Brasil, 1986). Essas medidas têm o objetivo de dar clareza à operação e, desde o seu princípio, ter uma descrição do efeito esperado. Também pode ser destacado que a resolução determina ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, IBAMA, um caráter supletivo na obtenção de licenças de atividades modificadoras do meio ambiente (Brasil, 1986). A Lei Complementar 140 de 8 de dezembro de 2011, fixa normas para a proteção do meio ambiente com o objetivo de desenvolver uma gestão ambiental equilibrada e harmônica em todo o território. O documento destaca a ação de cooperação entre os órgãos do governo para alcançar o desenvolvimento sustentável, cumprindo e promovendo a Política Nacional do Meio Ambiente, e a importância das licenças ambientais nas atividades e empreendimentos. No Art. 7° do documento, é afirmado a necessidade de regular a produção, venda e uso de técnicas e substâncias que possam representar risco à vida, à qualidade de vida e ao meio ambiente, ligando indiretamente ao problema das emissões (Brasil, 2011). Ademais, citam-se algumas das atribuições de ações administrativas dos Estados, como por exemplo a preservação, com a colaboração dos órgãos municipais competentes, do Sistema Estadual de Informações sobre Meio Ambiente, que contém importantes informações sobre as taxas de contaminação e poluição dos estados, e promover o licenciamento ambiental de atividades ou empreendimentos utilizadores de recursos ambientais, efetiva ou potencialmente poluidores ou capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental (Brasil, 2011). Além dessas atribuições, são ressaltadas ações dos Municípios e do Distrito Federal que visam a proteção ambiental. Resolução CONAMA 237/1997 o Conselho Nacional do Meio Ambiente considerou necessário a atualização e revisão no sistema de licenciamento ambiental, trazendo o documento Resolução CONAMA n° 237, de 19 de dezembro de 1997. Na nova resolução desse documento, foram adicionados aspectos como as diferentes modalidades de licenças, as etapas para a obtenção desse documento, e ainda a atualização das atividades sujeitas ao licenciamento ambiental, incluindo obras civis. É ressaltada a necessidade de se integrar a atuação dos órgãos competentes do Sistema Nacional de Meio Ambiente - SISNAMA na execução da Política Nacional do Meio Ambiente. Além disso, segundo o Art. 9° da resolução, o CONAMA definirá, quando necessário, licenças ambientais específicas, observadas a natureza, características e peculiaridades da atividade ou empreendimento e, ainda, a compatibilização do processo de licenciamento com as etapas de planejamento, implantação e operação (Brasil, 1997). Outro ponto relevante é que essa resolução estabelece a competência dos órgãos ambientais estaduais e municipais no processo de licenciamento, permitindo que diferentes esferas do governo adotem políticas tributárias específicas, como incentivos fiscais para construções sustentáveis ou taxação diferenciada conforme a pegada de carbono do empreendimento (Brasil, 1997)

Conclusão

Os impostos de carbono na construção civil são uma ferramenta importante para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e incentivar práticas mais sustentáveis. Com base na análise feita, percebe-se que essa tributação tem o potencial de estimular o uso de materiais e tecnologias mais eficientes, contribuindo para a preservação ambiental e uma transição verde.

No entanto, apesar de seu potencial positivo, a aplicação desses impostos também impõe desafios, especialmente no que diz respeito ao aumento dos custos para as empresas. Isso evidencia a necessidade de políticas complementares, como incentivos fiscais e subsídios para inovação sustentável, garantindo uma transição viável e justa para todos os envolvidos. Foi analisado ao longo do artigo que essa abordagem está alinhada com os acordos internacionais como por exemplo o Acordo de Paris (2015), que estabelece compromissos globais para a redução das mudanças climáticas, e o Protocolo de Kyoto (1997), que introduziu mecanismos de controle das emissões. Com base na análise realizada, percebe-se que a tributação do carbono pode estimular o uso de materiais e tecnologias mais eficientes, e que sua eficácia depende de uma fiscalização rigorosa e de políticas públicas que promovam a transição para a construção sustentável. Dessa forma, embora ajustes sejam necessários, os impostos sobre carbono podem ser um mecanismo eficaz para alinhar o setor da construção civil às metas globais de sustentabilidade, contribuindo para a preservação ambiental e o combate às mudanças climáticas. Para o futuro, é fundamental que as políticas públicas se alinhem com as inovações tecnológicas e as necessidades emergentes do setor, incentivando a redução das emissões e promovendo a construção civil como um pilar para um desenvolvimento sustentável global

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo apoio institucional, aos organizadores do V Congresso Internacional de Engenharia Ambiental pela oportunidade de divulgação e compartilhamento do conhecimento científico, e, de forma especial, à professora Soraya Giovanetti El-Deir, pela condução da disciplina de Instrumentos Legais Ambientais, na qual foi possível a elaboração deste artigo.

Referências

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Mecanismos de precificação de carbono no Brasil. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22625/1/PRCap215708_Mecanismos%20de%20precifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20carbono%20no%20Brasil.pdf. Acesso em: 18 fev. 2025.

BRAGAGNI, Maurizio et al. Sustainable development and the need to reform the carbon tax. Journal of Public Affairs, v. 22, p. e2787, 2022.https://doi.org/10.1002/pa.2787

BRASIL. Lei n° 237. Resolução CONAMA, 19 de dezembro de 1997.

CRUTZEN, P. J. Geology of mankind. Nature, v. 415, п. 6867, p. 23, 2002.

CUNHA, Dênis Antônio; SOARES, Thiago Costa. Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil Greenhouse gases emissions and Brazilian environmental efficiency, Agosto 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-6351/3795

DE AGUIAR, Wander Matos; ÍTAVO, Luis Carlos Vinhas. A TRAGÉDIA DOS COMUNS E SUA INFLUÊNCIA PARA A SUSTENTABILIDADE. ANAIS DO ENIC, *[S. l.]*, n. 6, 2015.
Disponível em: https://anaisonline.uems.br/index.php/enic/article/view/2231. Acesso em: 13 mar. 2025.

EL-DEIR, Soraya Giovanetti; TORRES, Brenda Maroja; ANGELO, Gabriel Fernandes. (Org.). Instrumentos Legais Ambientais e Agenda 2030. 1ª ed. Recife: EDUFRPE, 2022. 177 p.

FARIAS, Talden Queiroz. Princípios gerais do direito ambiental, Dezembro 2006. DOI: https://selvaflorestal.com/impacto-dos-creditos-de-carbono-na-agenda-2030/ https://ambitojuridico.com.br/principios-gerais-do-direito-ambiental/

FREITAS, Danielli Xavier. Os princípios do Direito Ambiental, 2014. DOI:https://www.jusbrasil.com.br/artigos/os-principios-do-direito-ambiental/138912752

GUARDIA, Eduardo Refinetti. Plano de Logística Sustentável. 2ª ed. Brasília 2018. 26 p.

Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co. Como a aplicação de IA resolveria o problema das emissões de carbono pela construção civil? Deepseek versão de 15 de mar. de 2025. Inteligência artificial. Disponível em: https://chat.deepseek.com/. Acesso em: 15 de mar. de 2025

Hugor Pacheco. Crimes ambientais: tipificação e penalidades no Brasil. JusBrasil, 2025. Disponível em: https:// www.jusbrasil.com.br/artigos/crimes-ambientais-tipificacao-e-penalidades-no-brasil/3216548904. Acesso em: 22 mar. 2025.

LACLIMA,2022. Propostas para superar os desafios jurídicos da descarbonização no Brasil até 2030. São Paulo, Brasil. https://laclima.org/wp-content/uploads/2022/11/LACLIMA_propostas_para_supera r_os_desafios_da_descarbonizacao_Brasil_2030.pdf

LEITE, Carla Vladiane Alves; NETO, José Querino Tavares. Os Povos Tradicionais e o Mito do Crescimento Econômico em Harmonia com Desenvolvimento Sustentável: Uma Crítica à Luz da Doutrina Protecionista do Meio Ambiente. Conpedi Law Review, Florianopolis, Brasil, v. 1, n. 12, p. 203–217, 2016. DOI: 10.26668/2448-3931_conpedilawreview/2015.v1i12.3494. Disponível em: https://www.indexlaw.org/index.php/conpedireview/article/view/3494. Acesso em: 12 mar. 2025.

Motta, R. S. (2019). Chapter 14: Carbon pricing: from the Kyoto Protocol to the Paris Agreement. In: Frangetto, F. W.; Veiga, A. P. B.; Luedemann, G. (2019). Legacy of the CDM: lessons learned and impacts from the Clean Development Mechanism in Brazil as insights for new mechanisms. Brasília: IPEA. Disponível em: . Acesso em: 26/05/2021.

Nações Unidas. Adoção do Acordo de Paris. 2015. Disponível em: . Acesso em: nov. 2015.

NAÇÕES UNIDAS. United Nations Conference on the Human Environment, 5-16 June 1972, Stockholm. Disponível em:https://www.un.org/en/conferences/. Acesso em: 14 mar. 2025.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Agenda 21. 1992b.
Disponível em:
http://www.un-documents.net/agenda21.htm. Acesso em: 11 dez. 2024.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. 1992. Disponível em: https://undocs.org/es/A/CONF.151/26/Rev.1(vol.I) . Acesso em: 11 dez. 2024.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Declaração da Conferência Mundial de Meio Ambiente da ONU. 1972. Disponível em: https://undocs.org/en/A/CONF.48/14/Rev.1 Acesso em: 11 de dez. 2024.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda. Acesso em: 11 dez. 2024.

OMOLORE, Mitota. Explainer: What Is a Carbon Tax, Pros and Cons, and Implementation Around the World, v. 19, Dezembro 2024. DOI:
https://earth.org/explainer-what-is-a-carbon-tax-pros-and-cons-and-implementation-around-th e-world/

PIVA, Rodrigo Barcellos piva.PIVA,Economia Ambiental Sustentável: OS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E AS ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS , 2010. Disponível em:
https://www.lume.ufrgs.br/.

POLIDO, Fabrício Bertini Pasquot. Responsabilidade de Estados e Organizações Internacionais em Operações de Financiamento de Projetos Governamentais: Um Olhar Crítico Sobre as Salvaguardas Socioambientais. Revista da Faculdade de Direito da UERJ, n. 32, p. 54-79, dez. 2017

ROTH, Caroline das Graças; GARCIAS, Carlos Mello. Construção Civil e a Degradação Ambiental. Desenvolvimento em Questão, [S. l.], v. 7, n. 13, p. 111–128, 2011. DOI: 10.21527/2237-6453.2009.13.111-128. Acesso em: 13 mar. 2025.

MIRANDA, Paulo Emílio V. de. Combustíveis – materiais essenciais para prover energia à nossa sociedade. Revista Matéria, v. 18, n. 3, 2013. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/W4XmgshKgv6kvbXYWKkMBwK/?format=pdf. Acesso em: 18 fev. 2025.

SHULLA, Kalterina; VOIGT, Bernd-Friedrich; CIBIAN, Stefan; SCANDONE, Giuseppe; MARTINEZ, Edna; NELKOVSKI, Filip; SALEHI, Pourya. COVID-19 on the Sustainable Development Goals (SDGs). Volume 2, artigo 15, 2021. https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-021-00026-x

SOCIAÇÃO BRASILEIRA DO PACTO GLOBAL DA ONU. Justiça climática para o setor de construção civil: responsabilidade das empresas do setor na transição energética justa.
Contexto e recomendações. São Paulo, 2023. Disponível em: Acesso em https://hdl.handle.net/10438/35426: 13 mar. 2025.

SOUZA, M. C. O.; CORAZZA, R. I. Do protocolo de kyoto ao acordo de paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução dos perfis de emissões de gases de efeito estufa. Desenvolvimento e meio ambiente, v. 42, p.52-80, dezembro 2017.

SUMMARY OF GLOBAL CLIMATE ACTION AT COP 29. 2024. Disponível
em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Summary_Global_Climate_Action_at_ COP_29.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

Tsai, Wen-Hsien. 2020. "Carbon Emission Reduction—Carbon Tax, Carbon Trading, and Carbon Offset" *Energies* 13, no. 22: 6128. https://doi.org/10.3390/en13226128

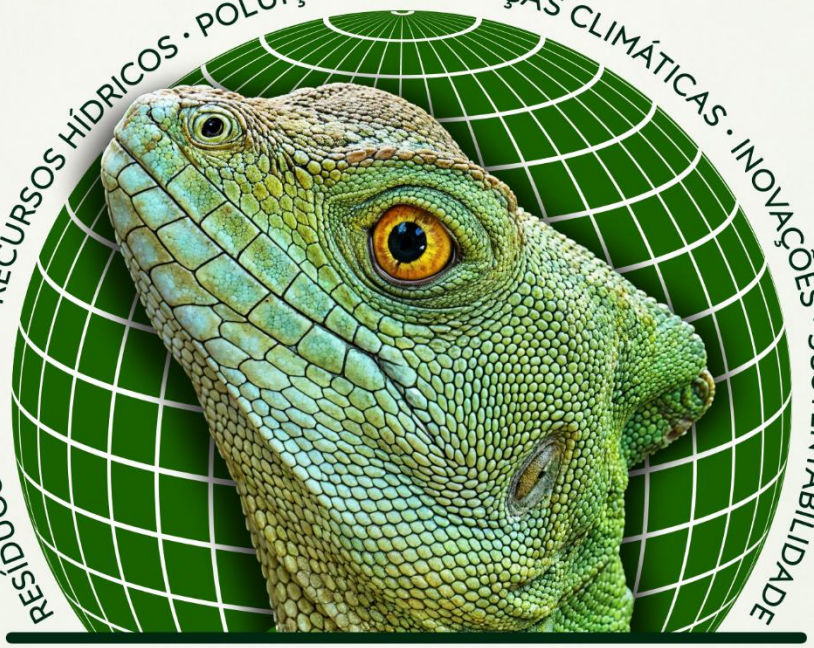
TORRES, Brenda Maroja; ANGELO, Gabriel Fernandes. Eventos Ambientais como norteadores de Acordos Internacionais Ambientais. IN: EL-DEIR, Soraya Giovanetti; TORRES, Brenda Maroja; ANGELO, Gabriel Fernandes. (Org.). Instrumentos Legais Ambientais e Agenda 2030. 1ª ed. Recife: EDUFRPE, 2022. p. 10 - 18.

VILARINHO, Carlyle R. O. O Brasil e o Banco Mundial diante da questão ambiental. Perspectivas, São Paulo, v. 15, p. 33-53, 1992.

Ya Wua,b, K.W. Chaub , Weisheng Lub , Liyin Shena , Chenyang Shuaic , Jindao Chend Decoupling relationship between economic output and carbon emission in the Chinese construction industryv. 71, p. 60-69, 2018. Acesso em: 13 mar. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.001

ÁREA TEMÁTICA 6

ECONOMIA CIRCULAR E BIOECONOMIA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

BONSAIS QUE SALVAM VIDAS: EMPREENDEDORISMO SOCIOAMBIENTAL NO TERCEIRO SETOR

1 Rafael Henrique Mainardes Ferreira, 2 Ellen Joana Nunes Santos Cunha, 3 Lucia Helena Alencastro, 4 Cinthia Maria de Sena Abrahão

1 UFPR Litoral, e-mail: ferreirarafael@ufpr.br; 2 UFPR Litoral, e-mail: ellen.joana@ufpr.br; 3 UFPR Litoral, e-mail: luciah@ufpr.br; 4 UFPR Litoral, e-mail: cinthiaabrahao@ufpr.br

Palavras-chave: Sustentabilidade; terceiro setor; bonsai; economia circular.

Resumo

Este artigo apresenta os resultados de uma pesquisa exploratória realizada em uma organização do Terceiro Setor localizada no litoral do Paraná, dedicada à acolhida, reabilitação e reinserção social de pessoas em situação de vulnerabilidade, incluindo ex-dependentes químicos. A iniciativa analisada utiliza práticas de gestão ambiental e de economia circular por meio da produção artesanal de bonsais confeccionados com resíduos naturais recolhidos no mar e nas praias da região. O estudo busca compreender como essa atividade socioambiental contribui simultaneamente para a sustentabilidade ecológica e para a autonomia dos participantes envolvidos no processo de reabilitação. A metodologia adotada baseou-se em estudo de caso, com uso de entrevistas semiestruturadas e registro fotográfico das etapas produtivas. Os resultados indicam que a coleta de resíduos e sua transformação em peças decorativas de valor agregado fortalecem ações de educação ambiental, promovem pertencimento e geram oportunidades de aprendizagem e renda para os acolhidos. Além disso, evidencia-se que a prática funciona como estratégia de inclusão produtiva e desenvolvimento de competências, alinhando princípios de empreendedorismo solidário e gestão sustentável. O estudo contribui para o debate sobre inovação social no Terceiro Setor, destacando o potencial de iniciativas ecológicas como instrumentos de ressocialização e de impacto socioambiental positivo.

Introdução

Organizações do Terceiro Setor têm desempenhado papel central na mitigação de desigualdades e na criação de alternativas sustentáveis de desenvolvimento, sobretudo em territórios marcados por vulnerabilidades sociais. Nessas instituições, práticas de gestão que articulam acolhimento, formação profissional, empreendedorismo solidário e sustentabilidade ambiental tornam-se fundamentais para promover processos de autonomia e reinserção social (Singer, 2002; Tello-Gamarra & Verschoore, 2015). Inserida nesse contexto, a organização analisada neste estudo, localizada no litoral do Paraná, dedica-se ao acolhimento e à reabilitação de pessoas em situação de vulnerabilidade, incluindo ex-dependentes químicos, por meio de estratégias que combinam cuidado terapêutico, reconstrução de vínculos e desenvolvimento de competências produtivas.

A economia circular, proposta como alternativa ao modelo linear de produção, enfatiza a reutilização de materiais, a redução de resíduos e a regeneração de ciclos produtivos (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Esse paradigma tem sido amplamente discutido em políticas públicas, práticas industriais e iniciativas comunitárias voltadas à sustentabilidade. Estudos destacam que o reaproveitamento de resíduos sólidos pode desempenhar função educativa, ambiental e socioeconômica ao estimular valores de responsabilidade compartilhada e oferecer oportunidades de capacitação e geração de renda (Murray, Skene & Haynes, 2017).

Entre as atividades desenvolvidas, destaca-se a produção artesanal de bonsais confeccionados a partir de resíduos recolhidos nas praias e de materiais provenientes do descarte de equipamentos eletrônicos. Além de promover a educação ambiental e o reaproveitamento de recursos naturais, essa prática integra dimensões pedagógicas, terapêuticas e econômicas, permitindo que os participantes reconstruam sua autoestima, desenvolvam habilidades manuais e vislumbrem novas possibilidades de vida.

Nesse sentido, emerge o problema de pesquisa que orienta este trabalho: compreender de que maneira a produção artesanal de bonsais, fundamentada no reaproveitamento de resíduos costeiros, pode contribuir simultaneamente para a reinserção social dos acolhidos e para a promoção da sustentabilidade ambiental no âmbito de uma organização do Terceiro Setor.

Diante dessa questão, o objetivo do estudo consiste em analisar o processo produtivo dos bonsais desenvolvidos pela instituição, identificando como essa atividade integra economia circular, gestão ambiental e inclusão social em uma perspectiva de empreendedorismo solidário.

Embora o caráter qualitativo e exploratório da pesquisa não permita generalizações amplas, parte-se da hipótese de que a atividade de confecção dos bonsais funciona como um mecanismo de transformação para os participantes, ao promover o desenvolvimento de competências, a valorização da autonomia e a reconfiguração de trajetórias pessoais afetadas pela exclusão social. Assim, ao investigar essa experiência, busca-se evidenciar como iniciativas socioambientais podem constituir modelos inovadores de desenvolvimento humano e sustentabilidade no Terceiro Setor.

Material e Métodos

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, descritiva e de campo, estruturada a partir de um estudo de caso. A abordagem qualitativa foi adotada por permitir a compreensão aprofundada de fenômenos sociais em seu contexto natural, enfatizando significados, percepções e dinâmicas subjetivas (Minayo, 2012). A pesquisa descritiva, segundo Gil (2019), possibilita retratar com precisão as características de um fenômeno, sem a pretensão de manipulá-lo, contribuindo para delinear

práticas, processos e comportamentos observados no ambiente estudado. A opção pela pesquisa de campo está fundamentada em Lakatos e Marconi (2017), que definem esse tipo de investigação como aquela realizada diretamente no local onde o fenômeno ocorre, permitindo contato direto com os participantes e com as práticas observadas. Por sua vez, o estudo de caso, conforme Yin (2015), é apropriado quando se busca examinar um objeto contemporâneo em profundidade, considerando múltiplas fontes de evidência e a complexidade das interações que o compõem.

O trabalho empírico desenvolveu-se ao longo de aproximadamente um mês, combinando atividades in loco e acompanhamento remoto. Inicialmente, foram realizadas visitas presenciais à organização, com o objetivo de observar o ambiente, compreender o funcionamento das oficinas produtivas e registrar etapas do processo de confecção dos bonsais. Nessas visitas, foi realizada uma conversa aberta com o responsável pela atividade artesanal, que desempenha simultaneamente o papel de gestor e produtor. Essa interação permitiu compreender sua trajetória, as práticas de produção, as rotinas de trabalho e os sentidos atribuídos à atividade. A coleta de dados também incluiu observação direta dos espaços, materiais utilizados, fluxos produtivos e instrumentos empregados na manipulação dos resíduos.

O acompanhamento remoto ocorreu paralelamente às visitas presenciais, por meio de aplicativos de comunicação, reuniões virtuais e troca contínua de informações enviadas pelo gestor por e-mail e pelas redes sociais oficiais da organização. Esse fluxo multimodal de dados possibilitou registrar imagens, textos explicativos, vídeos demonstrativos e atualizações sobre a produção dos bonsais, o que enriqueceu o corpus de análise e permitiu triangulação de informações, conforme recomendado por Creswell (2014) em pesquisas qualitativas.

A abertura ao campo foi viabilizada graças às parcerias institucionais estabelecidas entre o gestor da organização e a Universidade Federal do Paraná – Setor Litoral. Essa articulação ampliou as possibilidades de convivência, observação e diálogo, fortalecendo um ambiente de confiança essencial para o desenvolvimento da pesquisa social. Tais parcerias refletem o compromisso extensionista da universidade em aproximar pesquisadores de diferentes modelos organizacionais que operam em contextos de vulnerabilidade e que demandam práticas inovadoras de empreendedorismo, sustentabilidade e gestão social.

A análise dos dados coletados seguiu procedimentos típicos da pesquisa qualitativa: leitura exploratória, organização do material, sistematização de categorias temáticas e interpretação orientada pela literatura (Bardin, 2011). As evidências foram examinadas de modo a identificar padrões, sentidos e relações entre práticas ambientais, produtivas e sociais, possibilitando compreender a complexidade da atividade artesanal e seus desdobramentos socioterritoriais.

Além disso, a seleção do caso investigado ocorreu por critério intencional, considerando sua singularidade no contexto regional e sua articulação simultânea entre práticas socioambientais e reinserção social. Trata-se de um caso revelador, nos termos de Yin (2015), por possibilitar a observação de fenômenos que dificilmente seriam acessados por meio de abordagens quantitativas ou levantamentos amplos.

O recorte temporal da investigação — aproximadamente um mês de acompanhamento — foi definido a partir da necessidade de observar o ciclo produtivo completo dos bonsais, desde a coleta dos resíduos até a finalização das peças, permitindo a compreensão integral das etapas e das interações envolvidas. Ainda que limitado em termos de duração, o período mostrou-se suficiente para identificar padrões recorrentes nas práticas produtivas e nas dinâmicas sociais observadas.

Quanto aos critérios de validade e confiabilidade, buscou-se realizar triangulação de fontes (observação direta, registros fotográficos, conversas presenciais e acompanhamento remoto), conforme recomendado por Yin (2015) e Creswell (2014), fortalecendo a consistência interpretativa dos dados. A análise de conteúdo seguiu etapas de pré-análise, exploração do material e tratamento interpretativo (Bardin, 2011), permitindo a construção de categorias analíticas relacionadas a três eixos principais: (i) práticas de economia circular; (ii) processos de aprendizagem e desenvolvimento de competências; e (iii) dimensões de inclusão social e ressignificação do trabalho.

Reconhece-se como limitação metodológica o fato de tratar-se de um único estudo de caso, o que restringe possibilidades de generalização estatística. Entretanto, conforme argumenta Yin (2015), estudos de caso buscam generalização analítica, isto é, a ampliação da compreensão teórica sobre fenômenos similares, e não a extrapolação numérica de resultados.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos a partir das observações de campo, das conversas com o produtor/artesão e da análise dos materiais enviados pela organização revelam a articulação entre práticas socioambientais, processos de aprendizagem e mecanismos de inclusão produtiva. As evidências permitem compreender como o reaproveitamento de resíduos, a estruturação das etapas produtivas e a dinâmica relacional da organização contribuem para a construção de autonomia, pertencimento e desenvolvimento de competências.

A discussão, sustentada pelo referencial teórico, permite relacionar esses achados aos debates sobre economia circular, empreendedorismo solidário e ressignificação do trabalho em contextos de vulnerabilidade.

A análise do ambiente produtivo e das oficinas observadas permitiu identificar um processo artesanal estruturado em três dimensões: coleta e seleção de materiais, preparação e tratamento dos resíduos, e montagem final das peças. Os materiais utilizados incluem fragmentos de madeira recolhidos nas praias, restos de embarcações abandonadas, lascas trazidas pelo mar e fios de cobre oriundos do descarte de equipamentos eletrônicos. Essa dinâmica confirma a integração de princípios da economia circular, conforme apontado pela literatura (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Murray, Skene & Haynes, 2017), ao transformar resíduos em insumos produtivos e reincorporá-los em novos ciclos de valor.

A coleta dos materiais, realizada pelos participantes e pela própria organização, opera tanto como ação ambiental quanto como atividade educativa. Os indivíduos envolvidos passam a reconhecer o valor de elementos antes considerados lixo, o que

reforça a lógica da reutilização e amplia o entendimento sobre impactos ambientais, aspecto também discutido por Jacobi (2003) em práticas de educação ambiental comunitária.

A etapa de preparação dos resíduos, que inclui limpeza, lixamento, aplicação de proteção e molde inicial das peças, funciona como momento de aprendizagem técnica. Durante as conversas com o artesão, observou-se que esse processo é explicado de modo detalhado aos participantes, que aprendem por imitação, prática e orientação individualizada. Trata-se de uma pedagogia do fazer, alinhada à noção de aprendizagem significativa em ambientes artesanais e colaborativos.



Figura 01: Bonsais produzidos pela organização.
Fonte: Dados da pesquisa (2026)

Por fim, a montagem dos bonsais, etapa que envolve criatividade, paciência e precisão, representa a culminância do processo. O trabalho manual, nesse estágio, não possui apenas função estética; ele integra dimensões simbólicas de reconstrução. Assim como os materiais reaproveitados são reorganizados e ressignificados, os próprios participantes experimentam um processo de reorganização subjetiva, conceito amplamente discutido em estudos sobre o trabalho como dispositivo terapêutico (Dagnino, 2004; Cattani & Gaiger, 2010).

A observação das interações, bem como os relatos fornecidos pelo gestor/artesão, evidencia que a atividade artesanal cumpre papel significativo nos processos de inclusão social e reinserção produtiva dos participantes. A literatura sobre empreendedorismo solidário (Singer, 2002; Gaiger, 2011) sustenta que práticas baseadas na cooperação, no aprendizado coletivo e na valorização do trabalho humano contribuem para a construção de autonomia e fortalecimento de vínculos comunitários — fenômenos claramente observados durante o período de pesquisa.

Primeiramente, notou-se que o processo produtivo promove autonomia ao estruturar rotinas, responsabilidades e metas compartilhadas. Ao assumirem tarefas como seleção de materiais, montagem de peças e organização do ambiente, os participantes vivenciam experiências de corresponsabilidade. Esse aspecto dialoga com Tenório (2006), que aponta a gestão participativa como elemento central da inclusão social.

Em segundo lugar, a atividade artesanal funciona como mecanismo de fortalecimento da autoestima. Nas conversas registradas, o artesão relatou casos em que participantes verbalizaram orgulho ao ver o produto final ou ao receber reconhecimento externo. A construção de um objeto esteticamente valorizado reforça a percepção de competência, alinhando-se à literatura sobre empoderamento em contextos vulneráveis (Sen, 2000; Laville, 2009).

Além disso, a atividade amplia oportunidades de geração de renda, seja pela comercialização das peças, seja pela participação em feiras e eventos. Essa dimensão se aproxima dos princípios do empreendedorismo comunitário, que busca integrar produção, identidade local e engajamento social (Singer, 2002). A organização, ao permitir que os participantes se envolvam em todas as etapas, potencializa a compreensão sobre cadeia produtiva, valor econômico e sustentabilidade das ações.

Por fim, o processo produtivo contribui para a ressignificação das trajetórias pessoais. A transformação de resíduos em bonsais expressa, simbolicamente, a recuperação de vidas marcadas por abandono, dependência e exclusão. Esse paralelo — amplamente discutido por autores como Gaiger (2011) e Dagnino (2004) — reforça a ideia de que práticas artesanais podem funcionar como dispositivos de reconstrução subjetiva e de reintegração ao convívio social.

A experiência analisada não pode ser dissociada do território em que está inserida. O litoral do Paraná apresenta características ambientais e socioeconômicas específicas, marcadas pela sazonalidade do turismo, pela pressão sobre ecossistemas costeiros e pela presença recorrente de resíduos sólidos acumulados nas praias, especialmente após períodos de alta temporada e eventos climáticos. Nesse contexto, a coleta de fragmentos de madeira, partes de embarcações abandonadas e resíduos trazidos pelo mar assume relevância que ultrapassa a dimensão produtiva, configurando-se como prática ambiental situada territorialmente.

A incorporação desses resíduos ao processo artesanal de produção dos bonsais representa uma forma concreta de intervenção ambiental local. Ainda que em escala reduzida, a retirada e o reaproveitamento desses materiais contribuem para mitigar impactos visuais e ecológicos na faixa costeira. Tal dinâmica aproxima-se dos princípios da economia circular aplicados a territórios vulneráveis, nos quais a gestão de resíduos enfrenta limitações estruturais e dependência de políticas públicas intermitentes.

Além disso, a territorialidade costeira influencia diretamente o simbolismo da atividade. Os materiais utilizados carregam marcas do ambiente marinho — desgaste, salinidade, formas irregulares — que são reinterpretadas esteticamente no produto final. Essa característica fortalece a identidade local das peças produzidas, agregando valor cultural e diferenciando-as no mercado artesanal. Assim, observa-se uma convergência entre sustentabilidade ambiental, identidade territorial e geração de renda.

Sob a perspectiva dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a iniciativa dialoga especialmente com o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 14 (Vida na Água), ao promover o reaproveitamento de resíduos e contribuir, ainda que de forma localizada, para a preservação do ambiente marinho. Essa articulação evidencia que práticas de pequeno porte, quando contextualizadas territorialmente, podem produzir impactos simbólicos e pedagógicos significativos.

Por fim, a dimensão territorial reforça o caráter inovador da iniciativa. Não se trata apenas de um projeto de inclusão produtiva, mas de uma prática que emerge das especificidades ambientais do litoral paranaense, transformando vulnerabilidade ecológica em oportunidade socioeconômica. Essa conversão de passivos ambientais em ativos produtivos demonstra como a integração entre território, sustentabilidade e empreendedorismo solidário pode configurar modelo replicável em outras regiões costeiras com desafios semelhantes.

Com base nas evidências levantadas, é possível sistematizar os achados em dimensões analíticas que conectam práticas observadas, fundamentos teóricos e efeitos gerados. Essa síntese contribui para explicitar *como* e *por que* a iniciativa opera como inovação socioambiental no Terceiro Setor, além de oferecer elementos práticos para replicabilidade em contextos similares.

Dimensão	Evidência/Prática observada	Base conceitual	Impacto/Resultado identificado
Economia circular	Reaproveitamento de madeira costeira e componentes (ex.: cobre) oriundos de descarte	Ellen MacArthur Foundation (2013); Murray, Skene & Haynes (2017)	Redução de resíduos e reinserção de materiais em ciclo produtivo local
Educação ambiental	Coleta como ação pedagógica e de sensibilização sobre descarte e maritimidade	Jacobi (2003)	Ampliação de consciência ambiental e ressignificação do "lixo" como recurso
Aprendizagem e competência	Pedagogia do fazer (orientação prática, repetição, precisão na montagem)	Creswell (2014) (como método de registro/triangulação); Gil (2019) (descrição do fenômeno)	Desenvolvimento de habilidades manuais, disciplina produtiva e rotinas
Inclusão produtiva	Participação em etapas do processo e possível comercialização em feiras	Singer (2002); Gaiger (2011)	Geração de renda, autonomia e compreensão de cadeia de valor
Ressignificação do trabalho	Trabalho artesanal como dispositivo terapêutico e reconstrução subjetiva	Dagnino (2004); Cattani & Gaiger (2010)	Fortalecimento de autoestima, pertencimento e reorganização de trajetórias
Gestão participativa	Corresponsabilização e organização do ambiente de trabalho	Tenório (2006)	Fortalecimento de vínculos, engajamento e senso de utilidade social
Territorialidade costeira	Insumos e estética marcados pelo ambiente marinho; identidade local do produto	Jacobi (2003) (educação ambiental comunitária)	Diferenciação simbólica do produto e conexão com o território

Quadro 01: Síntese das dimensões analíticas do caso, práticas e impactos identificados.
Fonte: Dados da pesquisa (2026)

Do ponto de vista gerencial, o caso indica que iniciativas socioambientais semelhantes demandam, no mínimo, quatro condições operacionais: (i) acesso recorrente a insumos (resíduos costeiros/urbanos); (ii) rotina produtiva estruturada (etapas, responsáveis e padrões mínimos de acabamento); (iii) mediação formativa (um agente com domínio técnico e capacidade de orientar aprendizes); e (iv) canais de escoamento e validação social (feiras, eventos, redes locais), que convertam o valor simbólico em retorno econômico e reconhecimento.

Para fins de replicabilidade, observa-se que o modelo é mais viável em territórios com (a) disponibilidade de resíduos reaproveitáveis, (b) presença de redes comunitárias e organizações de apoio (universidade, incubadoras, poder público) e (c) mercados locais receptivos a produtos com identidade territorial e apelo socioambiental. Embora a escala produtiva seja limitada pelo caráter artesanal, o ganho central reside na integração entre processo pedagógico, disciplina produtiva e geração de valor socioambiental, o que reforça o potencial do arranjo como tecnologia social aplicada a contextos de vulnerabilidade.

Considerações Finais

O presente estudo teve como propósito analisar de que maneira a produção artesanal de bonsais, fundamentada no reaproveitamento de resíduos costeiros, contribui simultaneamente para a reinserção social de pessoas em situação de vulnerabilidade e para a promoção da sustentabilidade ambiental no âmbito de uma organização do Terceiro Setor localizada no litoral do Paraná

Os resultados evidenciam que a iniciativa investigada ultrapassa a dimensão meramente produtiva, configurando-se como uma prática integrada de empreendedorismo socioambiental. A atividade de coleta, tratamento e transformação de resíduos naturais e eletrônicos em bonsais ornamentais materializa, na prática, os princípios da economia circular, ao reinserir materiais descartados em novos ciclos de valor. Contudo, sua contribuição mais significativa reside na dimensão humana: o processo produtivo atua como dispositivo pedagógico, terapêutico e inclusivo, favorecendo o desenvolvimento de competências técnicas, a reconstrução da autoestima e o fortalecimento do sentimento de pertencimento dos participantes.

A articulação entre gestão ambiental, aprendizagem prática e inclusão produtiva demonstra que iniciativas de base comunitária podem operar como estratégias concretas de inovação social. Ao transformar resíduos em produtos de valor agregado, a organização simultaneamente reduz impactos ambientais e promove oportunidades de geração de renda, alinhando-se aos pressupostos do empreendedorismo solidário e da gestão participativa discutidos ao longo do artigo.

Do ponto de vista teórico, o estudo contribui para o debate sobre sustentabilidade no Terceiro Setor ao evidenciar que práticas artesanais, quando estruturadas sob princípios de economia circular e cooperação, podem constituir modelos híbridos de desenvolvimento socioeconômico e regeneração ambiental. A experiência analisada reforça a compreensão de que sustentabilidade não se limita à preservação de recursos naturais, mas envolve também a reconstrução de trajetórias humanas e a ampliação de capacidades individuais e coletivas.

Em termos práticos, os achados indicam que organizações sociais inseridas em territórios costeiros podem explorar o potencial dos resíduos marinhos e urbanos como insumos produtivos, integrando educação ambiental, capacitação e inclusão social. A replicabilidade da iniciativa dependerá, contudo, de fatores como articulação institucional, apoio técnico e fortalecimento de redes de comercialização.

Reconhece-se, por fim, que o caráter qualitativo e exploratório da pesquisa limita generalizações amplas. Sugere-se, para estudos futuros, a realização de investigações longitudinais que avaliem impactos socioeconômicos de médio e longo prazo, bem como análises comparativas com outras experiências de economia circular no Terceiro Setor.

Conclui-se que os bonsais produzidos pela organização analisada representam mais do que peças decorativas: simbolizam a possibilidade de ressignificação de resíduos e de vidas, evidenciando que práticas socioambientais, quando integradas à gestão solidária, podem constituir caminhos efetivos de transformação social e sustentabilidade territorial.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio e suporte da Universidade Federal do Paraná – Setor Litoral, Incubadora de Projetos Organizacionais e do Trabalho – INPRO e da Incubadora Tecnológica de Cooperativas Populares – ITCP/PR, bem como reconhecimento da Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do Paraná – Seti/PR.

Referências Bibliográficas

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2011.

CATTANI, Antonio David; GAIGER, Luiz Inácio. **Trabalho e economia solidária:** mapeando o campo e seus desafios. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2010.

CRESWELL, John W. **Research design:** qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 4. ed. Thousand Oaks: Sage, 2014.

DAGNINO, Renato. Tecnologia social: contribuições conceituais e metodológicas. **Revista Ciência & Tecnologia Social**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 25–44, 2004.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy:** economic and business rationale for an accelerated transition. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2013.

FRANCO, Renato C.; SALOMÃO, Ana. **Organizações da sociedade civil:** diversidade e desafios da gestão. São Paulo: Fundação Getulio Vargas, 2005.

GAIGER, Luiz Inácio. Economia solidária: utopias e práticas de uma nova economia. In: MANCE, Euclides André (Org.). **A economia solidária no Brasil:** práticas e fundamentos. São Paulo: Fundação Perseu Abramo, 2011. p. 27–50.

GEISSDOERFER, Martin et al. **The circular economy**: a new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production,** v. 143, p. 757–768, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

JACOBI, Pedro Roberto. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. **Cadernos de Pesquisa**, São Paulo, n. 118, p. 189–205, 2003.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade**. Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LAVILLE, Jean-Louis. **A economia solidária:** um balanço de experiências e uma proposta de articulação internacional. São Paulo: Fundação Perseu Abramo, 2009.

MINAYO, Maria Cecília de Souza. Análise qualitativa: teoria, passos e fidedignidade. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 621–626, 2012.

MURRAY, Alan; SKENE, Keith; HAYNES, Kathryn. The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context**. Journal of Business Ethics**, v. 140, p. 369–380, 2017.

SANTOS, Carolina S.; ALMEIDA, Maria A. O Terceiro Setor e a sustentabilidade: uma análise das práticas de gestão ambiental. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 48, n. 3, p. 543–566, 2014.

SEN, Amartya. **Desenvolvimento como liberdade**. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

SINGER, Paul**. Introdução à economia solidária**. São Paulo: Fundação Perseu Abramo, 2002.

TELLO-GAMARRA, Lorena; VERSCHOORE, Jorge Renato. O desenvolvimento das competências coletivas no terceiro setor. **Suma de Negócios**, v. 6, n. 14, p. 194–203, 2015.

TENÓRIO, Fernando Guilherme. Responsabilidade social empresarial: uma contribuição ao debate. **Cadernos EBAPE.BR**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 1, p. 1–10, 2006.

YIN, Robert K. **Case study research:** design and methods. 5. ed. Thousand Oaks: Sage, 2015.

POLÍTICAS PÚBLICAS E ECONOMIA CIRCULAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO PROJETO BAMB NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

1 Marina Xavier, 2 João Alexandre Paschoalin Filho

1 Universidade Nove de Julho, e-mail: marinaxavi@uni9.edu.br; 2 Universidade Nove de Julho, e-mail: jalexandre@uni9.pro.br

Resumo

Este trabalho investiga a integração entre políticas públicas, economia circular e construção civil, com ênfase na gestão de resíduos e na promoção de práticas sustentáveis no ambiente urbano brasileiro. Por meio de revisão bibliográfica, são analisados conceitos fundamentais da economia circular, contrapontos com o modelo linear, e aplicações práticas no setor da construção civil, incluindo tecnologias como BIM, logística reversa e rastreabilidade de materiais. Destaca-se o projeto europeu BAMB (Buildings as Material Banks) como referência internacional, explorando suas estratégias e viabilidade de adaptação ao contexto nacional. O estudo visa identificar barreiras, oportunidades e instrumentos que fortaleçam a circularidade na construção civil, oferecendo subsídios teóricos e práticos para gestores, profissionais e formuladores de políticas públicas. Os resultados esperados incluem o aprofundamento conceitual, a sistematização de experiências e a proposição de caminhos para a transição sustentável do setor.

Palavras-chave: Economia circular; Construção civil; BAMB.

Abstract

This study explores the integration of public policies, circular economy, and the construction sector, with a focus on waste management and the promotion of sustainable practices in Brazilian urban environments. Through a bibliographic review, it examines fundamental concepts of the circular economy, contrasts with the linear model, and practical applications in civil construction, including technologies such as BIM, reverse logistics, and material traceability. The European project BAMB (Buildings as Material Banks) is highlighted as an international reference, analyzing its strategies and the feasibility of adapting them to the national context. The research aims to identify barriers, opportunities, and tools that enhance circularity in constructio offering theoretical and practical insights for policymakers, professionals, and public administrators. Expected outcomes include conceptual deepening, systematization of case studies, and the proposition of pathways for the sustainable transition of the sector. Keywords: Circular economy; Civil construction; BAMB.

Introdução

A construção civil é um dos setores mais impactantes do ponto de vista ambiental, econômico e social. Entre os diversos desafios enfrentados pelo setor, destaca-se a gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD), que geram impactos negativos tanto nas cidades quanto no meio ambiente. Com o aumento da urbanização e das obras de infraestrutura, a quantidade de resíduos gerados tem se tornado um problema crescente. Estima-se que, entre 2000 e 2018, o setor da construção civil no Brasil tenha gerado em média 7,13 milhões de empregos por ano, respondendo por cerca de 5,35% do Produto Interno Bruto (PIB) do país (Nunes et al., 2024). Em paralelo, as soluções tradicionais de descarte não são mais suficientes para lidar com os volumes elevados de RCD, que representam um desafio adicional para a gestão ambiental (Munaro & Tavares, 2022).

Nesse contexto, surgem propostas mais inovadoras, como a economia circular, que busca transformar resíduos em novos recursos, reduzindo a extração de materiais e promovendo a reutilização (Santos et al., 2024). A economia circular envolve não apenas a reciclagem de materiais, mas também práticas como o design para desmontagem, a prolongação da vida útil dos produtos e a criação de sistemas de reutilização e recuperação (Araujo, 2025). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) oferece diretrizes para a gestão de resíduos, mas sua aplicação no setor da construção civil ainda enfrenta barreiras. Em São Paulo, como em outras grandes cidades, o desafio de implementar práticas sustentáveis é ainda maior devido à complexidade urbana, à falta de infraestrutura adequada e à necessidade de integração entre diferentes políticas públicas (Araujo, 2025).

O projeto BAMB (Buildings as Material Banks), uma iniciativa europeia que visa transformar os edifícios em bancos de materiais reutilizáveis, oferece uma abordagem inovadora para a gestão circular de resíduos na construção civil. Diferente de outras iniciativas, o BAMB propõe a reutilização estratégica dos materiais dos edifícios no final de sua vida útil, permitindo a desmontagem planejada desde a fase de projeto. Esta proposta se alinha com a tendência global de repensar o modelo linear de produção e consumo, buscando integrar soluções sustentáveis no contexto urbano (Oliveira, Schreiber & Jahno, 2024).

O objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade de aplicação do projeto BAMB no município de São Paulo, considerando as políticas públicas locais e os desafios relacionados à gestão de resíduos de construção e demolição. A pesquisa visa compreender como as diretrizes municipais, como a Política Municipal de Resíduos Sólidos (PMRS) e o Plano Diretor de São Paulo (PDE), podem ser ajustadas para incorporar os princípios da economia circular, promovendo práticas mais eficientes e sustentáveis no setor da construção civil.

A relevância deste estudo se dá pela crescente necessidade de soluções mais sustentáveis no setor da construção civil, especialmente em grandes centros urbanos como São Paulo. A gestão inadequada dos resíduos de construção e demolição (RCD),

que inclui práticas como o descarte irregular, a falta de reciclagem e a escassez de infraestrutura de triagem, representa um risco para o meio ambiente e a saúde pública, além de desperdiçar materiais que poderiam ser reutilizados ou reciclados (Almeida et al., 2025). A aplicação da economia circular oferece uma abordagem estratégica para reduzir esses impactos, e o projeto BAMB surge como uma solução inovadora que poderia ser adaptada ao contexto local.

Estudar a viabilidade de aplicar o projeto BAMB em São Paulo é relevante para compreender como políticas públicas podem ser mais eficazes na promoção de práticas sustentáveis. Essa pesquisa também pode contribuir para a formulação de políticas públicas mais integradas e adaptadas às realidades do município, estimulando o uso de soluções inovadoras para atender aos desafios urbanos e ambientais.

Objetivos

Objetivo geral

Analisar, por meio de revisão bibliográfica, como as políticas públicas do município de São Paulo podem incorporar os princípios da economia circular na gestão de resíduos da construção civil, com foco nas estratégias propostas pelo projeto BAMB.

Objetivos específicos

Identificar e analisar as diretrizes legais e institucionais do município de São Paulo voltadas à gestão de resíduos da construção civil, à luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com ênfase na aplicação de princípios da economia circular.

Apresentar os fundamentos conceituais, instrumentos e estratégias do projeto BAMB, destacando as ferramentas específicas como os Passaportes de Materiais e o Design Reversível, que são essenciais para a implementação da economia circular na construção civil.

Comparar os marcos normativos municipais com as estratégias do projeto BAMB, apontando convergências, lacunas e possibilidades das ferramentas da economia circular ao contexto urbano de São Paulo.

Referencial Teórico

Resíduos de construção e demolição (RCD)

Os resíduos de construção e demolição (RCD) compõem uma das maiores frações dos resíduos sólidos urbanos, resultado direto do crescimento acelerado da construção civil e da urbanização desordenada. A falta de planejamento adequado nas obras e o uso ineficiente dos recursos aumentam os impactos ambientais e econômicos, evidenciando a necessidade de uma gestão mais racional dos materiais. Nesse contexto, Silva (2024) ressalta que a ausência de políticas eficazes de reaproveitamento intensifica o descarte irregular, comprometendo o solo e os recursos hídricos.

A sobrecarga dos aterros sanitários e o aumento dos custos de transporte e destinação final são consequências diretas da má gestão dos RCD. A inexistência de infraestrutura adequada e de incentivos econômicos ainda impede a adoção de práticas sustentáveis por parte das empresas. Para Dias, Sales e Fontes (2025), é essencial repensar os modelos tradicionais de gestão e estabelecer políticas públicas integradas que garantam maior eficiência ambiental e econômica.

Embora o país possua legislações que orientam a destinação correta dos resíduos, a aplicação prática dessas normas ainda é deficiente. Falhas na fiscalização e na implementação de políticas públicas comprometem a efetividade das ações voltadas à sustentabilidade. Leão, Leão e Schneider (2025) argumentam que o distanciamento entre as diretrizes legais e sua execução limita o alcance das metas de gestão ambiental e mantém os problemas estruturais do setor.

Impactos ambientais, econômicos e sociais do descarte inadequado de RCD no mundo e no Brasil

A geração de resíduos da construção e demolição representa uma preocupação global diante da intensificação das obras urbanas. Marchi, Bohana e Jesus (2024) apontam que tanto no Brasil quanto na Itália as legislações buscam integrar práticas sustentáveis, mas enfrentam desafios operacionais. No Brasil, a quantidade de resíduos gerados pela construção civil é alarmante, com mais de 70 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados anualmente, representando cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos (Dias, Sales & Fontes, 2025).

A gestão inadequada dos resíduos de construção e demolição (RCD) apresenta não apenas impactos ambientais, mas também econômicos e sociais, refletindo-se diretamente nas práticas de descarte e reaproveitamento. No Brasil, a falta de infraestrutura adequada e de políticas públicas eficazes para lidar com a grande quantidade de RCD gerada contribui para a poluição ambiental e a sobrecarga dos sistemas urbanos.

Indicadores e dados sobre RCD no município de São Paulo

A geração de resíduos da construção e demolição (RCD) no município de São Paulo é um desafio significativo. Estima-se que a cidade produza mais de 10 milhões de toneladas de RCD anualmente, o que representa uma fração considerável dos resíduos sólidos urbanos (Costa; Favareto, 2024). No estado de São Paulo, as disparidades entre os municípios no gerenciamento desses resíduos são marcantes, e a ausência de um sistema unificado de dados dificulta a avaliação contínua da produção de resíduos.

Bataglia e Santos (2025) analisam disparidades nos indicadores de sustentabilidade entre municípios da região metropolitana e evidenciam desigualdade nos investimentos públicos. A capital paulista, embora concentradora de recursos, ainda carece de critérios padronizados para coleta e divulgação de dados sobre resíduos. A heterogeneidade metodológica prejudica comparações e políticas regionais.

Barreiras à gestão eficiente de RCD no contexto urbano

Munaro e Tavares (2022) identificam como barreiras principais a fragmentação das políticas públicas e a falta de incentivos ao reaproveitamento de materiais. A fragmentação das políticas públicas refere-se à ausência de uma abordagem integrada e coordenada entre diferentes esferas governamentais e setores da sociedade, o que dificulta a implementação de ações conjuntas e eficazes.

A falta de qualificação técnica e capacitação profissional também constitui um entrave relevante. Leão, Leão e Schneider (2025) indicam que a ausência de mão de obra preparada compromete a aplicação das normas ambientais. A gestão de resíduos exige conhecimento técnico específico, ainda pouco difundido no setor.

Gestão de RCD no Brasil e em São Paulo: políticas públicas e instrumentos legais

Andrade e Santos (2025) explicam que, no estado de São Paulo, as políticas públicas de gestão de resíduos da construção civil apresentam avanços, mas ainda enfrentam dificuldades estruturais. A ausência de fiscalização rigorosa compromete a aplicação das normas existentes. A falta de padronização nos procedimentos municipais também interfere na eficácia das ações.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e sua aplicação no setor da construção

Gaudard e Fortunato (2024) explicam que a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece princípios fundamentais como a responsabilidade compartilhada e a logística reversa. No entanto, sua aplicação no setor da construção ainda é limitada por fatores estruturais. O setor enfrenta dificuldade para cumprir metas de reaproveitamento e redução na geração de resíduos.

Planos e normativas municipais: Planos municipais de gestão de resíduos sólidos (PMGIRS), PDE e outras leis

A estrutura normativa municipal tem papel essencial na consolidação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. De acordo com a Lei nº 12.305, os municípios devem elaborar seus próprios planos de gestão para ordenar a coleta, o transporte, o tratamento e a disposição final dos resíduos (Brasil, 2010). Esses planos precisam estar alinhados com o Plano Diretor Estratégico e com os princípios do desenvolvimento sustentável.

Programas, incentivos e práticas adotadas em São Paulo

Ferreira et al. (2025) relatam que o estado de São Paulo adota estratégias gerenciais voltadas à minimização dos impactos ambientais dos resíduos da construção. Entre elas, destacam-se os programas de triagem seletiva e o incentivo ao uso de áreas públicas licenciadas para a disposição adequada. Essas ações contribuem para a organização dos fluxos de descarte.

Economia circular: fundamentos e aplicações

A economia circular propõe a substituição do modelo linear de produção por sistemas regenerativos. Nesse modelo, os resíduos deixam de ser descarte e passam a integrar novos ciclos produtivos. Santos et al. (2024) exemplificam essa lógica ao apresentar soluções para reaproveitamento de resíduos industriais. A abordagem estimula inovação e sustentabilidade.

Conceitos e princípios da economia circular

A economia circular baseia-se na lógica de manter o valor dos recursos dentro do sistema produtivo pelo maior tempo possível. Em vez de extrair, consumir e descartar, ela propõe ciclos fechados e regenerativos. Vier et al. (2021) explicam que esse modelo visa a reduzir a pressão sobre os ecossistemas e gerar benefícios sociais.

Economia linear versus economia circular

A economia linear caracteriza-se pelo ciclo produtivo baseado em extração, transformação, consumo e descarte. Esse modelo resulta em elevado desperdício e esgotamento de recursos naturais.

Metodologia

O presente estudo adota uma abordagem qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, fundamentada em pesquisa bibliográfica e documental, com o objetivo de analisar a viabilidade de aplicação dos princípios da economia circular, propostos pelo projeto BAMB (Buildings as Material Banks), no contexto das políticas públicas do município de São Paulo.

A pesquisa qualitativa mostra-se adequada por possibilitar a compreensão aprofundada de fenômenos complexos, permitindo a interpretação de processos sociais, institucionais e normativos que não podem ser reduzidos a variáveis mensuráveis. Segundo Minayo (2021), esse tipo de abordagem é indicado quando o foco da investigação recai sobre significados, contextos e relações sociais, especialmente em estudos voltados à análise de políticas públicas e práticas institucionais.

Quanto aos objetivos, a pesquisa caracteriza-se como exploratória, pois busca ampliar o conhecimento sobre um tema ainda pouco consolidado no contexto brasileiro a aplicação do modelo BAMB na gestão urbana, permitindo maior familiaridade com o problema investigado. Conforme Gil (2019), a pesquisa exploratória é apropriada quando o tema apresenta lacunas teóricas ou empíricas e demanda maior aprofundamento conceitual. Simultaneamente, o estudo assume caráter descritivo, ao sistematizar informações sobre legislações, políticas públicas, instrumentos normativos e experiências relacionadas à economia circular e à gestão de resíduos da construção civil, conforme definição apresentada por Lakatos e Marconi (2021).

No que se refere aos procedimentos técnicos, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica, a partir da análise de artigos científicos, livros, teses, dissertações e relatórios técnicos publicados, prioritariamente, no período de 2019 a 2025. As

buscas foram conduzidas em bases de dados acadêmicas reconhecidas, como Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar, com o objetivo de construir o referencial teórico sobre economia circular, resíduos da construção civil, políticas públicas urbanas e os fundamentos conceituais do projeto BAMB. Gil (2019) destaca que a pesquisa bibliográfica é fundamental para a contextualização teórica do problema e para a identificação do estado da arte sobre o tema investigado.

Paralelamente, desenvolveu-se uma pesquisa documental, voltada à análise de legislações, planos e normativas pertinentes, incluindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a Resolução CONAMA nº 307/2002, o Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo (PDE), a Política Municipal de Resíduos Sólidos e decretos municipais recentes. De acordo com Lakatos e Marconi (2021), a pesquisa documental distingue-se da bibliográfica por utilizar fontes primárias, permitindo a análise direta de documentos oficiais e normativos.

Na etapa seguinte, foi realizada uma análise comparativa, confrontando-se as diretrizes e ferramentas do projeto BAMB — como os Passaportes de Materiais e o Design Reversível — com o arcabouço legal e institucional vigente no município de São Paulo. Essa estratégia metodológica permitiu identificar convergências, lacunas e barreiras à adaptação do modelo europeu à realidade local. Segundo Creswell (2021), a análise comparativa em pesquisas qualitativas contribui para a interpretação crítica de diferentes contextos e modelos, fortalecendo a validade analítica do estudo.

Para complementar a análise e contextualizar o cenário paulistano, foram utilizados dados secundários provenientes de órgãos e entidades oficiais, como a Autoridade Municipal de Limpeza Urbana (AMLURB), a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABREMA), a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) e o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA). Esses dados subsidiaram a compreensão da magnitude da geração de resíduos, da infraestrutura disponível e das limitações operacionais do sistema atual.

Por fim, os dados obtidos foram organizados, analisados e interpretados de forma integrada, relacionando os fundamentos teóricos da economia circular, os instrumentos do projeto BAMB e as políticas públicas municipais, com o intuito de avaliar a viabilidade técnica, institucional e normativa da aplicação do modelo no município de São Paulo.

O Projeto Bamb: estrategias e instrumentos

O projeto BAMB (Buildings as Material Banks), uma iniciativa financiada pelo programa Horizon 2020 da União Europeia, foi desenvolvido entre 2015 e 2019 com o objetivo central de viabilizar a transição do setor da construção civil para uma economia circular. A premissa fundamental do projeto é que os edifícios devem ser concebidos como bancos de materiais valiosos, e não como fontes de resíduos futuros. O consórcio reuniu 15 parceiros de 7 países europeus, integrando universidades, empresas de construção, fabricantes e órgãos governamentais para criar ferramentas sistêmicas capazes de reter o valor dos materiais ao longo do tempo.

Para concretizar essa visão, o bamb desenvolveu duas ferramentas principais que atuam de forma integrada:

Passaportes de materiais (Materials passports)

Os Passaportes de Materiais são conjuntos de dados digitais que descrevem as características dos materiais, produtos e componentes inseridos em uma edificação. Diferente das fichas técnicas tradicionais, esses passaportes contêm informações dinâmicas essenciais para a recuperação e reutilização futura, tais como:

Composição química detalhada e potencial de toxicidade;

Instruções precisas de desmontagem e manutenção;

Valor residual estimado ao longo do tempo;

Histórico de uso e localização exata dentro do edifício.

Esses passaportes resolvem um dos maiores entraves à economia circular: a falta de informação sobre o que compõe o estoque construído. Ao garantir a rastreabilidade, reduzem-se os riscos associados ao uso de materiais recuperados e aumenta-se seu valor de mercado.

Design Reversível (Reversible Building Design)

O Design Reversível é uma abordagem projetual que garante que os edifícios possam ser facilmente transformados, adaptados ou desmontados. O objetivo é evitar que a demolição seja a única opção ao fim da vida útil de uma estrutura. Essa estratégia se baseia em três dimensões de reversibilidade:

Nível espacial: capacidade do edifício de mudar de uso (ex: de escritório para residencial) sem grandes reformas;

Nível estrutural: independência entre os sistemas do edifício (estrutura, fachada, instalações), permitindo que partes com diferentes vidas úteis sejam

substituídas sem danificar as demais;

Nível de componentes: uso de conexões mecânicas e secas (parafusos, encaixes) em vez de ligações químicas permanentes (colas, cimentos), facilitando a recuperação intacta dos materiais.

Os resultados práticos do projeto foram demonstrados em 6 projetos piloto, incluindo o "Circular Retrofit Lab" em Bruxelas e o "Green Design Centre" na Bósnia. Esses pilotos comprovaram que a aplicação conjunta dessas ferramentas pode reduzir a geração de resíduos em até 75% e diminuir significativamente a extração de recursos virgens, criando novos modelos de negócio baseados na performance e no serviço, em vez da simples venda de produtos.

Análise da viabilidade de aplicação do projeto Bamb em São Paulo

Para avaliar a viabilidade de aplicação do modelo BAMB, é fundamental compreender a magnitude do desafio em São Paulo. Segundo dados da Autoridade Municipal de Limpeza Urbana (AMLURB) e do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABREMA, 2023), o município de São Paulo enfrenta um cenário crítico:

A cidade gera aproximadamente 17.000 toneladas diárias de Resíduos da Construção Civil (RCC), o que representa um volume massivo de materiais potencialmente recuperáveis.

A Região Metropolitana de São Paulo é responsável por cerca de 50% de todo o RCD gerado no estado, evidenciando a concentração do problema e a oportunidade de escala para soluções circulares.

Apesar do alto volume, estima-se que apenas entre 15% e 20% desse material seja efetivamente reciclado ou reutilizado formalmente, sendo o restante destinado a aterros (que operam próximos da saturação) ou descartado irregularmente em "pontos viciados".

A infraestrutura atual conta com 3 Áreas de Transbordo e Triagem (ATT) principais e uma rede de Ecopontos, que, embora importantes, são insuficientes para processar o volume total gerado sob uma lógica de valorização de materiais.

O cenário legal recente, no entanto, mostra avanços. O Decreto Municipal nº 63.113/2024, consolidou as responsabilidades na gestão de resíduos sólidos, criando um ambiente regulatório mais claro que pode favorecer inovações como as propostas pelo BAMB.

Convergências entre Bamb e políticas paulistanas

A análise documental revela que já existe um alinhamento teórico significativo entre as propostas do projeto BAMB e o arcabouço legal vigente em São Paulo:

PNRS (Lei 12.305/2010): O princípio da "responsabilidade compartilhada" e a hierarquia que prioriza a "não geração, redução, reutilização e reciclagem" são perfeitamente compatíveis com a lógica dos Passaportes de Materiais e Design Reversível.

Plano Diretor Estratégico (PDE): O PDE de São Paulo enfatiza a sustentabilidade nas construções e incentiva tecnologias que reduzam impactos ambientais, oferecendo uma base legal para exigir ou incentivar práticas de design reversível em novos empreendimentos.

Resolução CONAMA 307/2002: Estabelece a obrigatoriedade da segregação de resíduos na origem, o que é um pré-requisito técnico para qualquer sistema de passaporte de materiais funcionar efetivamente.

Lacunas e Barreiras

Apesar das convergências legais, a aplicação prática enfrenta barreiras estruturais significativas:

Cultura construtiva: O setor da construção em São Paulo ainda opera majoritariamente com processos úmidos (concreto, argamassa, alvenaria) que dificultam a desmontagem e recuperação de componentes íntegros, contrariando o princípio do Design Reversível.

Informação fragmentada: Não existe uma base de dados centralizada ou padronizada sobre os materiais empregados nas edificações da cidade. A ausência de um "inventário urbano" torna a implementação de Passaportes de Materiais um desafio técnico imediato.

Mercado incipiente: A falta de padronização e certificação para materiais de reuso gera desconfiança técnica e jurídica, limitando a demanda por componentes recuperados.

Fiscalização e Incentivos: A fiscalização foca predominantemente no transporte e destinação final (controle de caçambas), e não na fase de projeto ou concepção, onde as ferramentas do BAMB seriam mais eficazes. Além disso, faltam incentivos fiscais claros (como descontos em IPTU ou ISS) para quem adota práticas de circularidade avançada.

Potencialidades

São Paulo apresenta características únicas que podem acelerar a adoção do modelo:

Escala de mercado: O tamanho do mercado imobiliário paulistano garante volume suficiente para viabilizar economicamente centrais de triagem avançadas e bancos de materiais.

Ecossistema de inovação: A presença das principais universidades do país e centros de pesquisa tecnológica favorece o desenvolvimento de adaptações locais para as tecnologias do BAMB, a fim de dar continuidade a este estudo.

Adoção do BIM: O crescimento do uso da tecnologia BIM (Building Information Modeling) em grandes construtoras e obras públicas cria a infraestrutura digital necessária para a implementação dos Passaportes de Materiais a baixo custo marginal.

Resultados e Discussões

Viabilidade técnica

Os resultados indicam que a viabilidade técnica da aplicação do Projeto BAMB em São Paulo é alta, mas condicionada à modernização dos processos construtivos. A ferramenta de Passaportes de Materiais pode ser integrada às plataformas BIM já utilizadas por grandes incorporadoras na capital. A adaptação da norma NBR 15.575 (Norma de Desempenho) para incluir requisitos de "desmontabilidade" e "ciclo de vida" seria um passo técnico crucial e exequível para tropicalizar o conceito de Design Reversível.

Viabilidade econômica

A análise econômica sugere um modelo de retorno a médio e longo prazo. Embora a adoção de sistemas construtivos industrializados e a gestão de passaportes possam elevar o custo inicial (CAPEX) em cerca de 3% a 5%, a economia gerada na fase de operação e, principalmente, no fim de vida do edifício (valor residual dos materiais) compensa o investimento. Para o município, a redução dos custos com a gestão de 17 mil toneladas diárias de RCD e o aumento da vida útil dos aterros representam uma economia pública milionária.

Viabilidade institucional/legal

Institucionalmente, São Paulo possui maturidade regulatória suficiente para iniciar a transição. O desafio não é a falta de leis, mas, a regulamentação específica. A criação de um decreto municipal que estabeleça o "Passaporte de Materiais" como requisito para licenciamento de grandes obras (acima de determinada metragem) é juridicamente viável dentro da competência municipal de legislar sobre uso do solo e meio ambiente.

Barreiras principais identificadas

A pesquisa identificou que a principal barreira não é tecnológica, mas cultural e econômica. A resistência do setor conservador da construção civil às mudanças de processos e a percepção equivocada de que a sustentabilidade é apenas um custo adicional ("green premium") são os maiores obstáculos. Superar isso exigirá uma combinação de "stick and carrot" (regulação e incentivo) por parte do poder público municipal.

Proposições para implementação do modelo Bamb em São Paulo
Curto prazo (1-2 anos)

Projeto Piloto Público: Implementar o conceito de Design Reversível e Passaporte de Materiais em uma obra pública emblemática (ex: uma nova escola ou UBS), servindo como laboratório de aprendizado e vitrine tecnológica.

Grupo de Trabalho (GT): Criação de um GT intersetorial envolvendo os Stakeholders para tropicalizar as métricas do BAMB.

Capacitação: Programas de treinamento para analistas de aprovação de projetos da prefeitura sobre os conceitos de desconstrução e passaportes digitais.

Médio prazo (3-5 anos)

Marco Regulatório Municipal: Publicação de normativa exigindo Passaportes de Materiais simplificados para obras com mais de 10.000m².

Incentivos Fiscais: Criação do "IPTU Circular", oferecendo descontos progressivos para edificações que comprovem índices de reversibilidade de projeto.

Plataforma Digital: Fomento à criação de um marketplace digital público-privado para materiais de reuso certificados, conectando geradores (obras de demolição) e consumidores.

Longo prazo (5-10 anos)

Integração BIM-Licenciamento: Tornar obrigatória a entrega do modelo BIM com Passaporte de Materiais integrado para todas as novas edificações na cidade.

Consolidação do Mercado Secundário: Estabelecimento de uma rede robusta de "Bancos de Materiais" físicos distribuídos pela cidade, operando como centros logísticos de materiais recuperados de alta qualidade.

Projeto Público: Implementar o modelo para habitações de interesse social.

Conclusões

A presente pesquisa confirmou que a aplicação dos conceitos do Projeto BAMB no município de São Paulo é não apenas necessária, mas viável, desde que adaptada às especificidades locais. A análise demonstrou que a capital paulista, por sua escala econômica e complexidade urbana, reúne as condições ideais para liderar a transição para a economia circular na construção civil na América Latina.

Conclui-se que as ferramentas de Passaportes de Materiais e Design Reversível oferecem uma resposta técnica robusta para o problema crônico dos Resíduos da Construção Civil (RCD). No entanto, sua implementação não ocorrerá espontaneamente pelas forças de mercado. É imperativa a atuação do Estado como indutor, através de políticas públicas que combinem exigências regulatórias graduais com incentivos econômicos claros.

A adoção desse modelo traria benefícios sistêmicos: transformaria o passivo ambiental de 17 mil toneladas diárias de resíduos em ativos econômicos, fomentaria uma nova cadeia produtiva de serviços tecnológicos e de remanufatura, e alinharia a cidade de São Paulo aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especificamente os ODS 11 (Cidades Sustentáveis), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

Referências

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABREMA, 2023.

ALMEIDA, Yury Tibério Nunes et al. **A importância da reciclagem dos resíduos de construção civil: uma revisão sistemática**. Journal of Environmental Management & Sustainability, v. 12, n. 1, 2025.

ANDRADE, R. M.; SANTOS, L. F. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo: avanços e desafios**. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 17, e20240102, 2025.

ARAUJO, M. G. **Economia circular na construção civil: barreiras e oportunidades no contexto brasileiro. Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 25, n. 1, p. 115-133, jan./mar. 2025.

BAMB - BUILDINGS AS MATERIAL BANKS. **Integrated vision for a circular building sector. Bruxelas: BAMB Project**, Horizon 2020, 2019. Disponível em: www.bamb2020.eu.

BATAGLIA, D. A.; SANTOS, F. A. **Indicadores de sustentabilidade em resíduos sólidos: uma análise comparativa na região metropolitana de São Paulo**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 30, n. 2, 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CONTERNO, L. et al. **Circular economy indicators for smart cities: a framework proposal**. Cities, v. 145, 104689, 2025.

COSTA, P. R.; FAVARETO, J. R. **Gestão de resíduos da construção civil em grandes metrópoles: o caso de São Paulo**. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 13, n. 1, 2024.

CRESWELL, John W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.

DIAS, C. A.; SALES, J. C.; FONTES, M. R. **Desafios da gestão de resíduos da construção civil no Brasil: uma análise crítica. Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 19, n. 54, 2025.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MINAYO, Maria Cecília de Souza. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 14. ed. São Paulo: Hucitec, 2021.

MUNARO, M. R.; TAVARES, S. F. **Passaporte de materiais: uma ferramenta para a economia circular na construção civil**. Paranoá, Brasília, n. 31, p. 1-18, 2022.

NUNES, K. R. A. et al. **Panorama econômico da construção civil no Brasil: 2000-2023**. Economia e Sociedade, v. 33, n. 1, 2024.

OLIVEIRA, L. S.; SCHREIBER, D.; JAHNO, V. D. **A economia circular na construção civil: uma revisão sistemática da literatura**. Gestão & Produção, v. 31, e68, 2024.

SANTOS, A. C. et al. **Economia circular e valorização de resíduos industriais: produção de blendas poliméricas**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 29, n. 1, 2024.

SILVA, J. R. **A gestão de resíduos de construção e demolição e os impactos ambientais urbanos**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 59, n. 1, 2024.

THE LIFE CYCLE OF ELECTRONIC EQUIPMENT: BETWEEN SOCIAL RISKS AND SUSTAINABLE OPPORTUNITIES

1 Emanoelen Bitencourt e Bitencourt, 2 Larissa Coelho Pereira Silva, 3 Valéria de Figueiredo Botelho, 4 Hélio Raymundo Ferreira Filho

1 Universidade do Estado do Pará (UEPA), e-mail: manuhbitencourt13@gmail.com; 2 Universidade do Estado do Pará (UEPA), e-mail: larissacoelho@yahoo.com.br; 3 Universidade do Estado do Pará (UEPA), e-mail: botelho.airelav@gmail.com; 4 Universidade do Estado do Pará (UEPA), e-mail: helio.ferreira@uepa.br

Keywords: Socio-environmental impacts; Electronic waste; Sustainability.

Abstract

This article critically analyzes the social impact of the electronics industry, considering both its negative and positive effects throughout its life cycle. The qualitative and descriptive study was based on a literature review of scientific articles, national and international legislation, institutional reports, and official documents. The results show that mineral extraction, production, and the disposal of electronic waste generate serious socio-environmental effects, such as the displacement of traditional communities, health risks to workers, ecological imbalance, and the accumulation of hazardous waste. Tragedies such as Mariana (2015) and Brumadinho (2019) underscore the fragility of environmental management and negligence regarding safety. In the context of consumption and post-consumption, the improper disposal of approximately 500,000 tons of electronic waste per year in Brazil stands out, with low recycling rates and the illegal shipment of waste to poor countries. On the other hand, these negative impacts have driven regulatory advances and socio-environmental debates, such as the creation of the National Environmental Policy (1981), the National Solid Waste Policy (2010), and the adoption of the UN 2030 Agenda. These initiatives seek to balance economic development and sustainability by promoting practices such as reverse logistics, the integration of waste picker cooperatives, and incentives for the circular economy. It can be concluded that, although electronics are indispensable to modern life, their life cycle is permeated by contradictions between technological innovation and socio-environmental responsibility. Strengthening public policies, expanding recycling, and investing in clean technologies are promising paths to transform the electronics industry into a driver of sustainable development, aligned with the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda.

Introduction

The electronics industry, characterized by constant global expansion and technological innovation, exerts a significant influence on contemporary society. The life cycle of these products, which spans from the extraction of natural resources to post-consumer disposal, results in a complex chain of social, environmental, and economic impacts. Although technological advances have led to greater connectivity, job creation, and economic growth, the associated socio-environmental costs cannot be overlooked (Bitencourt *et al*., 2024).

The mineral extraction phase, for example, exposes traditional communities to dispossession and the resulting loss of quality of life due to their inability to sustain themselves, in addition to placing workers in high-risk conditions. Tragedies such as those in Mariana (2015) and Brumadinho (2019) highlight the fragility of environmental management and negligence in safety, resulting in irreparable human, economic, and environmental losses, as well as impacts on education, culture, and leisure (Saraiva; Ferreira, 2018; Lucchetta; Watanabe; Oliveira, 2024). These incidents point to the need for stricter public policies and responsible business practices.

In the context of consumption and disposal, the challenge of managing electronic waste intensifies. Brazil improperly disposes of approximately 500,000 tons per year, and only a minimal fraction is properly recycled (Peixoto; Dantas, 2020). Furthermore, the practice of illegally shipping waste to underdeveloped countries exacerbates global inequalities and exposes vulnerable populations to health risks (Santos, 2021). This scenario highlights the urgency of reverse logistics systems and greater social awareness and sensitization regarding the product life cycle.

Beyond local impacts, the electronics industry operates within a global framework marked by rapid technological innovation and interdependence among countries. Constant advancements in new devices drive accelerated consumption and, consequently, the premature disposal of still-functional equipment, exacerbating the waste problem. In this context, it becomes evident that these challenges cannot be addressed solely at the national level, but require shared responsibility among transnational corporations, governments, and consumers, to promote sustainable practices that reconcile innovation with environmental preservation (Diaz-Bastos; Gomez-Bolaño; Mendoza-Granados, 2025).

On the other hand, negative impacts have driven regulatory advances and socio-environmental debates. The creation of the National Environmental Policy (1981), the National Solid Waste Policy (2010), and the adoption of the UN's 2030 Agenda demonstrate efforts to balance economic development and sustainability. In this context, a critical analysis of the social influence of electronic and electrical equipment becomes essential to understanding the challenges and proposing solutions that reconcile technological innovation, social justice, and environmental preservation.

Methodology

This study is a qualitative, descriptive research project based on a literature review (Sampaio, 2022). The choice of this method is justified by the need to understand the social, environmental, and economic impacts of the life cycle of electrical and electronic equipment from various theoretical and empirical perspectives that have already been documented.

Data collection was conducted through the analysis of scientific articles, national legislation, institutional reports, and official documents related to the topic. Priority was given to sources addressing: the extraction and processing of mineral resources for the electronics industry; working conditions and occupational health; environmental and social impacts resulting from the production and disposal of electronic waste; public policies and environmental legislation (national and global); and sustainability initiatives, such as the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs).

The materials were selected according to the following criteria, recommended by Braucks *et al*. (2025): thematic relevance: texts that directly discuss the life cycle of electronics and their social and environmental impacts; recency: priority given to publications from the last 15 years, without excluding fundamental historical documents (e.g., the 1988 Constitution); credibility: sources from scientific journals, government agencies, international organizations, and recognized authors in the field.

The analysis followed a critical and interpretive approach, seeking to identify: negative impacts associated with the production and disposal of electronics (environmental, social, and economic); positive influences resulting from social pressure and the creation of legislation and public policies; contradictions and gaps between normative discourse and actual practice; and possibilities for improvement based on international experiences and proposals for technological and social innovation.

As this is a literature review, this study does not include primary empirical data, such as interviews or field surveys. This limitation restricts the analysis to the interpretation of secondary sources, which may reduce the depth of understanding regarding the reality experienced by communities and workers directly affected by the industry.

Results and Discussion

Negative influencies

The social impact of electronic products is evident at every stage of their life cycle. The extraction of non-renewable natural resources begins with each industry identifying a suitable area for exploitation and setting up operations nearby to obtain the raw materials – metallic minerals, petroleum derivatives, and non-metallic minerals – that are the main components of electronics: metals, plastic, and glass.

It turns out that a large portion of the areas possessing reserves of resources relevant to the electronics industry are located in environmentally preserved or conserved areas and are not infrequently inhabited by traditional communities – a conflict mediated by the state. On the one hand, mining provides employment, production in other dependent sectors, and greater capital inflows, for example, on the other hand, however, the industry is responsible for the expropriation of local populations (Barcellos; Prates; Alt, 2021a).

Although the Federal Constitution, in Article 5, item XXIV, provides for the possibility of expropriation when there is: "[...] public necessity or utility, or for social interest, subject to fair and prior compensation in cash, except in the cases provided for in this Constitution" (Brazil, 1988), Article 225 of the same Constitution states that "Everyone has the right to an ecologically balanced environment, a common good of the people and essential to a healthy quality of life [...]" (Brazil, 1988). While productive activity benefits a portion of society, it also adversely affects a segment of the population.

A healthy quality of life is a highly relative concept for each society, but for traditional people, it is linked to living in harmony with nature. The practice of rural cultural activities, the unique way of obtaining ingredients for preparing such specific cuisine – taught by previous generations – and the appreciation of the natural world in relation to the spiritual realm are distinct sociocultural aspects of traditional peoples, often overlooked in the legalization processes of extraction activities (Barcellos; Prates; Alt, 2021b). Consequently, there is a loss of quality of life for these displaced individuals.

Furthermore, one of the impacts cited – and used to justify the establishment of the mining industry – is job creation for the local population. However, the sector has a high number of workplace accidents and occupational diseases, with risks of death, particularly during the extraction phase and regarding dams. Work activities are generally carried out in poorly lit environments, with airborne particles, high humidity, noise, ionizing radiation, poor ergonomics due to heavy loads and repetitive motions, and the presence of bacteria, viruses, and fungi (Costa; Pereira; Oliveira, 2022).

Due to all these hazards, the activity is classified as risk level 4, the most hazardous according to the Ministry of Labor's assessment. Therefore, it is the costliest in terms of accident prevention, as the number of professionals required for occupational safety is the highest (MTE, 2022). This classification, combined with other safety expenses – quality equipment, efficient machinery, and comprehensive and relevant studies – represents an investment that not all mining companies are willing to bear. Employees may suffer from hearing problems, diseases associated with the spine and spinal cord, sunburn, mercury poisoning, silicosis, malaria, tuberculosis, and even psychosocial disorders (Costa; Pereira; Oliveira, 2022).

Regarding the extraction and processing of raw materials, not only traditional communities and workers may suffer from the negative impacts of mining, but an entire region, given that the area at risk is much larger. Some of the most significant examples of this phase include landscape alteration and changes in the qualitative and quantitative characteristics of flora and fauna. In addition, there are changes to the terrain and soil, factors that result in ecosystem imbalance and shifts in the water table level and availability of surface water, for example. Furthermore, extraction and the transport of production materials emit large amounts of dust, composed of disease-causing elements (Sobreira; França, 2019).

Far-reaching impacts are also observed in situations involving tailings dam failures, which, like workplace safety, are neglected in risk and environmental management. In Mariana (MG), in 2015, 19 people died and many were displaced. In

Brumadinho (MG), in 2019, the tragedy caused the deaths of 235 people and the disappearance of 35 others, in addition to those left homeless, who lost their homes, personal belongings, and everything. In this municipality, 12 million cubic meters of iron ore tailings traveled more than 300 km across the region and covered at least 305 km of the Paraopeba Riverbed (Faria; Souza, 2019).

According to these authors, approximately 125 hectares of forest were destroyed, which, together with water and soil pollution, significantly impacted the quality of life for aquatic and terrestrial animals and crops in general. The resulting effects point to significant socioeconomic losses for society, since even the indigenous families in the region, who rely on fishing for their livelihood, were affected by the pollution of the Paraopeba River. The unavailability of basic environmental resources, such as water and food, which are essential to the population's quality of life, is evident in both the previous case and this one, which increases the cost of consumer goods.

It is also worth mentioning that, depending on the amount of soil/ore extracted, the characteristics of the mineral resource, and the manner in which the processes occur, the practice of mining over many years can lead to the phenomenon of subsidence, which is the gradual downward displacement of the ground, that is, the sinking of the terrain. Subsidence can also occur due to collapse, in which ground movement is accelerated. In both situations, there is social harm, whether due to total or partial collapse and, consequently, deaths and loss of material assets or due to the devaluation of affected properties (CPRM, 2018).

Another phase in the life cycle of electronic devices is the assembly and marketing of products, which has a greater impact on job creation and working conditions. However, this stage results in the generation of post-consumer waste, like the mineral extraction phase, which generates tailings. The amount of waste generated from product consumption is so significant that approximately 500,000 tons of electronic waste are improperly disposed of in Brazil every year, a quantity that is increasing year after year (Peixoto; Dantas, 2020).

Only 20% of the total e-waste generated is properly processed. The largest producers of this waste need to dispose of it properly, given social pressure and environmental legislation, but instead, the waste is transported across borders to poorer countries. Europe, North America, Japan, and Australia are among the main countries responsible for the illegal shipment of "trash," and China, Hong Kong, Indonesia, India, and various countries on the African continent receive these shipments. Since the materials received are dumped in landfills and processed informally, countries often receive the electronics as "secondhand equipment ," which end up in rivers and city streets – altering the landscape – and are dismantled irregularly and burned, as occurs in Accra, Ghana, for example, exposing people directly to electronic compounds for minimal income (Santos, 2021).

Furthermore, of the nearly 54 million tons of electronic waste produced annually worldwide, it is estimated that in 2019 only 17.4% of the waste generated was properly documented for subsequent collection and possible recycling, data that corroborates previous research (Espinha; Di Prinzio, 2020). Therefore, the volume of hazardous waste sent to landfills is proportional to public spending on the service, and also results in a reduction in the landfill's lifespan. Consequently, the municipality tends to use another area to construct a new waste disposal site, meaning more expenses and damage to the surrounding population (devaluation of property, odor, polluted water and soil, visual pollution), which often uses the landfill as a source of income, even though this represents health risks (Yamauchi; Binde; Sacco, 2021).

Positive influencies

The negative impacts of production, trade, and consumption of electronics were key factors in the emergence of global debates and legislation. As environmental problems and harm to public health and well-being reached significant proportions, events addressing socio-environmental issues became frequent and relevant. Economic development based on unchecked environmental exploitation began to be more widely questioned following the Club of Rome Report (1968-1972), the creation of the non-governmental organization Greenpeace in 1971, and the United Nations Conference on the Human Environment in 1972 – the first global event related to the topic and essential to the development of environmental policies (Bitencourt *et al*., 2018).

A few years later, in Brazil, following international and social pressure, the National Environmental Policy – Law No. 6,938/1981 – was enacted. This law established the National Environmental System (SISNAMA) and created the National Environmental Council (CONAMA), a body responsible for setting quality standards for environmental resources, including those related to electronic and electrical equipment. The Policy aims to ensure environmental quality is conducive to life and socioeconomic development, with a view to protecting the dignity of human life. The control and zoning of activities that are potentially or polluting (mineral extraction and processing) are among the principles of the law, while environmental licensing and disciplinary or compensatory penalties serve as its enforcement tools (Brazil, 1981).

> However, environmental law only became more robust and stable after the adoption of the 1988 Constitution, because Article 225 states that the government and society as a whole have an obligation to protect and care for natural resources so that they may be preserved in good condition for present and future generations (Bitencourt *et al*., 2018, p. 13).

From this perspective, the duty to protect environmental resources falls to the community, and in response to the problems caused by the improper disposal of post-consumer products, the National Solid Waste Policy was established. Law No. 12,305/2010 is based on the following principles: prevention and precaution; shared responsibility for the product life cycle; and recognition of reusable and recyclable solid waste as an economic asset with social value, a generator of jobs and income, and a promoter of citizenship. Among the objectives of the legislation are the protection of public health and the reduction of the volume and hazardousness of hazardous waste, for example, which is linked to the order of priority of non-generation, reduction, reuse, recycling, treatment of solid waste, and its environmentally sound final disposal (Brazil, 2010).

The National Solid Waste Policy also provides guidance on the mandatory design and implementation of reverse logistics systems. This applies separately from public urban sanitation and solid waste management services to manufacturers, importers, distributors, and retailers of electronic products and their components – Article 33, item VI. Reverse logistics systems are initiatives aimed at returning raw materials to the business sector for reuse within the same production cycle or in others. Or for proper final disposal, a responsibility of both the company and consumers. This is because they are the ones who must return post-consumer waste, but to do so, they need access to information (Oliveira *et al*., 2021).

Furthermore, Law No. 12,305/2010 explicitly states the importance of individuals who work with the collection of solid waste, since one of the objectives of the Policy is the "integration of collectors of reusable and recyclable materials into actions involving shared responsibility for the life cycle of products," art. 7, item XII. The encouragement of cooperatives is also mentioned, including the possibility of partnerships between organizations that have reverse logistics and collectors' associations, as well as what the public authorities should do, but primarily with low-income collectors (Brazil, 2010).

Another milestone of great global relevance to socio-environmental policies and issues, and specifically associated with the electronics industry, was the adoption of the 2030 Agenda for Sustainable Development in 2015, an extension of the Millennium Development Goals established by the United Nations (UN) in 2000. According to Zeifert, Cenci and Manchini (2020, p. 39):

> The significant contributions documented and endorsed by heads of state and government and high-level representatives from 193 UN member states, through the 2030 Agenda, are specifically embodied in its 17 Sustainable Development Goals and 169 targets to be implemented over the coming years (through 2030). They are an indispensable tool for the sustainable inclusion of society, as they clearly aim to eradicate poverty and promote a dignified life for all inhabitants of the planet. These clear targets encourage all countries to adopt, in accordance with their priority agendas and in the spirit of a global partnership, effective actions seeking to improve people's lives, including in the near future.

This is linked to the life cycle of electronics and electrical appliances across various Sustainable Development Goals (SDGs) (Figure 01), which should be taken into account in government action plans, including those in Brazil. The eradication of poverty (SDG 1), for example, relates to the right to economic resources and access to basic services (Target 1.4), such as education, health, and employment for the most vulnerable populations (United Nations Brazil, 2022). Therefore, considering that many waste pickers live below the poverty line, strengthening and structuring cooperatives that work with recyclable materials – including electronic waste – is a way to eradicate poverty. This will provide more income to this vulnerable population, as well as contribute to the fulfillment of SDG 2 by enabling the purchase of safe food with that income (Target 2.1).



Figure 01: The Sustainable Development Goals.
Source: United Nations Brazil (2022).

As for the other SDGs, all are indirectly linked to the life cycle of electrical and electronic equipment, but some are explicitly or directly related (Table 01). In particular, SDGs 8 and 9 refer to sustainable production, and when considering the industry's role in the employment sector, one of the clear alternatives is partnerships between organizations for the collection and reintegration of materials into production cycles, without overlooking the participation of waste picker cooperatives, which is interrelated with SDG 10 (Amaral; Miranda, 2019; Oliveira *et al*., 2021).

OBJECTIVE	GOALS
1	1.4 By 2030, ensure that all men and women, particularly the poor and vulnerable, have equal rights to economic resources, as well as access to basic services [...];
2	2.1 By 2030, end hunger and ensure that all people, particularly the poor and those in vulnerable situations, including children, have access to safe, nutritious, and sufficient food throughout the year;
3	3.9 By 2030, substantially reduce the number of deaths and illnesses from hazardous chemicals and from air, water and soil pollution and contamination;
6	6.1 By 2030, achieve universal and equitable access to safe and affordable drinking water for all;
	6.3 By 2030, improve water quality by reducing pollution, eliminating dumping, and minimizing the release of hazardous chemicals and materials; halve the proportion of untreated wastewater; and substantially increase recycling and safe reuse worldwide;
8	8.4 Gradually improve global resource efficiency in consumption and production by 2030, and strive to decouple economic growth from environmental degradation [...];
9	9.2 Promote inclusive and sustainable industrialization and, by 2030, significantly increase the share of employment in the industrial sector [...];
10	10.2 [...] empower and promote the social, economic, and political inclusion of all [...];
11	11.6 By 2030, reduce the negative environmental impact per capita of cities, including by paying particular attention to air quality, municipal waste management, and other issues;
12	12.2 By 2030, achieve sustainable management and efficient use of natural resources;
	12.4 By 2020, achieve the environmentally sound management of chemicals and all waste throughout their life cycle, in accordance with internationally agreed frameworks, and significantly reduce their release into the air, water, and soil, in order to minimize their adverse impacts on human health and the environment;
	12.5 By 2030, substantially reduce waste generation through prevention, reduction, recycling, and reuse;
	12.6 Encourage companies, especially large and multinational ones, to adopt sustainable practices and to incorporate sustainability information into their reporting processes;
	12.7 Promote sustainable public procurement practices [...];
	12.a Support developing countries in strengthening their scientific and technological capacities to transition to more sustainable patterns of production and consumption.

Table 01: Sustainable Development Goals related to electronics.
Source: United Nations Brazil (2022).

As for SDG 12, several targets are aimed at the electronics sector, given that these products—whether due to their (still inappropriate) use of environmental resources, their chemical composition and high level of hazardousness, or even the resulting excessive generation of waste throughout their entire life cycle – The 2030 Agenda has made clear the need to adopt sustainable practices in the industrial sector, including in scientific and technological development, because this represents the possibility of changes to the current production model, given that new discoveries can contribute to more efficient production in environmental, economic, and social spheres (Garbin; Ditomaso; Beuter Junior, 2020).

Final considerations

Electronic devices, while indispensable to modern life, have a life cycle fraught with contradictions. On the one hand, they drive economic and social progress; on the other, they cause severe environmental impacts and social inequalities. And even though global laws and policies aim to mitigate these effects – whether through the recycling of electronic components (metals, plastics) or the socioeconomic integration of recyclable material collectors – there are gaps in practical implementation, especially in Brazil.

Therefore, there is a need for better implementation of actions, plans, and projects aimed at integrating waste picker cooperatives, strengthening reverse logistics, and investing in clean technologies. These represent promising paths to reduce the damage linked to the electronics industry and expand the social benefits provided by the activity. So, the challenge is to make the electronics industry a force for sustainable development that can balance innovation with social and environmental responsibility.

As for the methodology used, the literature review presented effectively serves to bring together different perspectives on the social, environmental, and economic impacts of the electronics industry. The text demonstrates consistency by linking historical data, national and international legislation and policies, as well as concrete examples of environmental tragedies, such as Mariana and Brumadinho. This approach lends credibility and relevance to the study, as it highlights that the problems are not merely theoretical but are experienced by communities and workers.

However, the analysis has some limitations. As this is a literature review, it relies on secondary sources and does not include empirical data or in-depth case studies. The analysis has limitations that restrict the ability to assess the practical effectiveness of the public policies mentioned, such as the National Solid Waste Policy, cited as a step forward but without a thorough discussion of the barriers to its implementation; a more careful analysis of the political, economic, and cultural obstacles that hinder the application of these regulations would make the argument more robust and realistic. Furthermore, the discussion of social impacts could also be more detailed, incorporating the perspectives of affected workers and communities, which would enrich the human dimension of the problem.

Another point to consider is the lack of comparative analysis across countries. Although the article mentions the illegal shipment of waste to poor nations, it does not explore the differences in waste management between developed and developing countries. Such a comparison could offer insights into international best practices and possible paths forward for Brazil. It would also be relevant to discuss the role of transnational corporations and their social and environmental responsibility, given that they are key players in the production chain.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) and the State University of Pará (UEPA) for their support.

Bibliography

AMARAL, A. P.; MIRANDA, M. B. O papel dos estabelecimentos de telefonia na logística reversa de aparelhos celulares em Vila Velha (ES). **Destarte**, Vitória, v. 8, n. 2, p. 144-166, jul. 2019.

BARCELLOS, S. B.; PRATES, C. D.; ALT, J. P. Entre disputas e resistências: a expansão da mineração no contexto dos conflitos ambientais no bioma Pampa. **Revista da Escola da Magistratura do TRF da 4ª Região**, v. 7, n. 17, p. 293-327, 2021a.

BARCELLOS, S. B.; PRATES, C. D.; ALT, J. P. O Projeto Fosfato Três Estradas no esteio dos conflitos ambientais no Pampa Gaúcho. **Raízes: Revista de Ciências Sociais e Econômicas**, v. 41, n. 1, p. 25-43, 2021b.

BITENCOURT, E. B.; GONÇALVES, S. G.; CABRAL, M. V. A.; PEREIRA JÚNIOR, A.; MORALES, G. P. Electronic waste, the national solid waste policy and the 2030 Agenda. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v.21, n.1, p. 2286-2302. 2024.

BITENCOURT, E. B.; ROCHA, M. C.; SILVA, J. P. S.; PEREIRA JÚNIOR, A. Legislação ambiental no contexto evolutivo internacional e nacional. **Revista Jurídica**, v. 18, n. 2, p. 01-20, jul./dez. 2018.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 21 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 21 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm. Acesso em: 21 mar. 2026.

BRAUCKS, J. B.; AZEVEDO, G. P.; NEUBAUER, V. S.; ECKERT, N. H. Pesquisa bibliográfica como metodologia de pesquisa científica. **Revista Latino-Americana de Estudos em Cultura e Sociedade**, v. 11, ed. especial, p. 1-11, 2025.

COSTA, B. S.; PEREIRA, C. F.; OLIVEIRA, M. L. Das medidas preventivas de acidentes do trabalho na atividade de mineração. **Veredas do Direito**, Belo Horizonte, v. 19, n. 43, p. 69-93, jan./abr. 2022.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Curso básico de percepção e mapeamento do risco geológico:** colapso e subsidência. Set. 2018. Disponível em: https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Capacitacao/CBPRG2018/Vit%C3%B3ria_Subsid%C3%AAncia%20e%20Colapso_Jo%C3%A3o.pdf. Acesso em: 21 mar. 2026.

DIAZ-BASTOS, E. J.; GOMEZ-BOLAÑO, C. A.; MENDOZA-GRANADOS, S. I. Impacto de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en el desarrollo Sostenible. **Agroecología Global**, v. 7, n. 13, p. 4-27, 2025.

ESPINHA, M.; DI PRINZIO, R. C. **Um panorama geral sobre os resíduos eletroeletrônicos:** principais aspectos e comparativo entre Brasil e União Europeia. 2020. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

FARIA, E. F.; SOUZA, R. M. Da responsabilidade civil do Estado por omissão fiscalizatória: acidentalidade provocada pelo rompimento da barragem de Brumadinho. **A&C: Revista de Direito Administrativo & Constitucional**, Belo Horizonte, v. 19, n. 78, p. 221-248, out./dez. 2019.

GARBIN, F. Q.; DITOMASO, R.; BEUTER JUNIOR, N. **Reciclagem do plástico:** o caminho para a implementação da economia circular – reeducação do setor produtivo e dos hábitos de consumo. Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), Nações Unidas, 2020. Disponível em: https://archivo.cepal.org/pdfs/bigpushambiental/Caso16-ReciclagemPlasticoEconomiaCircular.pdf. Acesso em: 21 mar. 2026.

LUCCHETTA, B. C.; WATANABE, F. S. Y.; OLIVEIRA, F. S. Evaluation of OLI Landsat-8 images based on spectral indices in detecting areas affected by mining tailings mud: a case study of the Brumadinho dam rupture, Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 30: e2024013, 2024.

MTE – MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 04 - Serviços Especializados em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho**. Ministério do trabalho, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-04-atualizada-2022.pdf. Acesso em: 09 dez. 2022.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2022. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 11 dez. 2022.

OLIVEIRA, S. J.; TEIXEIRA, R. L. P.; BRITO, M. L. A.; SILVA, P. C. D. Logística reversa: a destinação acertada de baterias de smartphones no Brasil. **Revista de Casos e Consultoria**, v. 12, n. 1, p. e26337, 2021.

PEIXOTO, A. S. P.; DANTAS, J. M. Resíduos eletroeletrônicos no Ensino Básico: análise das produções de artigos entre 2008 e 2018. **Indagatio Didactica**, v. 12, n. 4, p. 615-630, nov. 2020.

SAMPAIO, T. B. **Metodologia da pesquisa**. 1. ed. Santa Maria, RS: UFSM, CTE, UAB, 2022.

SANTOS, K. L. A *Recommodização* da Economia Urbana em Acra, Gana. **Caderno de Geografia**, v. 31, n. 67, p. 1223-1247, 2021.

SARAIVA, C. M.; FERREIRA, P. T. M. A lama da Samarco e o crime corporativo: uma reflexão necessária. **Administração Pública e Gestão Social**, v. 9, n. 2, p. 75-83, 2018.

SOBREIRA, P. A.; FRANÇA, P. H. S. Danos ambientais provenientes das barragens de rejeitos do estado de Goiás. *In*: CHEHAB, I. M. C. V.; TÁRREGA, M. C. V. B. (coord.). **Reforma agrária, conflitos agrários e questões socioambientais**. 1. ed. Curitiba: CEPEDIS, 2019.

YAMAUCHI, T. E.; BINDE, D. R.; SACCO, A. P. Compostar: uma proposta para a destinação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos gerados em Barra do Garças – MT. **Revista Panorâmica**, v. 2, Edição Especial, p. 82- 97, 2021.

ZEIFERT, A. P. B.; CENCI, D. R.; MANCHINI, A. A justiça social e a agenda 2030: políticas de desenvolvimento para a construção de sociedades justas e inclusivas. **Revista Direitos Sociais e Políticas Públicas**, v. 8, n. 2, p. 30- 52, 2020.

VIABILIDADE ECONÔMICA DO *UPGRADING* DE BIOGÁS DE ATERRO PARA PRODUÇÃO DE BIOMETANO: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA GLOBAL

1 Máira Vieira Foquesatto, 2 Gislaine Fátima Perin, 3 Marina Celant De Prá, 4 Marcelo Bortoli
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Francisco Beltrão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental; Limpeza e Conservação Pema Ltda, e-mail: mairavduarte@gmail.com; Limpeza e conversação Pema LTDA, e-mail: gislainefperin@gmail.com;; Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Francisco Beltrão, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental, e-mail: marinapra@utfpr.edu.br; Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Francisco Beltrão, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental, e-mail: marcelobortoli@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Biometano; *Upgrading*; Análise Bibliométrica.

Resumo

A viabilidade econômica constitui o principal desafio para a consolidação do biometano e do Gás Natural Renovável (RNG) como vetores estratégicos na transição energética. Este estudo mapeou a produção científica global sobre a economia da produção de biometano e tecnologias de *upgrading* por meio de análise bibliométrica nas bases *Web of Science* e *Scopus*. Foram processados 358 documentos únicos, abrangendo o período de 2008 a 2025, com a utilização do pacote Bibliometrix no software R. Os resultados evidenciam um crescimento exponencial das publicações a partir de 2015, impulsionado por políticas de Economia Circular e pela liderança global da Itália. O Brasil ocupa a sexta posição mundial, apresentando competência acadêmica consolidada, ainda que caracterizada por uma taxa de colaboração internacional inferior à observada nos pares europeus. A análise de tendências revelou uma mudança na fronteira do conhecimento: o foco acadêmico migrou de discussões operacionais para a integração com novos vetores, destacando-se o surgimento recente do hidrogênio e do RNG. Os resultados sugerem que literatura recente tem atribuído crescente relevância a modelos de negócios inovadores e à integração tecnológica entre biometano e hidrogênio verde, exigindo análises tecnoeconômicas que validem a viabilidade desses sistemas híbridos.

Introdução

A mitigação das emissões de gases de efeito estufa e a transição energética global estabeleceram o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos como eixo central das discussões sobre sustentabilidade (IPCC, 2024). Os aterros sanitários deixam de ser compreendidos como locais de simples disposição final para serem operados como biorrefinarias produtoras de energia (Rehan et al., 2019). O biogás de aterro (LFG), frequentemente subutilizado em queima ou processos de baixa eficiência, consolida-se como fonte renovável estratégica (Khan et al., 2017). A valorização desse potencial energético ocorre por meio do processo de *upgrading*, que converte o biogás bruto em biometano, combustível com propriedades equivalentes às do gás natural fóssil e adequado para frotas veiculares ou injeção em gasodutos (Molino et al., 2013; Kumar et al., 2021).

A maturidade tecnológica da digestão anaeróbia e da purificação convive com desafios econômicos persistentes que configuram a barreira principal para a expansão do biometano e do Gás Natural Renovável (RNG) (García-Gutiérrez et al., 2016). A implementação dessas plantas industriais demonstra sensibilidade a variáveis financeiras, com ênfase nos custos de capital (CAPEX), custos operacionais (OPEX) e estruturas de incentivo governamental (Catalano et al., 2024). A discussão acadêmica incorporou recentemente a Economia Circular e a produção de hidrogênio verde, sugerindo que a literatura recente tem atribuído crescente relevância a modelos de negócios inovadores e a análises tecnoeconômicas robustas.

O aumento do volume de publicações na última década demanda a organização sistemática das fronteiras do conhecimento para orientar pesquisadores e gestores (Stentoft; Freytag, 2018). As revisões de literatura prévias concentram-se na eficiência técnica da digestão anaeróbia ou em avaliações de custos isoladas. Existe uma lacuna quanto ao mapeamento da convergência macroeconômica entre o biometano e vetores emergentes, especialmente na integração com o hidrogênio verde. A validação do *upgrading* como elo viável em modelos circulares complexos ainda carece de sistematização. O Brasil, como grande produtor de resíduos e mercado de gás em expansão, ocupa posição relevante na produção científica (Bueno et al., 2025), exigindo análises que conectem as tecnologias de purificação aos custos de ciclo de vida (Woodliffe et al., 2020).

Este estudo realiza uma análise bibliométrica global fundamentada em mineração de texto para preencher as lacunas identificadas. A investigação busca esclarecer qual é o panorama atual da pesquisa sobre a viabilidade econômica do biometano e de que forma esse campo se modificou cronologicamente, examinando como se distribuem a produção científica e as redes de colaboração global, com ênfase na posição estratégica do Brasil. Por fim, o trabalho identifica os *hotspots* de pesquisa atuais e as tendências recentes de aproximação temática entre biometano, hidrogênio verde e RNG, oferecendo subsídios para o desenvolvimento e o direcionamento estratégico do setor.

Material e Métodos

A presente análise bibliométrica constitui um estudo quantitativo, descritivo e relacional, direcionado ao mapeamento da produção científica global sobre a viabilidade econômica do biometano e tecnologias de *upgrading* (Aria; Cuccurullo, 2017).

O levantamento de dados ocorreu em dezembro de 2025 nas bases *Web of Science* (*Core Collection*) e *Scopus*, selecionadas pela abrangência multidisciplinar e pelo rigor editorial (Marina; Sterligov, 2021).

A estratégia de busca fundamentou-se em três eixos temáticos articulados por operadores booleanos AND: (i) fonte de biomassa, (ii) produto e processo e (iii) análise econômica. Os descritores aplicados estão detalhados na Tabela 1. O recorte temporal abrangeu todos os registros disponíveis nas plataformas até o momento da coleta, sem restrições de idioma, considerando artigos originais, revisões e trabalhos completos em anais de eventos.

Tabela 1. Estratégia de busca e descritores utilizados para a identificação dos estudos nas bases de dados.

Eixo temático	Categoria conceitual	Termos e Descritores Utilizados (Title, Abstract, Keywords)
Eixo 1	Fonte de biomassa	*Landfill gas*; *LFG*; *Landfill biogas*; *Sanitary landfill*; *Municipal solid waste*.
Eixo 2	Produto e processo	*Biomethane*; *Bio-methane*; *Biogas upgrading*; *Biogas purification*; *RNG*; *Renewable natural gas*.
Eixo 3	Análise econômica	*Economic*; *Viability*; *Techno-economic*; *Feasibility*; *Cost*; *LCA* (Life Cycle Assessment); *Exergoeconomic*; *4E analysis*.
Operadores	Lógica booleana	Eixo 1 AND Eixo 2 AND Eixo 3
Filtros	Critérios de inclusão	Tipos: Artigos, Revisões, Anais de Conferência. Tempo: Todos os anos disponíveis (2000–2025).

Fonte: elaborada pelos autores.

A triagem inicial identificou 511 registros, sendo 280 provenientes da *Web of Science* e 231 da *Scopus*. A etapa de desduplicação, realizada de forma automática e manual, resultou na remoção de 151 registros redundantes. A análise subsequente de títulos e resumos levou à exclusão de dois documentos por desalinhamento com o escopo da pesquisa, consolidando um corpus final de 358 documentos, provenientes de 121 fontes e elaborados por 1.524 autores.

O processamento estatístico utilizou o software R (versão 4.5.2) e o pacote Bibliometrix, via interface Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017). As análises estruturaram-se em três dimensões: (i) descritiva, abrangendo a evolução temporal, fontes, países, instituições e autores; (ii) conceitual, através de nuvem de palavras, mapa temático e análise de coocorrência de termos; e (iii) impacto científico, identificando os documentos mais citados, referências seminais e redes de colaboração internacional. A normalização dos dados seguiu os protocolos do Bibliometrix para assegurar a consistência entre variações de grafia e indexação.

Resultados e discussão

Panorama da Produção Científica Global

A trajetória da produção científica global entre 2008 e 2025 sugere um padrão bifásico de maturação tecnológica, no qual o estágio de estabilidade inicial é sucedido por um crescimento acentuado a partir de 2015 (Khan et al., 2017; Adnan et al., 2019). O intervalo de incubação, compreendido entre 2008 e 2014, concentrou o desenvolvimento científico na estabilização físico-química da digestão anaeróbia e na superação de inibidores do processo, caracterizando uma fase de consolidação do domínio operacional (Miltner et al., 2017; Kadam et al., 2023).

A aceleração documental verificada entre 2015 e 2020 vincula-se à institucionalização de marcos regulatórios e diretrizes transnacionais de sustentabilidade: no plano global, o Acordo de Paris (2015) estabeleceu metas para a descarbonização profunda, enquanto o Pacote de Economia Circular da União Europeia (2015) reclassificou o biometano de subproduto residual para ativo estratégico de recuperação energética (Cucchiella; D'Adamo; Gastaldi, 2019). No cenário brasileiro, a implementação da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) em 2017 representou um indutor regional relevante. Ao introduzir mecanismos de precificação da eficiência ambiental por meio de Créditos de Descarbonização (CBIOs), o RenovaBio fomentou a demanda acadêmica por métricas rigorosas de sustentabilidade, justificando a prevalência de termos como "*Life Cycle Assessment"* e "*Biogas Upgrading*" nos registros analisados.

A análise dos dados recentes, abrangendo o período de 2023 a 2025, sinaliza uma especialização temática voltada a nichos de elevada complexidade técnica, com destaque para a integração termodinâmica com sistemas de hidrogênio verde (Singh; Sirini; Lombardi, 2025; Yousaf et al., 2022). Esse movimento indica o deslocamento da fronteira de pesquisa da produção genérica de biogás para a validação tecnoeconômica de biorrefinarias avançadas e rotas de metanação (Aryal et al., 2018; Atelge et al., 2020).

A validação científica dessa produção ocorre majoritariamente em periódicos de alto fator de impacto, como *Journal of Cleaner Production* e *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, que se consolidaram como veículos primários para estudos integrados de avaliação de ciclo de vida (LCA) e análise de custos (Lombardi; Carnevale, 2021; Huang et al., 2017). Paralelamente, a recorrência de citações em revistas especializadas em engenharia química, a exemplo da *Fuel*, reforça a importância da qualidade do combustível e da intercambialidade com o gás natural fóssil para garantir a viabilidade financeira e a bancabilidade dos projetos de *upgrading* (Molino et al., 2013; Ullah Khan et al., 2017).

Distribuição Geográfica e Colaboração Internacional

A distribuição da produção científica, detalhada na Tabela 2, aponta assimetrias estruturais nas estratégias de investigação globais. A Itália exerce uma liderança consolidada por políticas públicas de longo prazo, como as tarifas *feed-in*, que estabeleceram um ecossistema de bioeconomia robusto (D'Adamo et al., 2023; Ferella et al., 2019; Catalano et al., 2024). Esta liderança europeia parece associar-se à presença de centros de excelência integrados em redes de colaboração, o que acelera a transferência tecnológica entre a academia e o setor industrial (Piechota et al., 2013; Zabed et al., 2019).

Tabela 2. Produção científica e padrões de colaboração internacional dos 10 principais países.

No.	País	Artigos	SCP	MCP	MCP *ratio* (%)	TC
1	Itália	70	43	27	38,6%	1572
2	China	47	32	15	31,9%	1046
3	EUA	32	25	7	21,9%	1045
4	Índia	25	20	5	20,0%	453
5	Reino Unido	19	8	11	57,9%	937
6	Brasil	18	15	3	16,7%	126
7	Espanha	15	9	6	40,0%	310
8	Alemanha	13	9	4	30,8%	349
9	Coreia do Sul	12	10	2	16,7%	708
10	Malásia	12	5	7	58,3%	326

.

Legenda: SCP (*Single Country Publications*): documentos em que todos os autores pertencem ao mesmo país; MCP (*Multiple Country Publications*): documentos que apresentam colaboração entre autores de diferentes países; MCP *Ratio*: percentual de publicações com colaboração internacional em relação ao total produzido pelo país; TC (*Total Citations*): volume total de citações acumuladas pelos documentos de cada país no corpus analisado.

Fonte: elaboração própria com dados do Bibliometrix

O Brasil ocupa uma posição singular neste cenário. Embora figure como o sexto maior produtor de conhecimento sobre o tema, superando economias como a França, o Reino Unido e a Alemanha em volume de publicações, o país opera sob uma lógica predominantemente endógena (ABRELPE, 2023; Dos Santos et al., 2024). Enquanto o Reino Unido apresenta um índice de internacionalização (MCP) de 57,9%, a ciência brasileira mantém apenas 16,7% de colaboração externa (EPE, 2023; Dos Santos et al., 2024). Esse padrão sugere elevada produtividade nacional, embora com menor inserção em circuitos internacionais de coautoria, diferentemente de países como a Itália e o Reino Unido, que apresentam maior participação em publicações com colaboração internacional, a produção nacional tende a circular em circuitos domésticos.

Essa menor internacionalização pode estar relacionada a assimetrias técnicas e financeiras. No plano técnico, a investigação nacional prioriza rotas de valorização de resíduos tropicais, como a vinhaça e a torta de filtro do setor sucroenergético, desenvolvendo um quadro tecnológico distinto, enquanto a produção global de bioetanol em outras regiões é impulsionada por matérias-primas como milho (Estados Unidos) e trigo (Europa) (Brito et al., 2024). No plano financeiro, a instabilidade em programas de mobilidade, como o Ciência Sem Fronteiras, e a escassez de editais bilaterais de longo prazo dificultam a formação de redes transnacionais, devido a restrições financeiras e cortes de investimento na pesquisa (Raniro et al., 2023). A literatura indica que a baixa internacionalização reflete também as barreiras do mercado local, ainda centrado em discussões regulatórias iniciais, enquanto a fronteira europeia avança na integração de sistemas complexos e poligerativos (Oliveira et al., 2023; Arcanjo et al., 2022). Adicionalmente, a forte concentração institucional na Universidade de São Paulo (USP) sugere a ausência de um sistema nacional de inovação capilarizado, em contraste com os modelos em rede observados na China e na Itália (Vasco-Correa et al., 2018; Zhang et al., 2023).

Autores e Impacto Científico

A análise dos dados permite propor, em caráter interpretativo, duas tendências predominantes. A primeira, denominada "Escola Regulatória Italiana", sob a liderança de pesquisadores como I. D'Adamo e M. Gastaldi, centraliza o debate na sustentabilidade financeira dos projetos. Esta corrente sustenta que a viabilidade econômica do biometano é indissociável de mecanismos de suporte governamental e modelos de negócios baseados na circularidade. Nesse paradigma, a rentabilidade

ultrapassa a eficiência termodinâmica, fundamentando-se na estruturação de subsídios cruzados e na valorização monetária de externalidades ambientais no âmbito da Bioeconomia.

Simultaneamente, a "Escola de Engenharia de Processos e Ciclo de Vida", representada por autores como L. Lombardi, J. Murphy e I. Angelidaki, prioriza a validação técnica e ambiental rigorosa. Nestes estudos, a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) aparece como ferramenta relevante para a avaliação ambiental e financeira de projetos de *upgrading* em mercados em descarbonização. Enquanto o trabalho de Khan et al. (2017) permanece como a referência técnica para a comparação de tecnologias de purificação, a produção recente desse grupo busca integrar tais tecnologias a sistemas de cascata energética e biorrefinarias complexas.

A dinâmica recente das citações sugere uma inflexão temática a partir de 2021, com o surgimento de autores focados na integração com o Hidrogênio Verde e na captura de carbono. Esse movimento sugere o deslocamento do foco temático da otimização de processos isolados para a concepção sistêmica de vetores energéticos híbridos. O impacto científico atual reside, portanto, na capacidade de articular a eficiência operacional com novos paradigmas de financiamento climático e aceitação social, superando a análise isolada de tecnologias de *upgrading*.

Estrutura Conceitual e Fronteiras de Pesquisa

A semântica das palavras-chave revela a dinâmica temática do campo, com o núcleo da pesquisa ancorado nos termos "Biogas", "*Biomethane*" e "*Anaerobic Digestion*", os quais apresentam forte associação a "*Municipal Solid Waste*" e "*Food Waste*" (Aria; Cuccurullo, 2017). Essa hierarquia de termos é visualmente representada pela nuvem de palavras (Figura 1), na qual a proeminência desses descritores evidencia as bases estruturais e o foco produtivo do *corpus* analisado.



Figura 1. Nuvem de palavras-chave da produção científica global sobre biometano.

A centralidade de conceitos como "*Circular Economy*" e "*Life Cycle Assessment*" (LCA) sugere a integração entre a viabilidade econômica, a sustentabilidade ambiental e a valorização de resíduos (Murphy et al., 2017). Essa progressão é corroborada pela segmentação dos descritores em três fases de desenvolvimento, evidenciando uma sofisticação contínua da área.

Tabela 3. Apresentação dos termos mais frequentes por fase de desenvolvimento

No.	Fase 1: Incubação (2008-2014)	Freq	Fase 2: Expansão (2015-2020)	Freq	Fase 3: Mercado (2021-2025)	Freq
1	*Biogas*	32	*Biogas*	137	*Biogas*	179
2	*Biomethane*	25	*Biomethane*	108	*Biomethane*	165
3	*Anaerobic Digestion*	18	*Anaerobic Digestion*	102	*Anaerobic Digestion*	134
4	*Circular Economy*	8	*Biogas Upgrading*	51	*Circular Economy*	78
5	*Biogas Upgrading*	7	*Life Cycle Assessment*	38	*Biogas Upgrading*	66

6	*Life Cycle Assessment*	6	*Methane*	35	*Life Cycle Assessment*	55
7	*Hydrogen*	5	*Renewable Energy*	28	*Hydrogen*	42
8	*Renewable Energy*	5	*Purification*	24	*Renewable Energy*	38
9	*Biorefinery*	4	*Waste Management*	22	*Biorefinery*	31
10	*Techno-economic Analysis*	3	*Adsorption*	20	*Techno-economic Analysis*	29

Fonte: elaboração própria com dados do Bibliometrix.

O período inicial (2008-2014) concentrou-se nos fundamentos do processo e no domínio tecnológico, enquanto a fase intermediária (2015-2020) deslocou o foco para o refino técnico e a eficiência ambiental. O intervalo mais recente (2021-2025) marca a orientação mercadológica, na qual a predominância da Economia Circular e o surgimento consolidado do hidrogênio sugerem crescente aproximação com o debate sobre biorrefinarias complexas. A trajetória de maturação científica sugere que a estrutura conceitual, antes ancorada na engenharia sanitária e na gestão de resíduos, evoluiu para uma fase de consolidação das tecnologias de *upgrading*. Atualmente, essa ramificação temática sugere deslocamento do debate para escalas mais amplas de avaliação econômica e de mercado como "*Renewable Natural Gas*" e a validação financeira via "*Economy*" e "*LCA*".

A categorização estratégica dos clusters reforça a maturidade econômica do setor, permitindo a visualização da relevância e do desenvolvimento dos temas (Figura 2).

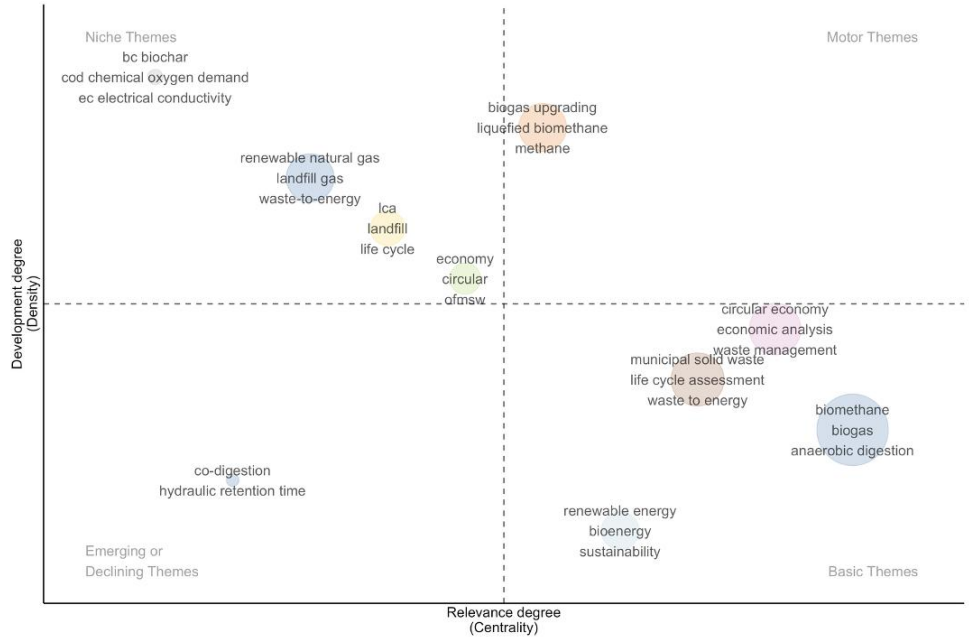


Figura 2. Mapa temático da produção científica sobre biometano e *upgrading*.

O quadrante dos Temas Motores (*Motor Themes*) é ocupado por termos como "*Biogas Upgrading*" e "*Liquefied Biomethane*", indicando que o desenvolvimento de tecnologias de purificação para combustíveis de alto valor agregado aparece como tema motor no mapa temático, indicando relevância no desenvolvimento recente do campo. Paralelamente, o quadrante de Temas de Nicho (*Niche Themes*) destaca tópicos de alta especialização ou fronteiras técnicas, como "*Renewable Natural Gas*", "*Biochar*" e métricas de demanda química de oxigênio (COD). Já os conceitos de "*Circular Economy*", "*Economic Analysis*" e os termos fundadores "*Biomethane*" e "*Anaerobic Digestion*" consolidam-se como Temas Básicos (*Basic Themes*), sustentando o edifício teórico e a viabilidade estrutural da área.

A análise temporal dos tópicos ratifica uma mudança de paradigma. O foco, situado em preocupações ambientais e operacionais entre 2011 e 2020, deslocou-se para termos de mercado e novos vetores energéticos nos anos recentes. O destaque dado ao "*Renewable Natural Gas*" e ao "*Hydrogen*", aliado à relevância isolada do termo "*Economy*", aponta a migração da fronteira do conhecimento da produção física para a viabilidade econômica sistêmica e a integração com a economia do hidrogênio.

Conclusão

Os resultados indicam a crescente centralidade do biometano e do *upgrading* de gás de aterro no debate científico sobre transição energética. Esse cenário sinaliza a superação de discussões estritamente operacionais em favor de uma abordagem

sistêmica, integrada aos princípios da Economia Circular. A liderança italiana e o desempenho do Brasil, que ocupa a sexta posição no ranking mundial, mesmo com uma colaboração internacional ainda incipiente, reforçam a relevância geopolítica e a competência científica nacional no setor.

A fronteira do conhecimento deslocou-se do biogás convencional para o conceito de RNG, aproximando-se das discussões sobre RNG e a economia do hidrogênio. Nesse cenário, a literatura recente tem valorizado a diversificação de produtos e a eficiência global dos sistemas produtivos como elementos relevantes para a sustentabilidade futura. Com a maturidade técnica já alcançada nos processos de purificação, a otimização da equação econômica torna-se o requisito central para a expansão do mercado.

Recomenda-se que investigações futuras priorizem o desenvolvimento de modelos de viabilidade para a produção híbrida de biometano e hidrogênio verde, a análise do impacto de instrumentos financeiros, como créditos de carbono e subsídios, na competitividade do RNG, e a condução de estudos de LCA que qualifiquem o biometano como um ativo financeiro sustentável, fundamentado na mensuração do custo ambiental evitado.

Referências

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2023.

ADNAN, A. I. et al. Technologies for biogas upgrading to biomethane: A review. **Bioengineering,** v. 6, n. 4, p. 92, 2019.

ARCANJO, G. S. et al. Biomass and Bioenergy status in Brazil: An overview of the current scenario and future perspectives. **Biomass and Bioenergy**, v. 162, p. 106488, 2022.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p.959-975, 2017.

ARYAL, N. et al. Microbial electrosynthesis applications for future energy systems. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 2901, 2018.

ATELGE, M. R. et al. A critical review of biogas production and usage with various additives. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 40, p. 100738, 2020.

BRITO, J. L. R. DE; MATAI, P. H. L. DOS S.; SANTOS, M. R. DOS. Inovação e a produção do etanol de cana-de-açúcar. **Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)**, v. 15, n. 3, 2024.

BUENO, C. DA S. et al. Biogas upgrading to biomethane in Brazil: Networks, technologies, and industrial pathways. **Sustainable Futures**, v. 10, p. 101423, 2025.

CATALANO, G. et al. Incentive policies in biomethane production toward circular economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 202, p. 114710, 2024.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M. Sustainable management of waste-to-energy facilities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, p. 109262, 2019.

D'ADAMO, I. et al. Bioeconomy for sustainable development of biomethane sector: Potential and challenges for agro-industrial by-products. **Renewable Energy**, v. 215, p. 124332, 2023.

DOS SANTOS, A. G. et al. Biomethane as a Fuel for Energy Transition: Review, Challenges, Opportunities, and Perspectives. **Energies**, v. 17, n. 11, p. 2967, 2024.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2023.

FERELLA, F. et al. Upgrading of biogas to biomethane: The Italian scenario. **Chemical Engineering Transactions**, v. 74, p. 217-222, 2019.

GARCÍA-GUTIÉRREZ, P. et al. Techno-Economic Feasibility of Selective CO2 Capture Processes from Biogas Streams Using Ionic Liquids as Physical Absorbents. **Energy & Fuels**, v. 30, n. 6, p. 5052, 2016.

HUANG, Y. et al. Life cycle assessment of emerging technologies: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 571-585, 2017.

IPCC. **Climate Change 2023 Synthesis Report. Climate Change and Law Collection,** 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/9789004322714_cclc_2023-0258-1193>.

KADAM, R. et al. Recent advancements in biogas upgrading technologies. **Bioresource Technology**, v. 370, p. 128522, 2023.

KHAN, I. U. et al. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy Conversion and Management**, v. 150, p. 277, 2017.

KUMAR, M. et al. Biogas upgrading to biomethane: A review of the state-of-the-art and emerging technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124332, 2021.

LE, T. T. et al. Comprehensive analysis of waste-to-hydrogen technologies integrated with circular economy principles: Potential and challenges. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 139, p. 1054, 2025.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E. Economic analysis of biogas upgrading plants using different technologies. **Energy**, v. 230, p. 120863, 2021.

MARINA, T.; STERLIGOV, I. Prevalence of potentially predatory publishing in Scopus on the country level. **Scientometrics**, v. 126, n. 6, p. 5019, 2021.

MILTNER, M. et al. Economic assessment of biogas upgrading technologies. **Applied Energy**, v. 192, p. 32-44, 2017.

MOLINO, A. et al. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste: Fuel from waste. **Fuel**, v. 103, p. 1003-1009, 2013.

MURPHY, J. D. et al. Cascading biomethane energy systems for sustainable green gas production in a circular economy. **Bioresource Technology,** v. 243, p. 1207-1215, 2017.

OLIVEIRA, U. R. d. et al. Barriers to the diffusion of biogas technologies in Brazil: A circular economy perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 415, p. 137833, 2023.

PIECHOTA, G. et al. Biogas upgrading technologies: state of the art and future perspectives. **Journal of Power Technologies**, v. 93, n. 4, p. 293-305, 2013.

RANIRO, H. R. et al. New investments in phosphorus research and training are paramount for Brazilian long-term environmental and food security. **Environment Systems & Decisions,** v. 43, n. 3, p. 504, 2023.

REHAN, M. et al. Editorial: Waste Biorefineries: Future Energy, Green Products and Waste Treatment. **Frontiers in Energy Research**, v. 7, 2019.

SINGH, D.; SIRINI, P.; LOMBARDI, L. Green Hydrogen Production from Biogas or Landfill Gas by Steam Reforming or Dry Reforming: Specific Production and Energy Requirements. **Energies**, v. 18, n. 10, p. 2631, 2025.

STENTOFT, J.; FREYTAG, P. V. Guest editorial. **European Business Review**, v. 30, n. 2, p. 94, 2018.

ULLAH KHAN, I. et al. Biogas upgrading and utilization as vehicle fuel. **Renewable Energy**, v. 106, p. 1-12, 2017.

VASCO-CORREA, C. A. et al. The anaerobic digestion process: An overview. **Bioresource Technology**, v. 254, p. 320-331, 2018.

WOODLIFFE, J. L. et al. Evaluating the purification and activation of metal-organic frameworks from a technical and circular economy perspective. **Coordination Chemistry Reviews,** v. 428, p. 213578, 15 Oct. 2020.

YOUSAF, S. et al. Hydrogen production from biogas reforming: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 5, p. 2893-2910, 2022.

ZABED, H. et al. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 475-501, 2019.

ZHANG, Y. et al. Global trends in biogas research: A bibliometric analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 325, p. 116521, 2023.

METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO PARA A VALORIZAÇÃO DE LODOS INDUSTRIAIS DENTRO DE UMA ECONOMIA CIRCULAR

1 Mariana Costa Pinto, 2 Marcella Popazoglo Vargas do Nascimento, 3 Vitória de Vargas Guimarães, 4 Sabrina Masseron Sell, 5Flávia Kina Colella Ferro e 6Renato de Castro Valente

1 4Feedstock tecnologia e inovação em sustentabilidade, e-mail: marianacosta@4feedstock.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina curso de Eng. Química, e-mail:marcella.popazoglo.n@gmail.com; 3 Universidade Federal de Santa Catarina curso de Agronomia, e-mail: vitoria.vg@grad.ufsc.br; 4 Universidade Federal de Santa Catarina Programa de Pós Graduação Eng. Química, e-mail: masseronsabrina@gmail.com; 5 Universidade Federal de Santa Catarina curso de Eng. Química, e-mail: flaviakina1@gmail.com; 6 4Feedstock tecnologia e inovação em sustentabilidade, e-mail: renatovalente@4feedstock.com

Palavras-chave: Lodo industrial, economia circular e valorização de resíduos.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo principal evidenciar o potencial de valorização de lodos industriais, a partir do processo de diagnóstico, inovação e valorização de passivos ambientais em ativos industriais, no contexto da economia circular. Utilizando uma metodologia que valida mercado em uma plataforma SIMILIS da startup 4Feedstock Tecnologia e Inovação em Sustentabilidade. Neste modelo, foram analisados lodos de 10 indústrias, a partir da classificação por suas frações gravimétricas e elementares e alinhando-os aos objetivos estratégicos de cada indústria na redução de custos com gestão e destinação e reduções na geração. O estudo validou rotas tecnológicas inovadoras, como a combustão e autodesidratação para lodos de alta carga orgânica e o reaproveitamento da fração inorgânica para mercados agrícolas ou de ligas especiais, demonstrando que a viabilidade da rota de valorização é determinada pelas características intrínsecas do lodo e pelos interesses da indústria geradora atrelados a viabilidades financeiras explorando oportunidades de investimentos, geração de receitas e custos eliminados.

Introdução

As atividades industriais, independentemente do setor produtivo, consomem diariamente grandes volumes de água e consequentemente geram efluentes líquidos que devem ser tratados antes de sua liberação no meio ambiente. Estima-se que a indústria seja responsável por aproximadamente 22% do consumo global de água e por uma parcela significativa da geração de efluentes (UNESCO, 2022). Para atender às exigências legais e minimizar impactos ambientais, esses efluentes passam por etapas físicas, químicas e biológicas que promovem a remoção de contaminantes e a separação entre as fases sólida e líquida. Embora o tratamento permita que o efluente final cumpra os padrões ambientais de descarte, o processo resulta na formação de um subproduto concentrado denominado lodo industrial.

O lodo industrial apresenta composição complexa, com frações sólidas e líquidas, incluindo compostos orgânicos, inorgânicos e químicos diversos, retidos em uma matriz predominantemente úmida, cujo teor de água geralmente varia entre 50% e 85% (ABRELPE, 2023). Pela natureza semissólida, o lodo requer gestão e destinação semelhante à dos resíduos sólidos industriais e são classificados de acordo com critérios de classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 10004. No Brasil, mais de 2 milhões de toneladas de lodos provenientes de tratamento de efluentes industriais são geradas anualmente, e uma parcela significativa ainda é destinada a aterros (CETESB, 2021; ABRELPE, 2023), o que implica custos elevados e desperdício de recursos valiosos.

De acordo com o princípio da conservação de massa, os materiais presentes nos lodos industriais têm origem direta a partir dos insumos utilizados nos processos produtivos ou nos produtos químicos aplicados durante o tratamento de efluentes. Assim, esses resíduos consistem em sólidos de origem custosa e processual ou de tratamento, associados majoritariamente à água, recurso de crescente valor econômico e ambiental. Nessa perspectiva, os lodos industriais podem ser compreendidos como potenciais fontes de recursos mal aproveitados, sendo classificados como resíduos principalmente por estarem em um formato não segregado ou com baixa concentração dos seus componentes de interesse. A economia circular tem o potencial de oferecer uma oportunidade econômica de US$ 4,5 trilhões, reduzindo o desperdício, estimulando a inovação e criando empregos. Assim, a valorização de resíduos é identificada como uma estratégia fundamental para promover a economia circular e atender às demandas de um mercado crescente focado no uso preferencial de matéria-prima secundária nas cadeias produtivas (Ferreira, 2024).

Diversas iniciativas já buscam empregar lodos industriais como insumos em novos processos produtivos. As rotas de valorização mais consolidadas atualmente incluem aplicações em mercados agrícolas, construção civil e geração de energia (SANTOS et al., 2021). Entretanto, inúmeras alternativas tecnológicas com alto potencial permanecem restritas a estágios de pesquisa ou níveis reduzidos de maturidade tecnológica, sem ampla aplicação industrial. Esse cenário decorre principalmente dos riscos de inovação, da falta de garantia de mercado consolidado e dos elevados investimentos necessários para implantação de unidades de valorização. Embora existam rotas consolidadas para a valorização desses resíduos na agricultura e construção civil, a transição para uma escala industrial sustentável enfrenta barreiras ligadas à incerteza técnica e à variabilidade dos materiais. Para mitigar esses riscos, é necessário o desenvolvimento de metodologias que sistematizam a tomada de decisão baseada em evidências que indiquem a melhor rota de valorização.

Para acelerar a transição para a economia circular no setor industrial, torna-se essencial o desenvolvimento de metodologias tecnológicas que permitam validar rotas de valorização de resíduos sob as perspectivas técnica, econômica e financeira, reduzindo

incertezas e possibilitando a tomada de decisão baseada em evidências (ISO 59004, 2024). Inserida nesse contexto, a startup brasileira 4Feedstock Tecnologia e Inovação em Sustentabilidade vem aprimorando soluções voltadas à transformação de resíduos em insumos industriais. A empresa desenvolveu uma tecnologia que integra análise massiva de dados, caracterização de materiais, modelagem de matérias-primas circulares e prototipagem, avaliando a viabilidade do reaproveitamento em mercados reais. Ao aplicar essa metodologia, o foco deixa de ser apenas o tratamento do resíduo já gerado e passa a ser o reaproveitamento e o prolongamento do ciclo de vida dos materiais, transformando o que antes era considerado passivo ambiental em ativos dentro de cadeias produtivas industriais.

O cerne dessa abordagem é a validação do uso de características intrínsecas aos resíduos alinhadas aos objetivos de mitigação de danos apresentados pelos geradores destes passivos. Esta possibilidade de atingimento de interesses das indústrias geradoras de resíduos traz para as rotas tecnológicas uma "energia extra" que muitas vezes pode ser capaz de viabilizar operações que antes não podiam ser operadas em função da falta de viabilidade técnica, econômica e mercadológica. Esta energia está associada a um custo financeiro empregado na gestão e destinação de resíduos que pode vir a ser utilizado como recurso operacional e validar rotas tecnológicas para a valorização de resíduos. Desta forma, tecnologias de processamento existentes que não são operacionais financeiramente em cadeias produtivas podem ser viáveis aplicadas à cadeia de resíduos com a utilização de um recurso, denominado como gate fee. Este gate fee é um valor financeiro pago pela empresa geradora de resíduos para a gestão e destinação que irá passar a ser utilizado na operação de transformação para valorização do resíduo. O Brasil se destaca no processo de valorização de resíduos com objetivos de aplicação de uma economia circular (Cichoski, 2024) onde se observa que não ocorre de forma simples e espontânea; é crucial estabelecer parcerias sólidas e compartilhar conhecimento para identificar potenciais usuários desses resíduos.

A empresa 4Feedstock ainda utiliza uma tecnologia web, a plataforma SIMILIS, um sistema de apoio à decisão que utiliza Big Data e Inteligência Artificial para identificar similaridades físico-químicas e funcionais entre resíduos industriais e matérias-primas convencionais. Desenvolvida em 2024 por meio de um projeto inovador apoiado pela EMBRAPII, FINEP e pela Fundação CERTI, a tecnologia se consolida como um marco nacional no avanço da economia circular, ao ampliar a previsibilidade e a segurança no desenvolvimento de modelos de valorização de resíduos. Desta forma, a empresa tem uma tecnologia de apoio à tomada de decisão para validar rotas tecnológicas e mercados consumidores para o uso de resíduos como insumos industriais.

Neste trabalho, realiza-se um estudo direcionado à identificação do potencial de valorização de lodos industriais com foco na circularidade e reutilização industrial. São avaliadas diferentes possibilidades de processamento, transformação e reuso desses materiais, utilizando como referência a metodologia desenvolvida pela 4Feedstock e exemplos reais de lodos em desenvolvimento tecnológico. Dessa forma, pretende-se estabelecer critérios e estratégias eficazes para avaliação do potencial de valorização, orientando a tomada de decisão sobre rotas de reaproveitamento e ampliando a competitividade de sistemas produtivos sustentáveis. Espera-se que a adoção de metodologias estruturadas contribua para a redução de riscos tecnológicos, mercadológicos e financeiros, ampliando a viabilidade prática da economia circular em escala industrial. Além disso, reforça-se a integração entre indústrias geradoras de resíduos e indústrias consumidoras de insumos, favorecendo o desenvolvimento de cadeias produtivas mais eficientes, com menores impactos ambientais e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

Nesse sentido, este trabalho visa evidenciar o potencial de valorização de lodos industriais por meio da identificação e do reaproveitamento de componentes de valor agregado presentes em sua composição, os quais, atualmente, são destinados à disposição final. Além disso, o trabalho busca atrelar estes processos aos interesses de indústrias geradoras de resíduos de forma a otimizar a possibilidade de validação de gate fee no processo de transformação viabilizando operações tecnológicas. Ao maximizar o reaproveitamento desses materiais, contribui-se para a redução do desperdício de recursos, para o fechamento de ciclos produtivos e para o avanço da economia circular no ambiente industrial. Este trabalho ainda propõe o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de lodos industriais, fundamentada na caracterização quantitativa de frações hídricas, orgânicas e inorgânicas. O objetivo central é estabelecer um protocolo de pré-seleção de rotas tecnológicas a fim de otimizar o reaproveitamento de componentes de valor agregado, transformando passivos ambientais em ativos industriais.

Material e Métodos

A metodologia deste trabalho está baseada em métricas estruturadas, com o objetivo de desenvolver inovação para valorização de resíduos, com foco central na transição para a Economia Circular. Este processo de validação da inovação foi estruturado pela empresa 4Feedstock utilizando consagradas metodologias de design thinking alinhadas à análise de dados intrínsecos e de mercado. O percurso metodológico adota critérios de priorização para a entrega de soluções de alto valor agregado, técnica e economicamente viáveis. Por fim, a validação se consolida em uma análise de dados de mercado geradas de maneira integrada a uma inteligência de dados presentes em uma tecnologia de apoio à tomada de decisão, que utiliza algoritmos para estruturar a melhor e mais vantajosa forma de reutilizar estes passivos ambientais. A tecnologia SIMILIS, plataforma desenvolvida pela empresa 4Feedstock, realiza uma análise de similaridade entre resíduos e insumos industriais de forma a fornecer validações para a viabilidade de rotas tecnológicas de valorização de resíduos.

O estudo foi aplicado a 10 amostras pertencentes a 10 empresas de grande porte (uma amostra por empresa), geradoras de lodos industriais e localizadas de maneira diversificada em todo território nacional. Estas indústrias fornecem amostras de lodos industriais para que se desenvolvam rotas tecnológicas para a valorização de resíduos em um conceito de economia circular com reduções de custos e/ou geração de receitas. Todas as empresas respondem ainda às fichas de alinhamentos de objetivos (FAOs) para que o desenvolvimento tecnológico atenda e agregue valor às necessidades de cada um destes geradores de resíduos. Na FAO, são fornecidos dados da quantidade de geração de lodos, objetivos com a nova rota, custos logísticos, custos de destino, além de interesses em sustentabilidade e barreiras possíveis.

A seleção visou cobrir uma alta variabilidade de cenários e processos de geração de lodos, contando com empresas que geram lodos em diferentes proporções volumétricas desde 10 toneladas/mês até 5.000 toneladas/mês e a partir de diferentes formas de tratamento e geração. As indústrias presentes neste trabalho que geram lodos industriais são classificadas como indústrias de transformação dos segmentos têxtil, papel e celulose, química, higiene e cosméticos, além de indústrias de mineração e empresas de saneamento. Os lodos analisados e tratados seguem a classificação de resíduos sólidos, incluindo lodos industriais, regidos pela norma ABNT NBR 10004:2004.

A viabilidade mercadológica para valorização de lodos foi analisada de acordo com dados inseridos na plataforma SIMILIS e consumo de insumos circulares, assim como agregação de valor a necessidades de clientes, de acordo a metas de sustentabilidade atreladas à economia circular e a reduções nos custos globais de destinação e tratamento de resíduos. Nesse contexto, o processo foi dividido em quatro fases fundamentais, conectando os dados das 10 indústrias à inteligência da plataforma SIMILIS, às rotas tecnológicas validadas do ponto de vista técnico e aos princípios de sustentabilidade.

Nesta fase inicial, realizou-se o diagnóstico sob a ótica de reutilização destes materiais, visando o desenvolvimento de inovações que favoreçam a possibilidade de agregação de valor para uma economia circular. O diagnóstico dos materiais cria uma matriz de exclamação, contendo as principais características dos resíduos de forma a gerar uma base de dados que pode ser replicada e simulada a insumos industriais. Esta metodologia, desenvolvida pela 4Feedstock, permite a análise de similaridade entre resíduos e insumos por meio de técnicas de Big Data dentro da plataforma SIMILIS. As fichas de alinhamento de objetivos (FAOs) realizam a coleta de dados de geração, custos atuais de gestão (transporte e destinação) e indicadores de metas ESG de forma a criar uma estratégia de atingimento de metas e agregação de valor para os clientes geradores.

A 4Feedstock utilizou seu banco de dados de tecnologias de valorização para identificar processos aptos a promover uma transformação nos lodos de forma a atender demandas do mercado para uso do material como insumo. Nesta etapa, definiram-se os componentes de interesse nos lodos e as restrições logísticas/normativas. O objetivo foi a análise de composição estrutural e gravimétrica para determinar se o material permite a reutilização ou se necessita de processamento para reciclagem industrial ou industrialização como coproduto. A tecnologia SIMILIS atua como o motor de inovação para os pilares de reutilização e reciclagem, expandindo as possibilidades de uso através de modelagens de matérias-primas, identificação de similaridades físico-químicas entre os lodos e insumos convencionais e conexão com o mercado. A SIMILIS cruza as características do lodo processado com a demanda real de indústrias consumidoras, identificando quem pode absorver o material como substituto de matéria-prima virgem. A etapa final utilizou métricas de viabilidade para filtrar as oportunidades e selecionar soluções que atendam à hierarquia de potenciais aplicando três filtros críticos: Viabilidade técnica com atendimento aos padrões exigidos pelo mercado identificado pelo SIMILIS. Viabilidade Econômica a partir do comparativo entre o custo de transformação/logística e o custo de oportunidade da destinação atual. Viabilidade Financeira com um estudo de análise financeira dentro de um escopo com investimentos em (CAPEX), custos operacionais (OPEX), receitas (REV) e o lucro sem considerar impostos (EBITDA), garantindo que a rota de valorização seja sustentável a longo prazo para as empresas. A fichas de alinhamento de objetivos coleta dados primários e indicadores de objetivos industriais e uma base de dados oferece opções de valorização dentro de um portfólio de soluções técnicas cadastradas para o processamento de resíduos. Com isso a Plataforma SIMILIS, Tecnologia de Big Data e IA para modelagem de circularidade e conexão entre oferta e demanda, operacionalizam o conceito de valorização de resíduos industriais dentro de uma prática industrial e economia circular.

Resultados e Discussão

A metodologia de análise foi aplicada a um grupo de dez unidades geradoras de lodos, referenciadas neste estudo de forma anônima através das nomenclaturas Indústria A até Indústria J ordenadas do menor gerador para o maior gerador**.** Esta codificação visou preservar o sigilo comercial dos clientes, sem comprometer o rigor técnico da análise de dados. A seleção destas dez unidades visou também cobrir uma alta variabilidade de cenários, englobando indústrias de transformação dos segmentos têxtil, papel e celulose, química, higiene e cosméticos, além de setores de mineração e saneamento.

A análise dos resultados obtidos para as dez indústrias parceiras da 4Feedstock reflete a aplicação metodológica para a valorização dos resíduos. A metodologia permitiu mapear uma amostragem heterogênea, englobando desde indústrias de transformação até empresas de saneamento, com volumes de geração variando entre 10 e 5.000 t/mês. Esta variabilidade é fundamental para a fase de desenvolvimento, em que os dados laboratoriais de umidade e composição química foram processados pela tecnologia SIMILIS para a proposição de rotas tecnológicas personalizadas.

Uma análise comparativa entre o diagnóstico da situação atual de geração, gestão e destinação de lodos industriais assim como os principais objetivos fornecidos pelas empresas na FAO participantes deste trabalho informam que: Majoritariamente as empresas buscam a redução nos custos de gestão e destinação dos lodos industriais além de possibilidades de redução na geração dos lodos. As indústrias são questionadas quanto a seus interesses em redução na geração, redução de custos logísticos e custos de destino final, esta distribuição pode ser observada no gráfico da Figura 1(a). Além disso, as empresas são orientadas a informar o peso em que estas alterações geram maior valor para a empresa expressos pelo tamanho da coluna no gráfico da Figura 1. Foi possível notar que existe uma relação direta entre o volume gerado pelo lodo e os interesses na redução dos custos onde, empresas que geram menores quantidades de lodo expressam maior interesse na redução de custos de destino enquanto empresas que geram maiores quantidades de lodo demonstram interesse na redução da geração e redução de custos logísticos.

Também foi diagnosticado que os custos globais de gestão destes materiais têm uma distribuição parelha entre custos logísticos e custos de destino final. Para empresas em que a geração do lodo é inferior a 50 toneladas / mês, o custo de destinação tem maior peso no custo global. A partir de uma geração superior a 500 toneladas / mês, os custos logísticos têm maior peso do que os

custos de destinação. Este resultado demonstra que não somente as características intrínsecas ao material definem a melhor estratégia de agregação de valor às indústrias geradoras. A ordem de grandeza na geração do lodo tem interferência direta no objetivo de alteração de rota tecnológica ou forma de repensar o passivo ambiental. Para os menores geradores, torna-se viável o aumento do raio logístico na busca de uma rota que reduza valores de destinação e possa reutilizar o material como insumo. Para os maiores geradores, a viabilidade de uma rota tecnológica que reduza a geração ganha atratividade em comparação com destinos finais de menor valor.

A análise das amostras de lodo industrial e sanitário revelou uma heterogeneidade acentuada, característica da diversidade de processos produtivos contemplados nesta pesquisa. Para todos os materiais analisados existem características que os diferenciam uns dos outros no que tange à composição gravimétrica e elementar, gráfico da Figura 1 (b) e (c). Estas características são os principais fatores intrínsecos que definem um diagnóstico para apoio à tomada de decisão da alteração de rota. A análise gravimétrica relaciona o lodo de acordo com as suas frações de umidade, orgânicos e inorgânicos. Enquanto a análise elementar observa a constituição majoritária dos elementos e moléculas inorgânicas.

A elevada fração de umidade pertencente nos lodos é consequência da sua formação original que provém de processos de tratamento de efluentes com uso de tecnologias consolidadas há décadas. Estas tecnologias são desenvolvidas para o atendimento de padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e/ou reuso da fração líquida, segundo a normativa CONAMA nº 430/2011. Nesse contexto, os sistemas de separação sólido-líquido são projetados com foco na qualidade do efluente tratado, não contemplando, em geral, critérios voltados à qualidade, ao reaproveitamento ou à minimização da fração sólida gerada. Tratamentos físico-químicos, como coagulação, floculação, decantação, sedimentação, e tratamentos biológicos, como lodos ativados, biodigestores e tratamentos específicos de precipitação ou lavagem, são todos destinados ao atingimento das normas sem considerarem a possibilidade de valorização dos subprodutos gerados.

Para que não somente os efluentes tratados atinjam padrões que possibilitam sua valorização e reuso, mas também se criem métodos de valorização dos subprodutos gerados, faz-se necessário uma análise crítica e metodológica para definição de rotas e viabilidades de valorização de lodos. Para gerar um padrão analítico referente às gravimetrias, a 4Feedstock realizou uma definição entre os 3 materiais presentes (água, orgânicos e inorgânicos) e desta forma criar um número de fração gravimétrica que considera lodos com elevada carga de umidade, orgânicos e inorgânicos. Considera-se lodos com elevada carga de umidade (LEH) quando apresentam mais de 80% de água. Lodos com elevada carga orgânica (LEO) quando apresentam mais de 80% dos sólidos contendo material orgânico, e lodos com elevada carga inorgânica (LEI) aqueles com mais de 20% dos sólidos contendo frações inorgânicas. Este padrão é definido na análise de viabilidade como LV25-4Feedstock e ajuda a alimentar a tecnologia para apoio à tomada de decisão. Desta forma, foi possível realizar um mapeamento gravimétrico das características de cada um destes lodos quanto a suas proporções. Foi possível notar que três dos 10 blocos analisados apresentam padrão LEH com elevada fração de umidade, enquanto para LEO e LEI ambos apresentaram 5 lodos entre os 10 analisados como observado no gráfico da Figura 1(d).

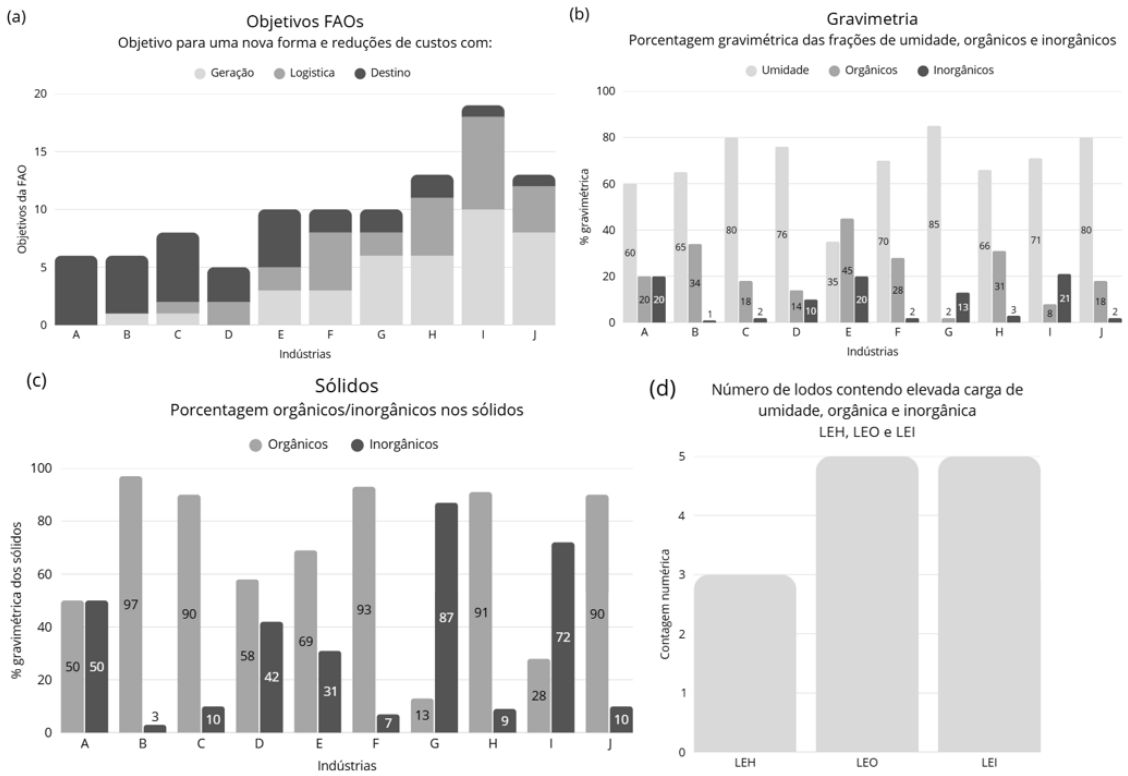


Figura 01: Gráfico analítico das caracterizações de lodos industriais onde é possível classificar (a) os interesses da indústria geradora em relação a nova rota de valorização, (b) a distribuição gravimétrica dos lodos industriais, (c) a fração orgânicos e inorgânicos nos sólidos, (d) uma contagem de classificação de lodos de acordo com a sua gravimetria. Fonte: Análises internas de caracterização e modelagem de matéria-prima 4Feedstock (2025)

A padronização de uma metodologia tipo a LEV25-4Feedstock ajuda na tomada de decisão e escolha de rota de valorização. No entanto, faz-se necessário uma análise mais profunda sobre os parâmetros e as características dos lodos para uma orientação nos processos de valorização. Assim, a 4Feedstock realizou uma análise termodinâmica buscando explorar o potencial energético atrelado à fração orgânica nos lodos, assim como, uma análise elementar da fração inorgânica buscando uma possibilidade de explorar características de valor nestes complexos minerais.

A análise do potencial energético dos lodos está intrinsecamente ligada à relação entre o teor de sólidos voláteis, proveniente da fração orgânica e a umidade residual. Resíduos de lodos caracterizados como do tipo LEO, que apresentaram frações orgânicas superiores a 80% dos sólidos, demonstraram um elevado potencial de geração de energia tanto na forma de gases como no processo de combustão. Metodologias de digestão de lodos são atualmente utilizadas para geração de biogás e/ou biometano a partir de diversos resíduos industriais, agroindustriais ou sanitários. Para analisar o potencial da carga orgânica presente nos lodos, faz-se necessário uma análise de Potencial Bioquímico de Metano (BPM) presente nos lodos, na qual se determina o volume de metano produzido por quantidade de sólidos voláteis. Este resultado informa um potencial teórico de produção de Metano a partir da biodigestão dos orgânicos. No entanto, também é necessária uma análise da cinética da reação assim como sua eficiência. A relação de composição Carbono e Nitrogênio ajuda a analisar esta viabilidade onde uma relação C/N compreendida entre 20:1 e 30:1 são ideais para a biodigestão. No entanto, a natureza industrial dos lodos analisados neste trabalho não favorece a obtenção de uma relação C/N adequada para processo de biodigestão. Outro fator que se apresenta como barreira para estas tecnologias são os rendimentos no processo de conversão e valores de mercado para biogás e biometano que são puxados para baixo quando concorrem com o GNV.

No presente estudo, observou-se que a natureza intrínseca dos lodos industriais analisados com tipologias LEO e LEH impõe barreiras severas à biodigestão. A relação Carbono/Nitrogênio (C/N), cujo intervalo ideal para estabilidade metanogênica situa-se entre 20:1 e 30:1, não foi atingida em nenhuma das amostras, as quais apresentaram razões inferiores a 5:1. Esta deficiência nutricional, somada à baixa competitividade econômica do biogás frente ao Gás Natural Veicular (GNV) e aos rendimentos limitados de conversão, reduz a atratividade da biodigestão para estas matrizes específicas.

No entanto, existem outras possibilidades de exploração do potencial energético da fração orgânica de lodos a partir de processo de combustão direta ou indireta. Grandes indústrias já empregam este potencial para a geração de calor e consequente valorização a partir de misturas e desidratação. Por outro lado, o potencial energético para fins de termovalorização, como combustão, incineração ou coprocessamento, enfrentam o desafio da alta umidade. Para que o poder calorífico seja viável em processos de valorização energética, por vezes faz-se necessário fontes de calor auxiliares para promover a redução da umidade e consequente viabilidade de combustão dos lodos. Foi possível identificar, no gráfico da Figura 2(a), que os materiais caracterizados como LEO e LEH, a energia intrínseca presente nos sólidos atingem valores da ordem de PCI: 5.500 kcal/kg quando em frações reduzidas de umidade. No entanto, a energia necessária para a vaporização da umidade reduz este potencial para valores de PCI: 1.200 a 1.500 kcal/kg e depende da fração orgânica nos sólidos. A densidade energética do material apresenta uma relação inversamente proporcional à umidade presente e pode ser modelada como uma relação linear, sempre que a densidade da fração de sólidos for similar à densidade da água. Também foi possível verificar que a densidade energética tem uma relação direta com a fração orgânica presente nos sólidos, o que valida o processo para lodos LEO e LEH, porém dificulta a desidratação em lodos LEI. Além disso, foi possível estimar que em processos termodinâmicos de eficiência térmica moderada, da ordem de eficiência: 50%, torna-se possível utilizar o potencial energético da fração orgânica dos lodos para secar o mesmo lodo em um processo de autodesidratação. Esta rota tecnológica se torna viável para LEOs e alguns lodos LEH sempre que também apresentem elevada carga orgânica. A 4Feedstock realizou um estudo piloto, no qual foi possível identificar um padrão de valorização para a autodesidratação com um padrão termodinâmico que favorece aos LEOs sua autodesidratação com custos operacionais reduzidos. Esta análise está considerando a energia necessária para desidratar lodos de valores de umidade de 80% até uma umidade U inferior. Para lodos LEH, o processo também pode ser empregado com a simples adição de uma fração energética extra em um balanço de massa que ainda promove redução de custos operacionais e geração de Lodo.

Por último, a fração inorgânica presente nos lodos e em maior concentração nos LEIs também pode ser utilizada como ferramenta de análise crítica e viabilidade de rota de valorização. Para os lodos analisados neste trabalho, foi realizada uma análise elementar por fluorescência de raios-X em todos os 10 lodos. Entre os materiais e compostos minerais que mais trazem valor de mercado em processo de valorização de resíduos, os mercados agrícolas e siderúrgicos para ligas especiais são os que apresentam maior potencial.

No setor agronômico, os nutrientes são elementos químicos essenciais retirados do solo pelas plantas para completar seu ciclo biológico. Eles são classificados em macronutrientes e micronutrientes com base na quantidade demandada pela cultura, e não pela sua importância, já que a falta de qualquer um deles limita o desenvolvimento vegetal. Macronutrientes são exigidos em grandes quantidades (g/kg de matéria seca) e possuem funções estruturais e energéticas vitais. Macronutrientes primários, como Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK), são fundamentais para o crescimento vegetativo, a síntese proteica, o armazenamento de energia (ATP) e a regulação osmótica. Paralelamente, os macronutrientes secundários, como Cálcio, Magnésio e Enxofre, desempenham papéis cruciais na integridade da parede celular, na constituição da molécula de clorofila e na síntese de aminoácidos essenciais.

No mercado de siderurgia e de ligas especiais, os elementos de liga são adicionados ao ferro ou a outros metais-base para conferir propriedades mecânicas e químicas superiores, tais como resistência à corrosão e dureza. No processo de valorização de resíduos, destacam-se elementos com alto potencial para a indústria siderúrgica, como Ferro (Fe), Níquel (Ni), Manganês (Mn), Zinco (Zn), Cobre (Cu) e Cromo (Cr). Para elementos de elevado valor agregado presentes em frações minoritárias nos sólidos

inorgânicos dos lodos, as rotas de concentração ainda podem ser viáveis para presenças de Cobalto (Co), Prata (Ag), Titânio (Ti), Platina (Pt), Molibdênio (Mo). Para lodos da classe dos LEI, a identificação do mercado de destino depende essencialmente da composição e fração dos componentes, que podem ser direcionados tanto ao setor agronômico quanto ao de ligas especiais. Por outro lado, a fração inorgânica também pode conter elementos provenientes dos insumos utilizados no tratamento de efluentes, com baixo potencial de reaproveitamento. Compostos como óxidos de silício, alumínio, Ferro, Bário e Chumbo são frequentemente identificados como contaminantes, dificultando ou inviabilizando o processo de valorização do resíduo.

Para gerar um padrão analítico referente às frações inorgânicas, a 4Feedstock definiu um padrão de viabilidade na tomada de decisão para as rotas de valorização de acordo com a composição inorgânica dos sólidos. O Padrão LVI25-4Feedstock define como: Lodos com potencial agrícola (LPA), aqueles que apresentam mais de 80% dos sólidos contendo macro e micronutrientes e sem a presença de contaminantes críticos; Lodos com potencial de ligas (LPL), que apresentam mais de 35% de sólidos contendo elementos de liga; e, lodos contaminados (LC) quando não atingem níveis de LPA nem LPL em função da presença de contaminantes nos sólidos e sua contagem apresentada no gráfico da Figura 2(b).

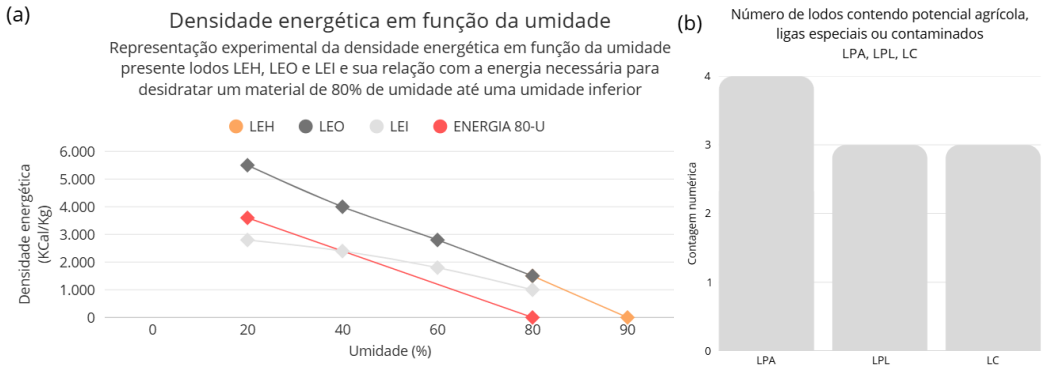


Figura 02: Gráficos analíticos de potencial de valorização de lodos para rotas tecnológicas de (a) combustão e autodesidratação em função da umidade presente nos lodos e (b) uma contagem de classificação numérica de lodos de potencial agronômico e ligas especiais assim como lodos contaminados.
Fonte: Equipe 4Feedstock (2026)

Diante deste contexto, é possível observar que com o uso da metodologia LV25-4Feedstock e LVI25-4Feedstock em paralelos aos interesses na agregação de valor apresentados em fichas de alinhamentos de objetivos FAOs expostos pelas empresas participantes deste trabalho, foi possível modelar um algoritmo da tomada de decisão para viabilizar processos de valorização de lodos. As possibilidades de processamento para valorização de resíduos industriais com rotas energéticas com biodigestão, desidratação, autodesidratação, mercados agronômicos e ligas especiais assim como outras possibilidades disruptivas com maiores inversões financeiras. Todos os materiais podem vir a ser valorizados nas rotas tecnológicas citadas do ponto de vista técnico, gráfico da Figura 3(a). No entanto, suas características intrínsecas favorecem a viabilidade e atendimento aos interesses das indústrias geradoras. A avaliação de diagnóstico de características reduz os riscos de desenvolvimento de projetos que não atinjam viabilidade tanto técnica como econômica e financeira. Tecnologias e processamentos que muitas vezes são utilizados dentro de outros cenários atrelados a mercados de maior valor agregado podem vir a serem viáveis com o uso de um gate fee inferior aos custos atuais de gestão e destinação. Esta análise reflete que o processo de valorização de resíduos pode ser visto como a criação de um modelo de negócios, no qual valores financeiros de investimentos (CAPEX), custos operacionais (OPEX), receitas (REV) e o lucro sem considerar impostos (EBITDA) devem ser analisados de maneira a dar suporte na tomada de decisão e escolha do modelo e rota, como observado nos gráficos da Figura 3(b) e (c).

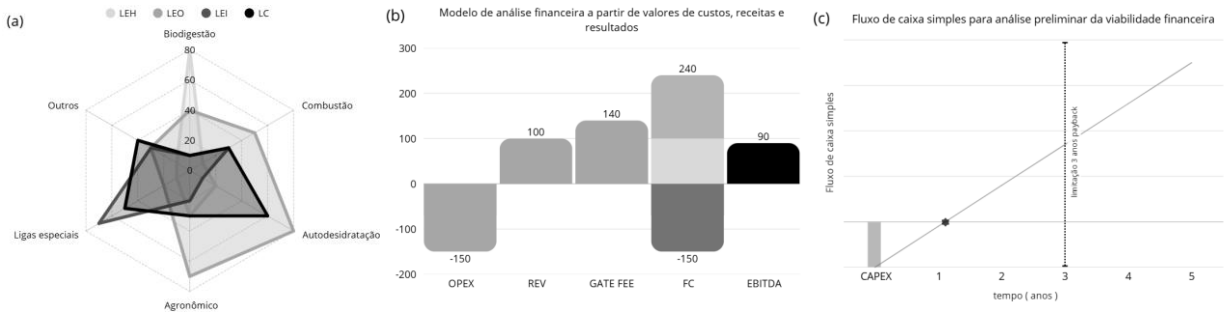


Figura 03: Comparação multicritério entre diferentes rotas tecnológicas de valorização (a); modelo simplificado de análise financeira considerando custos operacionais (OPEX), receitas (REV), gate fee e fluxo de caixa (FC), com avaliação do lucro operacional antes de impostos (EBITDA) (b); (c) fluxo de caixa ao longo do tempo para avaliação preliminar da viabilidade econômica, considerando o investimento inicial (CAPEX) e o período de retorno do projeto.
Fonte: Equipe 4Feedstock (2026)

Ademais, o emprego de ferramentas de análise de dados e de apoio à decisão permite verificar a similaridade entre resíduos e insumos. A partir de uma matriz de exclamação de características, é possível validar o mercado de destino e identificar indústrias consumidoras de insumos análogos. Essa abordagem garante maior assertividade no desenvolvimento de rotas tecnológicas e impulsiona inovações no reaproveitamento de resíduos, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 04: Imagem demonstrativa da plataforma SIMILIS, à esquerda a matriz de exclamação de resíduos e à direita a matriz de exclamação de insumos circulares e ao centro o emparelhamento entre ambos.
Fonte: Equipe 4Feedstock (2026)

Considerações Finais

Este trabalho consolidou que o potencial de valorização de lodos industriais depende da integração entre suas características intrínsecas (gravimétricas e elementares, conforme os padrões LV25-4 e LVI25-4) e os objetivos logístico-financeiros das indústrias. A viabilidade das rotas, como a autodesidratação para lodos orgânicos (LEO e LEH) ou o reaproveitamento de frações inorgânicas nos setores agrícola e de ligas especiais (LEI, LPL e LPA), é condicionada pela escala de geração e pelos custos de destinação. Conclui-se que o uso de metodologias estruturadas e ferramentas de Big Data/IA, a exemplo da plataforma SIMILIS, é fundamental para mitigar riscos e otimizar a tomada de decisão. Essa abordagem transforma passivos ambientais em ativos industriais, acelerando a transição para a economia circular.

Agradecimentos

Para o desenvolvimento deste presente trabalho, faz-se necessário o agradecimento à empresa 4Feedstock pelo fornecimento dos materiais para o estudo e o financiamento das atividades técnicas relacionadas a análises experimentais e estudos. Também se agradece à FINEP, à EMBRAPII e à Fundação CERTI pelo apoio financeiro e tecnológico no desenvolvimento da plataforma SIMILIS. Agradecimento especial a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo fornecimento de infraestrutura e recursos humanos.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABRELPE, 2023.

CETESB (São Paulo). **Inventário Estadual de Resíduos Industriais**. São Paulo: CETESB, 2021.

CICHOSKI, T. **Industrial waste valorization**: Contributions to achieving the SDGs in Brazil. Case Study for the Multistakeholder Forum on Science, Technology and Innovation for the SDGs, [*S. l.*], May 2024.

FERREIRA, N. **The role of waste valorization in the transition to the circular economy**. Science-Policy Brief for the Multistakeholder Forum on Science, Technology and Innovation for the SDGs, [*S. l.*], May 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 59004**: Circular Economy — Terminology, principles and guidance for implementation. Geneva: ISO, 2024.

SANTOS, J. *et al*. Industrial sludge valorization: challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, [*S. l.*], v. 320, p. 128903, 2021.

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2022**: Groundwater: Making the Invisible Visible. Paris: UNESCO, 2022.

AVALIAÇÃO SOCIOAMBIENTAL DE UMA EMPRESA DE RECICLAGEM COM INCLUSÃO DE MÃO DE OBRA PRISIONAL: UM ESTUDO DE CASO

1 Cristiane Panari da Silva, 2 José Braz de Oliveira Junior, 3 Marcia Vilma Gonçalves de Moraes, 4 Isadora Alves Lovo Ismail, 5 Marília Vasconcellos Agnesini

1 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: cristiane.apanari@sou.unaerp.edu.br; 2 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: jose.oliveirajunior@sou.unaerp.edu.br; 3 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: marcia.moraes@sou.unaerp.edu.br; 4 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: iismail@unaerp.br; 5 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: magnesini@unaerp.br

Palavras-chave: inclusão social; sistema prisional; economia circular.

Resumo

O aumento da geração de resíduos sólidos urbanos, associado à urbanização e ao crescimento populacional, tem intensificado os desafios relacionados à gestão ambiental e à destinação adequada desses materiais. Nesse contexto, a reciclagem surge como uma estratégia fundamental para a mitigação de impactos ambientais e promoção da economia circular. Paralelamente, a inclusão social de grupos em situação de vulnerabilidade, como pessoas privadas de liberdade, constitui um desafio relevante no cenário brasileiro, especialmente no que se refere à reintegração social e redução da reincidência. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar o modelo operacional de uma empresa de reciclagem que integra pessoas privadas de liberdade em suas atividades produtivas, avaliando suas contribuições sob as dimensões ambiental, social e operacional. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada, com abordagem quali-quantitativa, envolvendo pesquisa bibliográfica, análise documental, observação direta e acompanhamento das atividades operacionais. Os resultados indicaram que a empresa apresenta uma média de processamento de aproximadamente 295 toneladas de resíduos recicláveis por mês, com produtividade estimada em 134 kg por trabalhador por dia. Observou-se também uma redução progressiva na geração de rejeitos, associada à melhoria na eficiência da triagem. No âmbito social, a empresa incorpora 20 pessoas privadas de liberdade em suas atividades, promovendo inclusão produtiva, geração de renda e desenvolvimento de habilidades. A análise evidenciou ainda contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 8, 11, 12 e 13. Conclui-se que o modelo analisado apresenta potencial para integrar gestão de resíduos e inclusão social, demonstrando que iniciativas no setor de reciclagem podem contribuir simultaneamente para a sustentabilidade ambiental, eficiência operacional e ressocialização. Apesar dos desafios identificados, o modelo mostra-se promissor e com potencial de replicabilidade em outros contextos.

Introdução

O crescimento do consumo, aliado à intensificação da urbanização e ao aumento populacional, tem provocado uma elevação expressiva na geração de resíduos sólidos, configurando-se como um dos principais desafios ambientais contemporâneos. Estimativas do *United Nations Environment Programme* (UNEP) indicam que mais de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos são geradas anualmente no mundo, com projeção de alcançar 3,8 bilhões de toneladas até 2050, caso persistam padrões insustentáveis de produção, consumo e gestão (UNEP, 2024). No Brasil, de acordo com dados da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), esse cenário se agrava diante da geração de aproximadamente 81,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2024, evidenciando a magnitude do desafio relacionado à gestão desses materiais. Ainda assim, a destinação final ambientalmente adequada permanece um entrave significativo, uma vez que cerca de 40,3% dos resíduos encaminhados à disposição final ainda apresentam destinação inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, práticas que resultam em impactos ambientais relevantes, como contaminação do solo e dos recursos hídricos, além da emissão de gases de efeito estufa (ABREMA, 2025), evidenciando a persistência de desafios estruturais no gerenciamento de resíduos no país.

Neste cenário, torna-se urgente a transição de modelos lineares de gestão de resíduos para abordagens fundamentadas nos princípios da economia circular, priorizando a prevenção, a recuperação e a valorização dos materiais. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, representa um marco importante ao estabelecer diretrizes para a gestão integrada e o incentivo à reciclagem e à logística reversa. Contudo, apesar dos avanços normativos, ainda persistem entraves estruturais relacionados à articulação entre o poder público, empresas privadas, cooperativas e demais agentes da cadeia da reciclagem, além da insuficiência de infraestrutura e da fragilidade dos mecanismos de avaliação e monitoramento.

Portanto, a reciclagem destaca-se como uma estratégia fundamental para mitigar os impactos ambientais dos resíduos sólidos urbanos, reduzir a demanda por matérias-primas virgens e diminuir a pressão sobre os aterros sanitários. As empresas de reciclagem assumem papel estratégico no fechamento do ciclo dos materiais, atuando na coleta, triagem, processamento e comercialização dos recicláveis. Para além dessas funções tradicionalmente associadas à dimensão ambiental, tais organizações desempenham um papel ampliado no contexto do desenvolvimento sustentável, ao contribuírem para a redução da disposição de resíduos em aterros e para o prolongamento de sua vida útil. Além disso, assumem relevante função social ao promoverem a inclusão produtiva de trabalhadores historicamente marginalizados no mercado formal, como pessoas com baixa qualificação profissional, egressos do sistema prisional e ex-catadores, favorecendo a geração de renda e a redução de desigualdades sociais.

Nesse contexto, destaca-se também a relevância de iniciativas que integrem a gestão de resíduos sólidos a estratégias de inclusão social voltadas a grupos em situação de vulnerabilidade, como pessoas privadas de liberdade. O sistema prisional brasileiro apresenta desafios relacionados à oferta limitada de trabalho e qualificação profissional, dificultando os processos de reintegração social. Nesse contexto, a inserção de pessoas privadas de liberdade em atividades produtivas, como a reciclagem, apresenta-se como estratégia promissora ao integrar benefícios ambientais e sociais.

Diante do exposto, observa-se que, embora haja avanços normativos e crescente reconhecimento da economia circular como estratégia para a gestão sustentável de resíduos sólidos, ainda são incipientes os estudos que analisam de forma integrada iniciativas capazes de articular desempenho ambiental, eficiência operacional e inclusão social de grupos em situação de vulnerabilidade, especialmente pessoas privadas de liberdade. Nesse sentido, permanece a lacuna quanto à compreensão de como modelos produtivos que incorporam mão de obra prisional podem contribuir simultaneamente para a melhoria dos sistemas de reciclagem e para processos efetivos de ressocialização. Assim, este estudo tem como objetivo analisar, por meio de um estudo de caso, o modelo operacional de uma empresa de reciclagem que integra pessoas privadas de liberdade em suas atividades, avaliando suas contribuições para a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos sob as dimensões ambiental, social e operacional, bem como identificando seus principais benefícios, limitações e potencial de replicabilidade.

Material e Métodos

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem quali-quantitativa e caráter exploratório e descritivo, envolvendo etapas de pesquisa bibliográfica, análise documental, estudo de caso e pesquisa de campo. Trata-se de uma pesquisa aplicada, de abordagem quali-quantitativa, com caráter exploratório e descritivo, utilizando estudo de caso como estratégia metodológica (Yin, 2015). Nesse sentido, o objeto de análise deste estudo consiste no modelo operacional de uma empresa do setor de reciclagem que integra mão de obra prisional em suas atividades produtivas, contemplando as etapas de coleta, triagem e destinação de resíduos recicláveis. Essa abordagem possibilita a análise aprofundada das dimensões ambiental, social e operacional do sistema estudado, por meio da coleta e integração de dados qualitativos e quantitativos.

Delimitação do estudo

O estudo foi conduzido no período de outubro de 2025 a março de 2026, compreendendo as etapas de coleta de dados, acompanhamento das atividades operacionais e análise das informações obtidas. A delimitação temporal foi definida de modo a contemplar a rotina produtiva da empresa em condições representativas de operação, permitindo a observação das variações no desempenho e na dinâmica de trabalho.

A pesquisa foi realizada em uma empresa do setor de reciclagem localizada no município de Ribeirão Preto, interior do estado de São Paulo, que atua nas etapas de coleta, triagem e destinação de resíduos recicláveis. A empresa foi selecionada por apresentar um modelo operacional que integra pessoas privadas de liberdade em suas atividades produtivas, configurando-se como um caso relevante para análise sob a perspectiva da sustentabilidade ambiental e da inclusão social.

Coleta de dados

Para a coleta de dados, foram utilizados diferentes instrumentos, de modo a possibilitar a triangulação das informações. Foram realizadas visitas técnicas *in loco*, com observação direta e sistemática das atividades operacionais, registradas por meio de diário de campo. Também foram analisados documentos institucionais e registros internos da empresa, incluindo planilhas de controle de produção e relatórios operacionais. Adicionalmente, foi realizado o acompanhamento do desempenho diário das atividades, com registro de indicadores relacionados à produtividade, volume de resíduos processados e participação dos trabalhadores no processo produtivo. Quando aplicável, foram consideradas informações obtidas por meio de interações informais com gestores e trabalhadores, contribuindo para a compreensão qualitativa do funcionamento do sistema. Foram realizadas 5 visitas técnicas in loco ao longo do período de estudo, com frequência média quinzenal, permitindo o acompanhamento sistemático das atividades operacionais. Além disso, foram conduzidas 2 entrevistas semiestruturadas com gestores da empresa e interações informais com trabalhadores, utilizadas como suporte para a análise qualitativa dos resultados.

Avaliação e relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A avaliação dos resultados obtidos foi realizada com base na sua relação com os ODS, estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, considerando especialmente os ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

Para essa análise, os indicadores levantados ao longo do estudo foram organizados em três dimensões principais: ambiental, social e operacional. A dimensão ambiental contemplou variáveis como volume de resíduos reciclados e redução da destinação em aterros; a dimensão social considerou aspectos relacionados à inclusão produtiva de pessoas privadas de liberdade, como número de trabalhadores envolvidos e participação nas atividades; e a dimensão operacional envolveu indicadores de produtividade e eficiência das etapas do processo.

A relação com os ODS foi estabelecida por meio da análise qualitativa dos resultados obtidos, associando os indicadores observados às metas correspondentes de cada objetivo. Essa abordagem permitiu avaliar de que forma o modelo estudado contribui para a promoção do desenvolvimento sustentável em nível local, evidenciando suas potencialidades e limitações no atendimento às diretrizes da Agenda 2030.

Resultados e Discussão

Caracterização do processo operacional

A empresa atua na coleta, triagem e destinação de resíduos recicláveis, incluindo papel, plástico e metais. O processo envolve recebimento, separação por tipologia e enfardamento para envio às indústrias recicladoras (Figura 01).

A capacidade operacional da empresa é de aproximadamente 300 toneladas por mês, evidenciando sua relevância no contexto local da gestão de resíduos e sua contribuição para a redução da disposição em aterros sanitários. A triagem dos materiais é realizada de forma setorizada, com organização por tipo de resíduo, o que favorece a eficiência do processo e a qualidade dos materiais destinados à reciclagem.

A organização do trabalho é estruturada de modo integrado, envolvendo tanto funcionários da empresa quanto pessoas privadas de liberdade, que atuam conjuntamente nas atividades operacionais. Observou-se que todos os trabalhadores recebem treinamento prévio e utilizam equipamentos de proteção individual (EPIs), assegurando condições adequadas de segurança no ambiente de trabalho. Essa estrutura contribui não apenas para a eficiência operacional, mas também para a padronização das atividades e redução de riscos ocupacionais.

De modo geral, o modelo operacional adotado pela empresa demonstra alinhamento com os princípios da economia circular, ao promover a recuperação e valorização de resíduos, além de evidenciar potencial para integração entre desempenho produtivo e inclusão social.

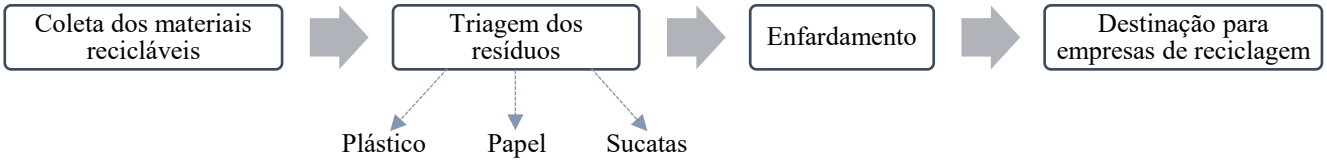


Figura 01:Fluxograma das etapas do processo operacional da empresa de reciclagem.

O layout operacional da empresa é organizado em setores distintos, compreendendo área de recebimento dos resíduos, esteiras de triagem, setor de separação por tipologia de material (papel, plástico e metais) e área de prensagem/enfardamento. As atividades são realizadas em jornada diária de aproximadamente 8 horas, de segunda a sexta-feira, organizadas em turnos fixos. Os trabalhadores utilizam equipamentos de proteção individual (EPIs), incluindo luvas de segurança, botas, uniformes, protetores auriculares e, quando necessário, máscaras de proteção contra poeira. A inserção das pessoas privadas de liberdade ocorre por meio de parceria com o sistema prisional regional, seguindo diretrizes legais para trabalho externo, incluindo supervisão, controle de frequência e remuneração conforme legislação vigente.

Desempenho ambiental

Durante o período analisado (outubro de 2025 a março de 2026), a empresa apresentou um volume expressivo de resíduos recicláveis processados, conforme apresentado na Figura 02. Observa-se uma relativa estabilidade operacional ao longo do período, com leve aumento no mês de dezembro, possivelmente associado à maior geração de resíduos decorrente de atividades comerciais sazonais. A média mensal de resíduos reciclados no período foi de aproximadamente 295 toneladas, evidenciando a capacidade consistente da empresa em manter níveis elevados de processamento de materiais recicláveis. Esse desempenho reforça o papel da organização na redução da disposição de resíduos em aterros sanitários e na promoção da economia circular.

Além do volume processado, observou-se redução progressiva na geração de rejeitos ao longo do período analisado, estimada qualitativamente a partir dos registros operacionais e observações de campo. Essa melhoria esteve associada à padronização da triagem, organização setorial dos materiais e capacitação contínua dos trabalhadores, resultando em maior precisão na separação e menor encaminhamento de materiais recicláveis para rejeito. Ainda que não tenham sido mensurados percentuais exatos, a tendência de redução foi consistente ao longo das visitas realizadas.

Esse resultado evidencia não apenas ganhos ambientais diretos, como a redução da pressão sobre sistemas de disposição final, mas também melhorias na qualidade do processo, com potencial aumento do valor agregado dos materiais recicláveis comercializados. Dessa forma, a eficiência da triagem configura-se como um fator estratégico para o desempenho ambiental e econômico da empresa.

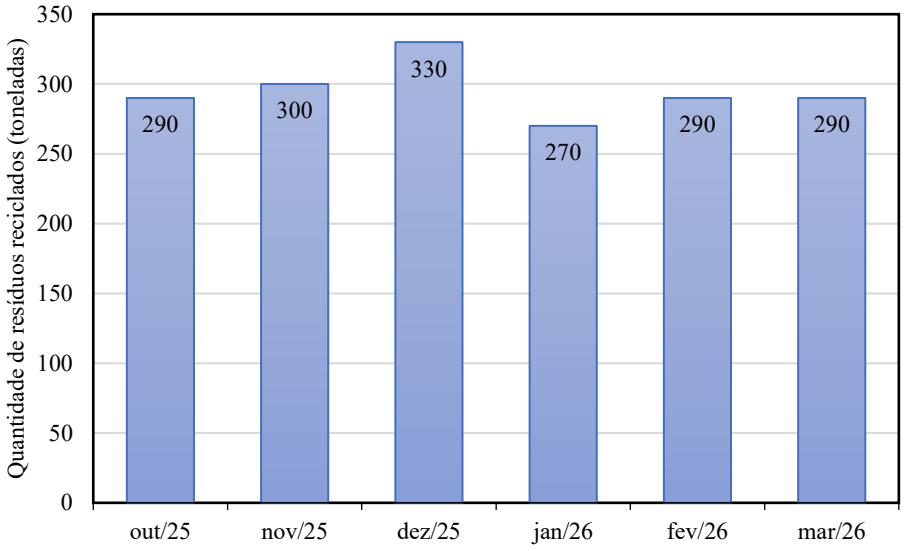


Figura 02: Quantidade de resíduos coletados e destinados a reciclagem, no período analisado.

Desempenho operacional

O desempenho operacional da empresa foi avaliado a partir da análise da produtividade e da organização das atividades ao longo do período estudado. Considerando o total de aproximadamente 100 trabalhadores envolvidos nas atividades produtivas e a média mensal de cerca de 295 toneladas de resíduos recicláveis processados, estimou-se uma produtividade média de aproximadamente 134 kg por trabalhador por dia, considerando uma rotina operacional de segunda a sexta-feira. Esse resultado indica um desempenho operacional consistente e compatível com empreendimentos de médio porte no setor de reciclagem, evidenciando a capacidade da empresa em manter níveis elevados de processamento de materiais. A organização das atividades em setores específicos por tipo de resíduo, aliada à divisão das tarefas entre os trabalhadores, mostrou-se um fator determinante para a eficiência do processo.

Observou-se que a triagem é realizada de forma sistemática e criteriosa, o que contribui tanto para a melhoria da qualidade dos recicláveis quanto para a redução da fração de rejeitos. Esse aspecto está diretamente relacionado ao aumento da eficiência operacional, uma vez que reduz retrabalho e otimiza o aproveitamento dos resíduos recebidos. Adicionalmente, a integração entre trabalhadores da empresa e pessoas privadas de liberdade não comprometeu o desempenho operacional, evidenciando que a inclusão social pode ocorrer de forma alinhada à eficiência produtiva. A padronização das atividades, associada ao treinamento e ao uso adequado de equipamentos de proteção individual, contribui para a manutenção da produtividade e da segurança no ambiente de trabalho.

Quando comparado a valores reportados na literatura para empreendimentos de reciclagem de pequeno e médio porte, cuja produtividade média varia entre 80 e 150 kg por trabalhador/dia, o desempenho observado neste estudo (134 kg/trabalhador/dia) situa-se dentro da faixa superior, indicando eficiência operacional adequada. Esse resultado sugere que a inclusão de mão de obra prisional não compromete o desempenho produtivo, podendo ser integrada de forma eficiente ao sistema.

Inclusão social e trabalho prisional

A empresa incorpora, em seu quadro operacional, um total de 20 pessoas privadas de liberdade, sendo 13 mulheres e 7 homens, que atuam diretamente nas atividades produtivas. Esses trabalhadores estão inseridos principalmente nas etapas de triagem de resíduos recicláveis e operação de equipamentos de prensagem para o enfardamento dos materiais, desempenhando funções essenciais para o funcionamento do sistema. Observou-se que a participação dessas pessoas nas atividades operacionais ocorre de forma integrada aos demais colaboradores da empresa, com acesso a treinamentos e utilização de equipamentos de proteção individual (EPIs), o que contribui para a execução segura das atividades e para a padronização dos processos.

Do ponto de vista qualitativo, a inserção da mão de obra prisional demonstra potencial relevante para a promoção da inclusão social, ao proporcionar oportunidades de trabalho digno, geração de renda e desenvolvimento de habilidades laborais. Além disso, a convivência no ambiente de trabalho favorece processos de socialização e pode contribuir para a construção de novas perspectivas de reintegração à sociedade após o cumprimento da pena. A inserção de 20 pessoas privadas de liberdade representa aproximadamente 20% da força de trabalho operacional da empresa. Resultados semelhantes foram observados em estudos sobre cooperativas de reciclagem (Berte et al., 2013), nos quais a inserção de trabalhadores em atividades de gestão de resíduos contribui para a geração de renda e inclusão social. No entanto, enquanto esses estudos focam majoritariamente em catadores informais, o presente trabalho amplia essa análise ao incluir pessoas privadas de liberdade, evidenciando uma nova dimensão da inclusão socioprodutiva no setor.

Em termos de impacto social, ainda que de difícil mensuração direta, os resultados observados indicam que a iniciativa apresenta efeitos positivos tanto para os indivíduos envolvidos quanto para a sociedade. A geração de renda possibilita apoio

financeiro às famílias dos trabalhadores, enquanto a inserção em atividades produtivas contribui para a redução da ociosidade no sistema prisional, aspecto frequentemente associado a maiores índices de reincidência. Dessa forma, o modelo analisado evidencia potencial para atuar simultaneamente na promoção da inclusão social e no fortalecimento de práticas sustentáveis, ao integrar aspectos sociais e ambientais no contexto da economia circular. Estudos de caso realizados em cooperativas de reciclagem indicam que, embora essas iniciativas promovam inclusão socioprodutiva, ainda enfrentam desafios relacionados às condições de trabalho e à necessidade de maior apoio institucional (Gomes & Silva, 2017). Esse cenário é parcialmente observado no presente estudo, especialmente no que se refere à necessidade contínua de capacitação da mão de obra e à articulação com políticas públicas. No entanto, diferentemente de muitas cooperativas descritas na literatura, o modelo analisado apresenta estrutura organizacional formalizada, com divisão de funções, padronização de processos operacionais e supervisão direta das atividades, além de regularidade na operação e constância no volume processado ao longo do período analisado, o que caracteriza maior estabilidade operacional em comparação a iniciativas mais informais descritas na literatura.

Relação com os ODS

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a contribuição do modelo analisado para diferentes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, especialmente no que se refere às dimensões ambiental, social e econômica. No âmbito ambiental, destaca-se a contribuição para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), considerando o volume significativo de resíduos recicláveis processados pela empresa, com média de aproximadamente 295 toneladas mensais. A recuperação desses materiais promove o reaproveitamento de recursos e reduz a necessidade de destinação final em aterros sanitários, alinhando-se aos princípios da economia circular.

Em relação à dimensão social, observa-se forte aderência ao ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), uma vez que a empresa promove a inclusão produtiva de pessoas privadas de liberdade, oferecendo oportunidades de trabalho, geração de renda e desenvolvimento de habilidades. Essa iniciativa contribui para a redução da vulnerabilidade social e para o fortalecimento de estratégias de ressocialização.

Adicionalmente, o modelo estudado apresenta contribuição para o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao colaborar para a melhoria da gestão de resíduos sólidos urbanos no município, reduzindo impactos associados à disposição inadequada de resíduos. De forma complementar, a diminuição do volume de resíduos encaminhados a aterros contribui indiretamente para o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao mitigar a emissão de gases de efeito estufa associados à decomposição de resíduos.

De modo geral, os resultados indicam que o modelo analisado apresenta potencial para integrar diferentes dimensões da sustentabilidade, evidenciando que iniciativas no setor de reciclagem podem contribuir simultaneamente para a gestão ambiental adequada, inclusão social e desenvolvimento econômico, em consonância com as diretrizes da Agenda 2030.

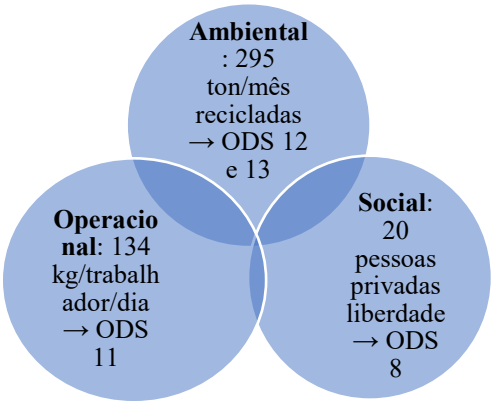


Figura 03: Integração dos indicadores ambientais, sociais e operacionais e sua relação com os ODS.

Desafios e limitações

Apesar dos resultados positivos, o modelo analisado apresenta desafios para sua consolidação e replicação. No âmbito operacional, destacam-se a variabilidade na qualidade dos resíduos recebidos e a dependência de uma adequada separação na fonte, fatores que influenciam diretamente a eficiência da triagem. A necessidade contínua de capacitação da mão de obra, especialmente no contexto da inserção de pessoas privadas de liberdade, também representa um desafio, devido à rotatividade e às limitações institucionais associadas ao sistema prisional.

Do ponto de vista logístico, aspectos como custos de transporte, otimização de rotas e regularidade no fornecimento de materiais impactam a viabilidade do sistema. Na dimensão social, a inclusão de mão de obra prisional ainda enfrenta barreiras institucionais e culturais, evidenciando a necessidade de maior articulação entre empresas, poder público e sistema prisional.

Os resultados corroboram a literatura ao indicar que a integração entre economia circular e inclusão social pode gerar benefícios ambientais e sociais, embora ainda existam desafios relacionados à gestão e consolidação dessas iniciativas (Lima e Pião, 2022). Por fim, destaca-se como limitação o fato de se tratar de um estudo de caso único, o que restringe a generalização dos resultados, embora permita identificar contribuições relevantes para pesquisas futuras.

Considerações Finais

O presente estudo permitiu analisar, por meio de um estudo de caso, o modelo operacional de uma empresa de reciclagem que integra pessoas privadas de liberdade em suas atividades produtivas, evidenciando sua contribuição para a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Os resultados demonstraram que a empresa apresenta desempenho consistente no processamento de materiais recicláveis, com média mensal de aproximadamente 295 toneladas, além de ganhos operacionais associados à eficiência da triagem e à organização das atividades.

Do ponto de vista ambiental, o modelo analisado contribui significativamente para a redução da destinação de resíduos a aterros sanitários e para o fortalecimento dos princípios da economia circular. No âmbito operacional, a produtividade observada, estimada em cerca de 134 kg por trabalhador por dia, indica que a inclusão de mão de obra prisional não compromete a eficiência do sistema, podendo ser integrada de forma adequada às rotinas produtivas.

Sob a perspectiva social, destaca-se o potencial da iniciativa na promoção da inclusão produtiva de pessoas privadas de liberdade, proporcionando oportunidades de trabalho, geração de renda e desenvolvimento de habilidades. Tais aspectos são fundamentais para o processo de ressocialização e para a redução de vulnerabilidades sociais, evidenciando o papel das empresas de reciclagem como agentes não apenas ambientais, mas também sociais.

A análise da relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) reforça o caráter integrado do modelo estudado, com contribuições diretas para os ODS 8, 11, 12 e 13, demonstrando que iniciativas locais podem gerar impactos relevantes no contexto da Agenda 2030.

Apesar dos resultados positivos, o estudo evidencia a necessidade de maior articulação entre empresas, poder público e sistema prisional, bem como o enfrentamento de desafios relacionados à qualificação da mão de obra, logística e superação de barreiras sociais. Além disso, por se tratar de um estudo de caso único, recomenda-se a realização de pesquisas futuras que ampliem a análise para diferentes contextos e modelos organizacionais. Por fim, conclui-se que o modelo analisado apresenta elevado potencial de replicabilidade, configurando-se como uma estratégia promissora para integrar gestão de resíduos, inclusão social e desenvolvimento sustentável, contribuindo de forma significativa para a construção de sistemas mais justos, eficientes e ambientalmente responsáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Barone Recicláveis pela colaboração e acesso às informações necessárias para a realização do estudo. Agradecem também à Universidade de Ribeirão Preto pelo apoio institucional.

Referências Bibliográficas

ABREMA, Associação Brasileira de Sustentabilidade e Meio Ambiente – Panorama dos residuos sólidos no Brasil 2025. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/

BERTE, R.; SANDRI, A. M. L.; OLERANOS, A. A.; DE PAULA, A. A inclusão social do catador de recicláveis – estudo de caso. Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 4, n. 2, p. 06-26, 2013. DOI: 10.22292/mas.v4i2.90.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

Gomes, R. M., & Silva, P. S. (2017). CATANDO VIDAS NO LIXO: O CASO DE UMA COOPERATIVA DE TRABALHO DE RECICLAGEM EM SANTA MARIA-DF, BRASIL. *Revista Da UI_IPSantarém*, *5*(3), 197–214. https://doi.org/10.25746/ruiips.v5.i3.14535

LIMA, Lucas Freiria de; PIÃO, Roberta de Castro Souza. Economia Circular e inclusão social: um estudo sobre os catadores de resíduos sólidos urbanos. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/39b38a6d-78f8-4b5b-acaa-844c6cf1d15b/LUCAS%20FREIRIA%20DE%20LIMA%20PRO2022.pdf. Acesso em: 06 abr. 2026.

UNEP. Global Waste Management Outlook 2024. United Nations Environment Programme, 2024. Disponível em: https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024.

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS NA SÍNTESE DE MATERIAIS ADSORVENTES PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO

1 Ian Bach Kauche, 1Pedro Antonio Galacci Reinert, 1 Mara Heloisa Neves Olsen Scaliante, 1 Wardleison Martins Moreira, 1,2 Marcelo Real Prado, 1 Maria Angélica Simões Dornellas de Barros, 3 Leandro Cezar Sacoman

1Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, e-mails: ra133073@uem.br (I.B.K.); pg407167@uem.br (P.A.G.R.); mhnoscaliante2@uem.br (M.H.N.O.S.); wmmoreira@uem.br (W.M.M.); masdbarros@uem.br (M.A.S.D.B.). 2Departamento Acadêmico de Alimentos e Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, e-mail: mrealprado@utfpr.edu.br (M.R.P.); 3Tria Indústria e Comércio LTDA, Diretor Administrativo, e-mail: leandro@tria.ind.br (L.C.S.)

Palavras-chave: Economia Circular; Embalagens; Corantes.

Resumo

A geração crescente de resíduos plásticos e a baixa circularidade associada à destinação final reforçam a necessidade de rotas de valorização capazes de agregar função ambiental a esses materiais. Com isso, o presente trabalho se propôs a avaliar a conversão de três resíduos plásticos industriais provenientes de descartes de rótulos de embalagem, PETG, BOPP com cola e sem cola, em materiais adsorventes obtidos por calcinação, hidrocalcinação e pirólise. Os nove sólidos produzidos foram submetidos a ensaios preliminares de adsorção em sistema batelada, utilizando efluente sintético contendo azul de metileno e alaranjado de metila, sendo a remoção global adotada como critério de triagem. Os resultados mostraram forte dependência entre precursor e rota, com superioridade dos materiais derivados de PETG em relação aos obtidos de BOPP. Entre as rotas aplicadas ao PETG, a hidrocalcinação apresentou a maior remoção final, enquanto a calcinação exibiu resposta inicial mais intensa e desempenho próximo ao da melhor condição. A pirólise apresentou os menores resultados, tanto na triagem quanto na etapa cinética. Os ajustes por pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e Elovich indicaram melhor aderência deste último modelo, sugerindo heterogeneidade energética superficial nos adsorventes de PETG. Conclui-se que a valorização de resíduos plásticos reais como materiais adsorventes é tecnicamente promissora, com destaque para o PETG e para a calcinação como alternativa operacionalmente atrativa.

Introdução

Nas últimas décadas, a produção de plásticos se consolidou como um problema ambiental global não apenas pelo grande volume gerado, mas também pela baixa capacidade de reinserção desses materiais na cadeia produtiva. De acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), em 2019 foram produzidas 460 Mt de plásticos e geradas 353 Mt de resíduos, dos quais apenas 9 % foram efetivamente reciclados após as perdas do processo, o que evidencia a baixa circularidade do sistema (GLOBAL PLASTICS OUTLOOK, 2022). Além disso, a persistência dos plásticos no ambiente, associada ao acúmulo em aterros e à fragmentação em micro e nanoplásticos, amplia os impactos sobre ecossistemas e dificulta a gestão desses resíduos a longo prazo (BLANCHARD, 2024).

A economia circular desponta como forma de solução, embora a reciclagem convencional continue sendo uma rota importante, a efetividade dela é limitada quando os resíduos se apresentam mistos, contaminados ou de difícil separação *(MARCHELLI et al*., 2026). Por isso, KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT (2017) defendem que ela não deve ser reduzida ao simples aumento da reciclagem, mas compreendida a partir de uma hierarquia que envolve redução, reutilização e manutenção dos materiais em ciclos de maior valor. No caso dos plásticos, esse desafio se torna ainda mais evidente, pois aditivos, estruturas multicamadas e heterogeneidade composicional comprometem a qualidade do material recuperado e restringem a reciclagem mecânica (MARCHELLI *et al*., 2026).

Nesse sentido, a valorização de resíduos plásticos como precursores de adsorventes tem se destacado como rota promissora, uma vez que a literatura já reporta materiais com elevada área superficial e boa capacidade de remoção de contaminantes aquosos a partir desses resíduos (BLANCHARD; MEKONNEN, 2024; MOTEALLEMI *et al*., 2025). Entretanto, esse avanço permanece concentrado em precursores mais favoráveis à carbonização, sobretudo PET, ou polímeros-modelo, ao passo que outros plásticos e correntes residuais heterogêneas seguem menos estudados (BLANCHARD, 2024; PEREIRA *et al*., 2024). Trabalhos como o de BARRACCO *et al*. (2024) mostram a relevância de investigar resíduos plásticos reais, sendo que esse tipo de abordagem é particularmente importante porque aproxima a avaliação do comportamento adsortivo a precursores representativos da prática industrial, porém é válido constatar que, segundo BLANCHARD; MEKONNEN (2024), ainda persistem limitações relacionadas à triagem, ao custo, ao rendimento e à escalabilidade dos processos envolvidos.

Essa possibilidade de valorização se torna mais relevante quando associada ao tratamento de efluentes contendo corantes, que constituem uma preocupação ambiental importante, especialmente em setores como o têxtil, visto que, de acordo com YASEEN; SCHOLZ (2019), esse ramo industrial demanda grande volume de água e gera correntes líquidas complexas, marcadas por elevada carga de cor, sais e matéria orgânica. A presença desses compostos nos corpos hídricos reduz a penetração

de luz, compromete a fotossíntese aquática e amplia riscos ecotoxicológicos e sanitários (LIN *et al*., 2023). Nesse contexto, a adsorção, na forma de tratamento de água terciário, aponta-se como alternativa promissora, por reunir simplicidade operacional, elevada eficiência e potencial de aplicação mesmo em sistemas contendo misturas de corantes recalcitrantes (SHI *et al*., 2022).

É nessa convergência entre valorização material e remediação aquosa que se insere o presente trabalho. Para isso, foi proposto investigar a conversão de três resíduos plásticos industriais (PETG, BOPP com e sem cola) provenientes de descartes de rótulos de embalagem em materiais adsorventes obtidos por diferentes rotas termoquímicas. Posteriormente, avaliou-se a aplicação desses sólidos no tratamento de efluente sintético bicomponente contendo corantes de naturezas distintas, buscando compreender como o tipo de precursor e a rota de conversão influenciam a remoção global. Assim, pretende-se contribuir não só para o aproveitamento de correntes plásticas reais de difícil destinação, como também para o desenvolvimento de alternativas de remediação aquosa baseadas em resíduos industriais.

Materiais e Métodos

Síntese dos Adsorventes

Foram utilizados três resíduos plásticos industriais provenientes de descartes de rótulos de embalagem: poli(tereftalato de etileno glicol-modificado) (PETG), polipropileno biorientado com camada adesiva (BOPP com cola) e sem camada adesiva (BOPP sem cola). A partir desses materiais, foram obtidos nove adsorventes, resultantes da combinação entre três precursores e três rotas termoquímicas. Para fins de identificação, as amostras foram codificadas de acordo com o polímero de origem e a rota empregada: calcinação (CAL), hidrocalcinação (HC) e pirólise (PIR).

Quanto às rotas, elas se basearam no trabalho de SANTOS *et al*. (2024a, 2024b) e estão detalhadas abaixo:

- Calcinação a 550 °C, por 2 h, com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} em um cadinho de cerâmica inserido em uma mufla;
- A rota denominada hidrocalcinação correspondeu à carbonização hidrotérmica. Para isso, utilizou-se razão material: água de 1:10 (m/V), em recipiente de teflon inserido em autoclave. O sistema foi aquecido até 200 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1}, permanecendo em reação por 30 h. Ao final do processo, os sólidos foram recuperados, lavados com água destilada e submetidos à secagem a 105 °C por 24 h;
- Na rota de pirólise, os materiais foram colocados em reator de aço inoxidável acoplado a forno tubular e aquecidos da temperatura ambiente até 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1}, sob fluxo de N_2 de 150 mL min^{-1}, com tempo de residência de 2 h. Em seguida, o gás de arraste foi substituído por CO_2 por mais 2 h, promovendo a ativação física do material obtido. Após o resfriamento, os sólidos foram lavados com água destilada e secos a 105 °C por 24 h.

Testes preliminares de adsorção

Os nove adsorventes obtidos foram inicialmente avaliados por ensaios preliminares de adsorção em sistema batelada com 20 mg, utilizando-se 50 mL de efluente sintético bicomponente contendo azul de metileno (AM), de natureza catiônica, e alaranjado de metila (AL), de natureza aniônica. Os ensaios foram conduzidos por 24 h sob agitação de 150 rpm, permitindo a comparação inicial do desempenho dos materiais quanto à remoção do sistema multicomponente.

O critério adotado para triagem foi a remoção global do efluente sintético, calculada a partir da concentração total do sistema antes e após o contato com o adsorvente, conforme a Equação (01):

$$\text{REMOÇÃO}\ (\%) = \left(\frac{C_0 - C_f}{C_0}\right) * 100 \quad (01)$$

em que C_0 é a concentração inicial do efluente sintético e C_f é a concentração final, ambas em mg L^{-1}. A partir dessa etapa de triagem, o precursor com melhor desempenho foi selecionado para os ensaios cinéticos.

Ensaios cinéticos e modelagem

A capacidade adsortiva (q) em $mg_{adsorvato}\ g_{adsorvente}^{-1}$ para diferentes valores de tempo (t) dos ensaios foi calculada pela Equação (02):

$$q_t = \frac{[(C_0 - C_t)V]}{m} \quad (02)$$

em que V é o volume do ensaio (0,050 L), e m é a massa de adsorvente (0,020 g).

Os dados cinéticos foram ajustados aos modelos de pseudo-primeira ordem (PFO), pseudo-segunda ordem (PSO) e Elovich. O modelo de pseudo-primeira ordem foi descrito pela Equação (03):

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (03)$$

em que q_e e k_1 correspondem, respectivamente, à capacidade adsortiva no equilíbrio e à constante de velocidade de pseudo-primeira ordem (min^{-1}).

O modelo de pseudo-segunda ordem foi representado pela Equação (04):

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (04)$$

em que k_2 é a constante de velocidade de pseudo-segunda ordem (g mg min^{-1}).

O modelo de Elovich foi expresso pela Equação (05):

$$q_t = \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln(1 + \alpha\beta t) \quad (05)$$

em que α é a taxa inicial de adsorção (mg g^{-1} min^{-1}), e β é a constante de dessorção (mg g^{-1}).

Os ajustes cinéticos dos materiais foram realizados por regressão não linear pelo método dos mínimos quadrados, sendo a aderência aos dados experimentais avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e do erro quadrático médio (EQM).

Efluente Sintético e Quantificação Espectrofotométrica

O efluente sintético foi preparado em meio aquoso com 10 mg L^{-1} de azul de metileno (AM) e 10 mg L^{-1} de alaranjado de metila (AL), totalizando 20 mg L^{-1} de corantes no sistema. A quantificação foi realizada por espectroscopia de absorção molecular UV-Vis em espectrofotômetro UV-1800 (Shimadzu), de duplo feixe, utilizando-se água deionizada como branco e cubetas de quartzo com caminho óptico de 10 mm, sendo que todas as alíquotas dos testes preliminares e dos ensaios cinéticos foram centrifugadas a 3500 rpm por 20 minutos para remover a massa de adsorvente presente, evitando possíveis interferências na aferição das absorbâncias.

Para as amostras bicomponentes, as absorbâncias foram registradas em 664 e 464 nm, comprimentos de onda selecionados com base nos máximos característicos dos corantes. As concentrações de AM e AL foram obtidas a partir das relações lineares de calibração em ambos os comprimentos de onda, conforme as Equações (06) e (07):

$$C_{AM} = \frac{k_{AL,464} Abs_{664} - k_{AL,664} Abs_{464}}{k_{AM,664} k_{AL,464} - k_{AM,464} k_{AL,664}} \quad (06)$$

$$C_{AL} = \frac{k_{AM,664} Abs_{464} - k_{AM,464} Abs_{664}}{k_{AM,664} k_{AL,464} - k_{AM,464} k_{AL,664}} \quad (07)$$

em que C_{AM} e C_{AL} são as concentrações de azul de metileno e alaranjado de metila, respectivamente; Abs_{664} e Abs_{464} correspondem às absorbâncias medidas em 664 e 464 nm; e $k_{AM,664}$, $k_{AM,464}$, $k_{AL,664}$ e $k_{AL,464}$ são os coeficientes angulares das curvas analíticas obtidas para cada corante em cada comprimento de onda. A concentração total do efluente sintético foi então calculada pela Equação (08):

$$C = C_{AM} + C_{AL} = \frac{(k_{AL,464} Abs_{664} + k_{AM,664} Abs_{464}) - (k_{AL,664} Abs_{464} + k_{AM,464} Abs_{664})}{k_{AM,664} k_{AL,464} - k_{AM,464} k_{AL,664}} \quad (08)$$

em que C é a concentração total do efluente sintético. Dessa forma, os testes preliminares e os ensaios cinéticos foram acompanhados com base na variação temporal de C, adotada neste trabalho como resposta analítica principal.

Resultados e Discussão

Os testes preliminares foram empregados como etapa de triagem para comparar, por remoção global do efluente sintético, isto é, dos corantes, os nove adsorventes obtidos a partir de três resíduos plásticos e três rotas de conversão. A distribuição dos resultados, Figura 1, mostra que o desempenho não variou apenas entre amostras individuais, mas foi fortemente condicionado pela combinação entre precursor e rota. Em termos gerais, os materiais derivados de PETG concentraram as maiores remoções globais, com destaque para PETG-HC e PETG-CAL, enquanto os adsorventes obtidos de BOPP com e sem cola permaneceram em faixa muito inferior. Essa leitura é coerente com a revisão de MOTEALLEMI *et al*. (2025), segundo a qual o desempenho adsortivo de resíduos plásticos depende da interação entre rota de síntese, natureza do polímero e propriedades finais do sólido, e não de um único fator isolado.

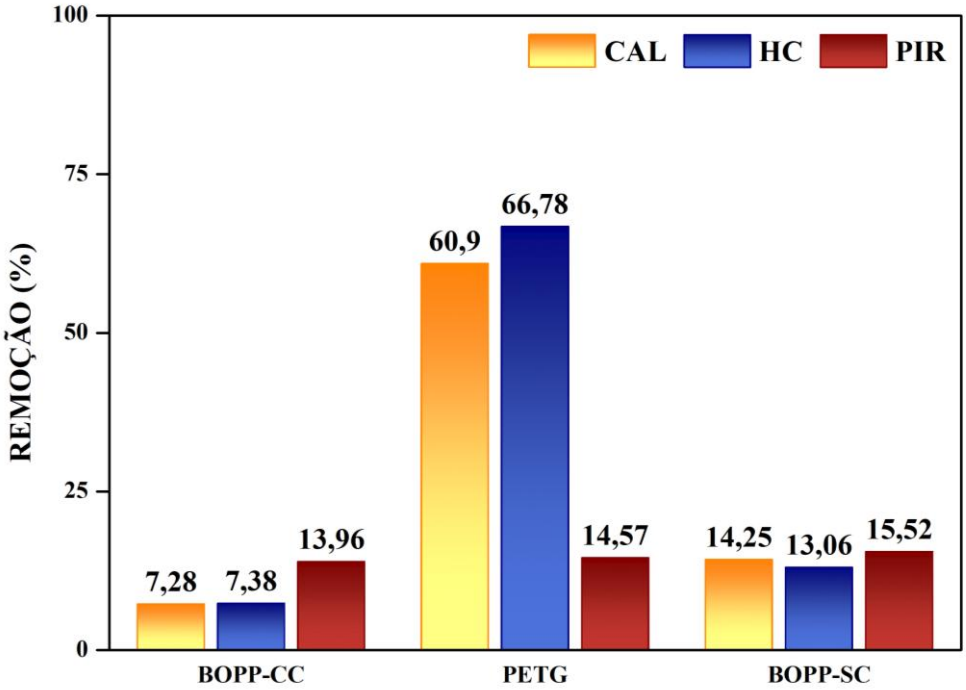


Figura 1: Testes preliminares para os nove adsorventes, avaliando a remoção global de corantes do sistema.

A superioridade do PETG sobre os dois resíduos de BOPP pode ser interpretada, por similaridade, a partir da diferença entre plásticos do tipo PET e materiais da família das poliolefinas. BLANCHARD; MEKONNEN (2024) destacam que PET recebe maior atenção como precursor porque combina estrutura aromática, presença de oxigênio e maior propensão à formação de adsorventes, ao passo que poliolefinas como o BOPP são tratadas como precursores mais desafiadores para materiais porosos adsortivos. No presente trabalho, essa diferença entre precursores se mostrou mais determinante para os resíduos de BOPP com e sem cola, cujas remoções globais permaneceram baixas em todas as rotas avaliadas.

Por outro lado, no caso do PETG, o efeito da rota de conversão foi muito mais evidente. Enquanto PETG-CAL e PETG-HC apresentaram as maiores remoções do conjunto, a pirólise reduziu drasticamente o desempenho desse precursor, aproximando-o dos valores observados para os BOPPs. Assim, mais do que indicar que a pirólise foi a rota inferior em termos absolutos para todos os materiais, os dados sugerem que ela foi particularmente severa para o PETG. Essa leitura é coerente com a literatura que diferencia carbonização, mais orientada à retenção de sólido carbonáceo, de pirólise, frequentemente mais associada à formação de óleo, gás e sólidos que nem sempre são o produto mais favorável quando o foco é adsorção (BLANCHARD, 2024; DEVI; RAWAT, 2021). Já para os resíduos de BOPP com e sem cola, embora a pirólise tenha fornecido os maiores valores dentro de cada conjunto, o ganho foi pequeno e insuficiente para alterar o quadro geral de baixa remoção, reforçando que, nesses materiais, a limitação parece estar mais associada à natureza do precursor do que propriamente à rota empregada.

Além disso, a comparação entre CAL e HC merece uma leitura mais cuidadosa. Se a hidrocalcinação for entendida como uma tentativa de dar um ganho adicional ao material obtido por calcinação, esse ganho apareceu, mas de forma modesta no caso do PETG: PETG@HC superou PETG@CAL, porém por margem pequena, o que não possibilita afirmar, com base apenas nos testes preliminares, que o ganho hidrotermal já compense claramente a maior complexidade da rota. Em outras palavras, no sistema PETG, a HC parece ter refinado o comportamento do material, mas não o transformou drasticamente.

Com isso, a triagem preliminar permitiu duas conclusões simultâneas: o PETG foi o precursor mais promissor do conjunto, e, dentro dele, a hidrocalcinação apenas melhorou discretamente o material em relação à calcinação, enquanto a pirólise se mostrou a rota menos favorável. Por isso, o PETG foi selecionado para a etapa cinética, na qual passa a importar não só qual rota remove mais ao final do ensaio, mas também como esse processo evolui ao longo do tempo.

Conforme apresentado na Figura 2, os materiais não diferem apenas na capacidade final, mas também na forma de crescimento das curvas. O PETG@CAL apresentou a resposta inicial mais rápida, atingindo 14,78 mg g^{-1} aos 5 min, enquanto o PETG@HC iniciou em 8,66 mg g^{-1} e o PETG@PIR em 4,95 mg g^{-1}. Ao final do ensaio, porém, o PETG@HC alcançou o maior valor experimental, 30,59 mg g^{-1}, ligeiramente acima do PETG@CAL, com 29,63 mg g^{-1}, ao passo que o PETG@PIR permaneceu em patamar muito inferior, com 9,64 mg g^{-1}. Assim, a calcinação favoreceu uma adsorção inicial mais intensa, a hidrocalcinação favoreceu uma adsorção mais sustentada ao longo do tempo e a pirólise produziu o material menos eficiente em toda a faixa avaliada, o que reforça as constatações anteriores.

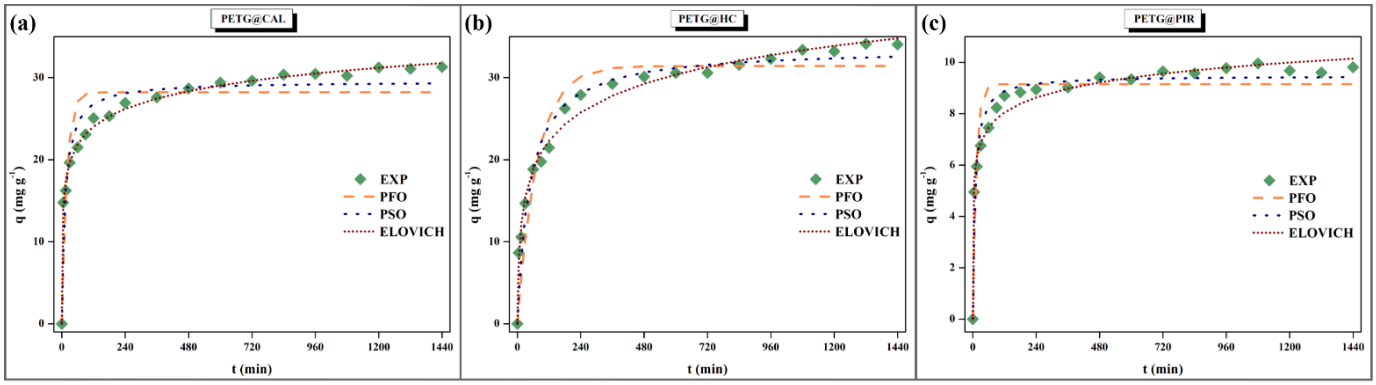


Figura 2: Dados experimentais e ajustes cinéticos de pseudo-primeira ordem (PFO), pseudo-segunda ordem (PSO) e Elovich para os adsorventes produzidos a partir de PETG.

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de pseudo-primeira ordem (PFO), pseudo-segunda ordem (PSO) e Elovich, e os resultados estão reunidos na Tabela 1. PFO foi o modelo menos aderente para as três rotas, com os menores valores de R^2 e os maiores EQM. O PSO melhorou de forma consistente a descrição das curvas, mas o melhor ajuste global foi obtido por Elovich em todos os materiais: para PETG@CAL, R^2 = 0,9955 e EQM = 0,2653; para PETG@HC, R^2 = 0,9891 e EQM = 1,0334; e para PETG@PIR, R^2 = 0,9839 e EQM = 0,0899. Isso sugere que as curvas do PETG não seguem uma aproximação cinética uniforme até o equilíbrio.

MODELO	PARÂMETRO	PETG@CAL	PETG@HC	PETG@PIR
PFO	q_e (mg g^{-1})	28,2247	31,4136	9,1441
	k_1 (min^{-1})	0,05363	0,01340	0,07673
	R^2	0,8255	0,9187	0,8810
	EQM	10,2579	7,6883	0,6662
PSO	q_e (mg g^{-1})	29,5429	33,5883	9,4741
	k_2 (g mg^{-1} min^{-1})	0,002760	0,000642	0,013097
	R^2	0,9238	0,9666	0,9592
	EQM	4,4823	3,1562	0,2287
ELOVICH	α (mg g^{-1} min^{-1})	58,8023	3,4378	97,2109
	β (g mg^{-1})	0,3215	0,1981	1,1852
	R^2	0,9955	0,9891	0,9839
	EQM	0,2653	1,0334	0,0899

Tabela 1: Ajustes cinéticos e métricas de aderência para a adsorção do efluente sintético total pelos adsorventes produzidos a partir de PETG.

Ainda, a melhor aderência ao Elovich indica uma superfície energeticamente heterogênea nos adsorventes de PETG, com sítios adsortivos não equivalentes (RUDZINSKI; PLAZINSKI, 2009). Essa leitura ajuda a interpretar diretamente os parâmetros da Tabela 1. No PETG@CAL, o valor elevado de α, 58,80 mg g^{-1} min^{-1}, é coerente com a subida inicial mais rápida da curva, enquanto o valor de β, 0,3215 g mg^{-1}, indica perda progressiva de ritmo ao longo do ensaio. No PETG@HC, o α bem menor, 3,44 mg g^{-1} min^{-1}, explica o início mais lento, mas o β também mais baixo, 0,1981 g mg^{-1}, indica desaceleração menos acentuada, o que ajuda a explicar por que esse material continua adsorvendo por mais tempo e termina acima do calcinado. Já no PETG@PIR, a combinação entre α elevado, 97,21 mg g^{-1} min^{-1}, e β também elevado, 1,1852 g mg^{-1}, sugere resposta inicial relativamente intensa, mas com queda rápida da taxa, compatível com o baixo avanço global da curva.

Dessa forma, a modelagem cinética não apenas organiza os ajustes da Figura 2, mas esclarece como cada rota alterou o perfil adsortivo do material. O PETG@CAL concentrou o desempenho em sítios mais ativos nos tempos iniciais; o PETG@HC apresentou adsorção mais persistente, o que explica a leve superioridade final; e o PETG@PIR exibiu perda rápida de eficiência ao longo do tempo, reforçando que essa rota foi a menos favorável também do ponto de vista cinético.

Comentários finais

Os resultados obtidos demonstraram que a valorização de resíduos plásticos industriais na forma de materiais adsorventes constitui uma alternativa tecnicamente promissora para tratamento de efluente sintético contendo corantes. Entre os nove adsorventes avaliados, os materiais derivados de PETG apresentaram os melhores desempenhos de remoção global, enquanto os resíduos de BOPP, com e sem cola, permaneceram em faixa significativamente inferior. No recorte cinético, a hidrocalcinação forneceu o maior desempenho final, a calcinação apresentou adsorção inicial mais intensa e a pirólise se mostrou a rota menos favorável, tanto na triagem preliminar quanto no comportamento ao longo do tempo. A melhor aderência do modelo de Elovich também indicou que os materiais derivados de PETG apresentam superfície energeticamente heterogênea, reforçando que a rota de conversão influencia não apenas a remoção final, mas o perfil adsortivo do sólido ao longo do ensaio.

Do ponto de vista aplicado, o trabalho indica que resíduos reais de rótulos de embalagem podem ser redirecionados para uma rota de maior valor agregado, contribuindo de forma imediata para enfrentar um problema de destinação industrial. Além de que, mesmo em um cenário no qual o ganho adsortivo não justifique a rota, os tratamentos térmicos ainda promovem redução expressiva do volume ocupado por tais resíduos, o que já representa um benefício operacional relevante para a indústria. Ainda, os gases gerados nesses processos podem, em etapas futuras, ser avaliados quanto à integração com outras rotas de aproveitamento, ampliando o potencial de articulação do projeto com uma lógica mais abrangente de economia circular e uso integrado de resíduos. Assim, no estágio atual, o PETG se consolida como o precursor mais promissor, e a calcinação emerge como uma alternativa particularmente atrativa por combinar simplicidade operacional e desempenho próximo ao da hidrocalcinação.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Tria Indústria e Comércio LTDA pela parceria e fornecimento das amostras para pesquisas e aos laboratórios de Desenvolvimento de Processos Sustentáveis (LDPS) e de Sistemas e Processos Químicos (LSPQ) vinculados ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Referências Bibliográficas

BARRACCO, F.; PARISI, E.; PIPITONE, G.; SIMONE, E.; BENSAID, S.; FINO, D. Valorization of pyrolytic plastic-derived char for adsorption of wastewater contaminants: a kinetic and thermodynamic investigation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 9, p. 6513–6530, 2024. DOI: 10.1007/s13762-024-05467-1.

BLANCHARD, R. J. . **Upcycling Plastic Waste to Activated Carbon for Waste Water Treatment Applications**. 2024. University of Waterloo, 2024. Disponível em: https://uwspace.uwaterloo.ca/items/9b383952-fdcb-4596-abf8-73e7da33d96e. Acesso em: 20 fev. 2026.

BLANCHARD, R.; MEKONNEN, T. H. . Valorization of plastic waste via chemical activation and carbonization into activated carbon for functional material applications. **RSC Applied Polymers**, v. 2, n. 4, p. 557–582, 2024. DOI: 10.1039/d4lp00016a.

DEVI, M.; RAWAT, S. . A comprehensive review of the pyrolysis process: From carbon nanomaterial synthesis to waste treatment. **Oxford Open Materials Science**, v. 1, n. 1, p. 1–30, 2021. DOI: 10.1093/oxfmat/itab014.

Global Plastics Outlook. Paris: OECD Publishing, 2022. DOI: 10.1787/de747aef-en. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_de747aef-en.html. Acesso em: 2 fev. 2026

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. . Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, n. April, p. 221–232, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

LIN, J.; YE, W.; XIE, M.; SEO, D. H.; LUO, J.; WAN, Y.; BRUGGEN, B. V. D. . Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 4, n. 11, p. 785–803, 2023. DOI: 10.1038/s43017-023-00489-8.

MARCHELLI, F.; GIOIA, C.; LOMBINI, S.; ANDREOTTOLA, G.; FIORI, L. . Hydrothermal carbonization of bioplastics and plastics: a promising approach for handling mixed waste. **Chemical Engineering Journal**, v. 532, n. October 2025, p. 174526, 2026. DOI: 10.1016/j.cej.2026.174526.

MOTEALLEMI, A.; TAHERKHANI, S.; AHMADFAZELI, A.; DEHGHANI, M. H. . A systematic review of plastic wastes as new adsorbents for dye removal in aqueous environments. **Environmental Sciences Europe**, v. 37, n. 1, 2025. DOI: 10.1186/s12302-025-01172-z.

PEREIRA, L.; CASTILLO, V.; CALERO, M.; BLÁZQUEZ, G.; SOLÍS, R. R.; MARTÍN-LARA, M. A. . Insights into using plastic waste to produce activated carbons for wastewater treatment applications: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 62, n. April, 2024. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105386.

SANTOS, D. F.; MOREIRA, W. M.; ARAÚJO, T. P.; BERNARDO, M. M. S.; FONSECA, I. M. F. L.; OSTROSKI, I. C.; BARROS, M. A. S. D. . Competitive adsorption of acetaminophen and caffeine onto activated Tingui biochar: characterization, modeling, and mechanisms. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 41, p. 53611–53628, 2024. a. DOI: 10.1007/s11356-023-31024-3.

SANTOS, D. F.; MOREIRA, W. M.; ARAÚJO, T. P.; MARTINS, D. C. C.; CARVALHO, B. S. F.; OSTROSKI, I. C.; BARROS, M. A. S. D. . Novel activated carbon from Magonia pubescens bark: characterization and evaluation of adsorption efficiency. **Environmental Technology**, v. 45, n. 19, p. 3940–3959, 2024. b. DOI: 10.1080/09593330.2023.2237659.

SHI, Y.; CHANG, Q.; ZHANG, T.; SONG, G.; SUN, Y.; DING, G. . A review on selective dye adsorption by different mechanisms. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 108639, 2022. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108639.

RUDZINSKI, W.; PLAZINSKI, W. . On the applicability of the pseudo-second order equation to represent the kinetics of adsorption at solid/solution interfaces: A theoretical analysis based on the statistical rate theory. **Adsorption**, v. 15, n. 2, p. 181–192, 2009. DOI: 10.1007/s10450-009-9167-8.

YASEEN, D. A.; SCHOLZ, M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 2, p. 1193–1226, 2019. DOI: 10.1007/s13762-018-2130-z.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE VIDRO MOÍDO NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES

1 Pedro Henrique Luvizão, 2 Emily Poyer Pasqualotto, 3 Yuri Bianchi, 4 Maiara Foiato, 5 Gislaine Luvizão, 6 Jhulis Marina Carelli, 7 Scheila Lockstein, 8 Fabiano Alexandre Nienov

1 Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, e-mail: pedro.luvizao@unoesc.edu.br; 2 Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, e-mail: emip760@gmail.com; 3 Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, e-mail: yuribianchi18@gmail.com; 4 Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, e-mail: maiara.foiato@unoesc.edu.br; 5 Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, e-mail: gislaine.luvizao@unoesc.edu.br; 6 Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, e-mail: jhulis.carelli@unoesc.edu.br; 7 Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, e-mail: scheila.lockstein@unoesc.edu.br; 8 Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, e-mail: fabiano.nienov@unoesc.edu.br

Palavras-chave: Argamassa autonivelante; Pó de vidro moído; Substituição do agregado miúdo.

Resumo

A reutilização de resíduos oriundos da construção civil tem ganhado relevância no contexto da engenharia civil, especialmente diante do expressivo volume gerado. De acordo com dados da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), em 2023 o Brasil produziu aproximadamente 44,5 milhões de toneladas de resíduos da construção civil, evidenciando a necessidade de alternativas tecnicamente viáveis para sua valorização. Nesse contexto, o pó de vidro moído (PVM) apresenta-se como um material com potencial para substituição parcial do agregado miúdo em composições que demandam agregados e adições de elevada finura, como as argamassas autonivelantes. O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de PVM nas propriedades reológicas e mecânicas de argamassas autonivelantes, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Para tal, foram investigados teores de substituição de 10,0%, 12,5% e 15,0% em massa da areia natural. O traço de referência adotado foi 1:1,39:0,11:0,37 (cimento, areia, filer calcário e água), complementado pelo uso de aditivos químicos, incluindo superplastificante, modificador de viscosidade e incorporador de ar, de modo a atender às exigências de fluidez e estabilidade da mistura. No estado fresco, as propriedades reológicas foram avaliadas por meio dos ensaios de espalhamento (slump flow), funil V e caixa L. No estado endurecido, foram determinados os valores de resistência à tração na flexão e resistência à compressão. A análise dos resultados foi conduzida a partir da correlação entre os desempenhos observados nos dois estados da argamassa, tomando-se como referência o traço sem adição de resíduo. Os resultados indicaram que a incorporação de PVM não promoveu alterações significativas na trabalhabilidade e na fluidez das argamassas no estado fresco, mantendo comportamento adequado, sem ocorrência de segregação ou exsudação. No estado endurecido, observou-se incremento na resistência à tração na flexão com a adição do PVM, atribuído principalmente à elevada finura do material, que favorece o preenchimento de vazios na matriz cimentícia, além do formato angular das partículas, que pode atuar de forma análoga a microfibras, promovendo mecanismos de ponteamento de fissuras. Por outro lado, verificou-se redução da resistência à compressão nos traços contendo resíduo retido entre a peneira de abertura 0,15mm em todos os teores avaliados e no traço com resíduo passante na peneira de 0,15mm no teor de 10,0%. Apenas as argamassas com substituição por resíduo passante na peneira de 0,15mm nos teores de 12,5% e 15,0% apresentaram resistência à compressão superior ao traço de referência. O desempenho inferior observado em parte das misturas pode ser atribuído à geometria angular das partículas de vidro, caracterizadas por arestas vivas e cantos pontiagudos, que podem atuar como concentradores de tensão e favorecer a nucleação de microfissuras, hipótese corroborada por análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para os traços com 12,5% e 15,0% de resíduo passante na peneira de 0,15 mm, o melhor desempenho mecânico é associado ao efeito filer proporcionado pela fração mais fina do PVM, que contribui para a densificação da matriz. Recomenda-se, entretanto, a realização de investigações adicionais por meio de ensaios complementares, visando à confirmação dos teores mais indicados de substituição. De modo geral, os resultados demonstraram que a fração mais fina do pó de vidro moído apresenta desempenho superior quando comparada à fração mais grossa, indicando maior potencial de aplicação em argamassas autonivelantes.

Introdução

A intensificação do modelo industrial e do consumo em larga escala tem resultado na geração crescente de passivos ambientais, dentre os quais se destaca o vidro pós-consumo, cujo elevado volume e baixa taxa de degradação impõem desafios significativos sob os aspectos logístico, econômico e ambiental. Nesse contexto, a transição para modelos produtivos fundamentados nos princípios da economia circular torna-se imprescindível, sendo a construção civil reconhecida como um setor estratégico para a absorção, valorização e destinação ambientalmente adequada desses resíduos. A incorporação de materiais alternativos em matrizes cimentícias contribui não apenas para a mitigação do descarte inadequado, mas também para a redução da extração de recursos naturais, promovendo o alinhamento entre desempenho técnico e sustentabilidade.

Inserido nesse cenário, o pó de vidro moído (PVM) desponta como um material suplementar promissor para aplicação em argamassas autonivelantes. Esses sistemas cimentícios, caracterizados por elevada fluidez e capacidade de autoespalhamento, exigem controle rigoroso das propriedades reológicas no estado fresco. A introdução de partículas finas, como o PVM, pode promover a otimização da curva granulométrica da mistura, influenciando diretamente parâmetros como coesão, exsudação, estabilidade e capacidade de nivelamento sem segregação, os quais são determinantes para o desempenho funcional e a qualidade superficial do revestimento.

A atuação do PVM ocorre predominantemente por meio de efeitos físicos, exercendo função de filer ou de substituto parcial do agregado miúdo, a depender da faixa granulométrica empregada. Esse mecanismo favorece o empacotamento das partículas sólidas e o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia, com o preenchimento de vazios intersticiais, resultando em potencial redução da porosidade e da permeabilidade. Adicionalmente, sob o ponto de vista químico, a sílica amorfa (SiO_2) presente no vidro pode, em função de sua finura e reatividade, apresentar comportamento pozolânico, reagindo com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) proveniente da hidratação do cimento e formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) secundários, os quais contribuem para o ganho de resistência mecânica e para a melhoria da durabilidade ao longo do tempo.

A incorporação de resíduos finos em argamassas cimentícias, especialmente em sistemas de alta fluidez como as argamassas autonivelantes, tem sido amplamente investigada na literatura, com resultados convergentes quanto aos seus efeitos no estado fresco e no estado endurecido. De forma geral, os estudos indicam que a substituição parcial de materiais convencionais por resíduos contribui para a valorização de subprodutos industriais e para a redução de impactos ambientais, em consonância com os princípios da economia circular.

Pesquisas recentes sobre o uso do pó de vidro moído em argamassas autonivelantes, como as desenvolvidas por Ribeiro Neto et al. (2025), inserem-se em um conjunto mais amplo de investigações que avaliam a aplicação de finos residuais como adições minerais. Resultados semelhantes foram observados em estudos envolvendo resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais (Ribeiro Neto, 2023), resíduos de corte de mármore e granito (Mendes, 2019) e resíduos do beneficiamento de mármore e granito (Chaves, 2018), os quais demonstram a viabilidade técnica dessas adições e seus efeitos positivos no desempenho das argamassas.

Um aspecto recorrente nesses trabalhos é a atuação filer dos resíduos finos, promovendo melhor empacotamento das partículas sólidas e contribuindo para a otimização da reologia das misturas. Ribeiro Neto et al. (2025) observaram melhorias na fluidez e na estabilidade das argamassas com a adição de pó de vidro, comportamento análogo ao relatado em estudos com resíduos de rochas. Adicionalmente, Chaves (2018) destaca que resíduos finos podem atuar de forma semelhante a modificadores de viscosidade, aumentando a coesão da mistura e, em determinados casos, reduzindo a necessidade do uso de aditivos específicos.

De modo geral, a literatura aponta que o uso de finos residuais, como o pó de vidro e resíduos de rochas ornamentais, apresenta elevada viabilidade para aplicação em argamassas autonivelantes, sobretudo no estado fresco. Quando adequadamente dosados, esses materiais contribuem simultaneamente para o aumento da fluidez e da coesão, atuando como estabilizadores físicos da mistura, conforme destacado por Nenevê (2017). Além dos benefícios técnicos, essa abordagem representa uma alternativa sustentável relevante para o reaproveitamento de resíduos sólidos, contribuindo para a mitigação do passivo ambiental associado à indústria da construção civil.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo avaliar de forma sistemática os efeitos da incorporação do pó de vidro moído, em diferentes teores de substituição do agregado miúdo, nas propriedades de argamassas autonivelantes. A investigação contempla a caracterização no estado fresco, por meio de ensaios de fluidez, espalhamento e verificação da capacidade de autonivelamento (Caixa L), bem como no estado endurecido, mediante a avaliação do desempenho mecânico, com ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão. Busca-se, assim, estabelecer correlações entre a dosagem do resíduo e o comportamento global do compósito cimentício.

Material e Métodos

A metodologia experimental compreendeu a caracterização dos materiais, a definição de um traço de referência de argamassa autonivelante e a avaliação do efeito da substituição parcial do agregado miúdo por pó de vidro moído (PVM). Foram estudadas duas faixas granulométricas do PVM: (i) fração retida na peneira de 0,15 mm e passante na de 0,30 mm; e (ii) fração passante na peneira de 0,15 mm. Para cada fração, adotaram-se teores de substituição de 10,0%, 12,5% e 15,0% em massa da areia, totalizando seis traços com resíduo, além do traço de referência.

O cimento utilizado foi o Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), conforme ABNT NBR 16697:2019, da empresa Votorantim Cimentos, selecionado visando à obtenção de elevadas resistências em idades iniciais. O agregado miúdo consistiu em areia natural, previamente seca e peneirada na abertura de 0,30 mm, a fim de remover impurezas e controlar a umidade. A caracterização granulométrica foi realizada segundo a ABNT NBR 7211:2022, resultando em diâmetro máximo de 0,6 mm e módulo de finura de 1,59.

Empregou-se filer calcário como substituição parcial do cimento, com o objetivo dereduzir o custo do traço, sem prejuízos ao desempenho da mistura no estado fresco. O PVM foi obtido a partir da moagem de garrafas de vidro apreendidas pela Receita Federal e doadas à Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC), sendo processado em laboratório e peneirado até atingir as faixas granulométricas estabelecidas. O PVM moído e peneirado é apresentado na Figura 01.



Figura 012: Amostra de PVM peneirado
Fonte: Autores (2026)

Para o controle reológico das argamassas, utilizaram-se aditivos químicos fornecidos pela Camargo Química: superplastificante de terceira geração à base de éteres policarboxilatos (conforme ABNT NBR 11768-1:2019), aditivo modificador de viscosidade (VMA) de base polimérica e incorporador de ar, visando garantir elevada fluidez, coesão e estabilidade no estado fresco. O traço de referência foi definido a partir de ensaios preliminares em escala reduzida, com ajustes sucessivos até a obtenção de comportamento autonivelante adequado, sem segregação ou exsudação conforme apresentado na Figura 02. A formulação final, validada e replicada em betoneira, apresentou o traço unitário em massa de 1:1,39:0,11:0,009:0,028:0,033:0,37 (cimento: areia: filer calcário: superplastificante: incorporador de ar: modificador de viscosidade: água). A partir desse traço, foram definidas as substituições do agregado miúdo pelo PVM.



Figura 013: Ensaio de espalhamento com o cone de Kantro
Fonte: Autores (2026)

Definido o traço base, foram estabelecidas as porcentagens de substituição em função da quantidade de material. Na Tabela 02 é apresentado a nomenclatura definida para cada traço. Utilizou-se 10,0%, 12.5% e 15,0% de pó de vidro moído em substituição do agregado miúdo, sendo uma passante na peneira 0,15mm e outra retida nessa mesma peneira e passante na 0,30mm.

Nomenclatura	Significado
REF	Traço Base
RP 10,0	10,0% de substituição com resíduo passante na peneira 0,15mm
RP 12,5	12,5% de substituição com resíduo passante na peneira 0,15mm
RP 15,0	15,0% de substituição com resíduo passante na peneira 0,15mm
RR 10,0	10,0% de substituição com resíduo retido na peneira 0,15mm
RR 12,5	12,5% de substituição com resíduo retido na peneira 0,15mm
RR 15,0	15,0% de substituição com resíduo retido na peneira 0,15mm

Tabela 05: Nomenclaturas utilizadas para identificação dos traços
Fonte: Autores (2026)

No estado fresco, as argamassas foram avaliadas por meio dos ensaios de espalhamento (slump flow), Caixa L e Funil V, conforme as ABNT NBR 15823-2:2022, NBR 15823-4:2017 e NBR 15823-5:2017, respectivamente, demostrado da Figura 03. Determinaram-se o diâmetro de espalhamento, o tempo t_{500}, o índice de estabilidade visual, a habilidade passante (HP) e o tempo de escoamento no Funil V.



(a) (b) (c)

Figura 014: Ensaios no estado fresco da argamassa: a) ensaios de espalhamento (slump flow), b) Caixa L em c) Funil V
Fonte: Autores (2026)

No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, conforme a ABNT NBR 13279:2005. Os corpos de prova prismáticos (4 × 4 × 16 cm) foram moldados sem adensamento, desmoldados após 24 h e ensaiados aos 7 dias. A resistência à compressão foi determinada a partir das metades dos corpos de prova rompidos à flexão. Os ensaios mecânicos foram realizados em máquina universal Instron DL3000, com taxa de carregamento de 0,5 MPa/s.

Resultados e Discussão

Os ensaios no estado fresco demonstraram que todas as argamassas apresentaram espalhamento superior a 1000 mm (Tabela 02), confirmando a manutenção da elevada fluidez e da capacidade de autonivelamento, independentemente do teor ou da granulometria do pó de vidro moído (PVM). O tempo t_{500} evidenciou influência direta da finura do resíduo: os traços com PVM passante na peneira de 0,15 mm apresentaram aumento do tempo de espalhamento em relação ao traço de referência, indicando maior viscosidade do sistema. Esse comportamento está associado ao aumento da área superficial específica do material fino, que eleva a demanda de água de molhagem e o atrito interno da mistura.

Traço	t_{500} - Tempo de espalhamento (s)	*IEV*
REF	0,29	0
RP 10,0	1,00	0
RP 12,5	1,10	0
RP 15,0	1,08	0
RR 10,0	1,09	1
RR 12,5	0,25	1
RR 15,0	0,21	0

Tabela 06: Resultados de t_{500} e IEV
Fonte: Autores (2026)

Por outro lado, os traços com PVM retido na peneira de 0,15 mm apresentaram tempos de espalhamento semelhantes ou inferiores ao do traço de referência, sugerindo maior fluidez inicial. Esse efeito pode ser atribuído à superfície lisa e vítrea das partículas de vidro mais grossas, que reduz o atrito entre os constituintes sólidos e a pasta cimentícia. A análise do Índice de Estabilidade Visual (IEV) indicou elevada estabilidade para as misturas com PVM passante (IEV 0), sem ocorrência de exsudação ou segregação, enquanto alguns traços com resíduo retido apresentaram leve exsudação (IEV 1), evidenciando menor coesão da matriz sob condições de alta fluidez.

No Gráfico 01 apresenta-se os resultados do tempo de espalhamento e escoamento no Funil V dos traços e que corroboraram essas tendências. As misturas contendo PVM passante apresentaram maiores tempos de escoamento, caracterizando aumento da viscosidade plástica e comportamento semelhante ao de um modificador de viscosidade natural. Em contrapartida, os traços com PVM retido mantiveram tempos de escoamento próximos ao do traço de referência, reforçando o efeito de redução de atrito promovido pela fração mais grossa do vidro.

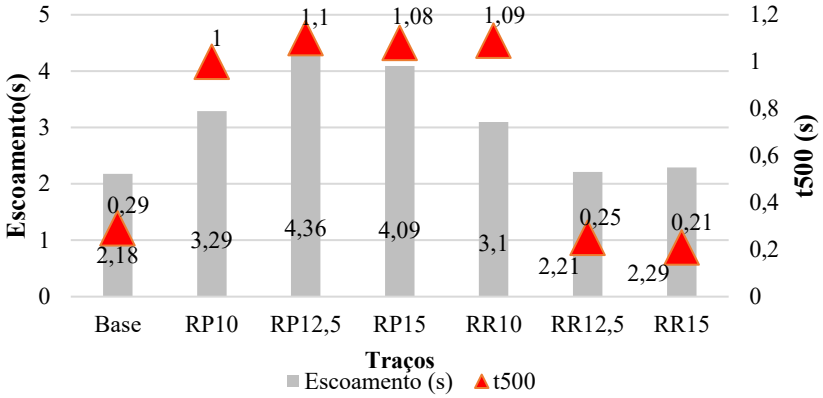


Gráfico 01: Tempos de espalhamento e escoamento
Fonte: Autores (2026)

No ensaio da Caixa L, resultados apresentados no Gráfico 02, todos os traços apresentaram índices de habilidade passante (H_2/H_1) entre 0,85 e 1,0, valores compatíveis com argamassas autonivelantes. Destaca-se o traço com 12,5% de resíduo retido, que atingiu índice unitário, indicando equilíbrio adequado entre fluidez e coesão. De forma geral, a incorporação do PVM não comprometeu as propriedades a habilidade passante das misturas, confirmando a viabilidade técnica da substituição parcial do agregado miúdo no estado fresco.

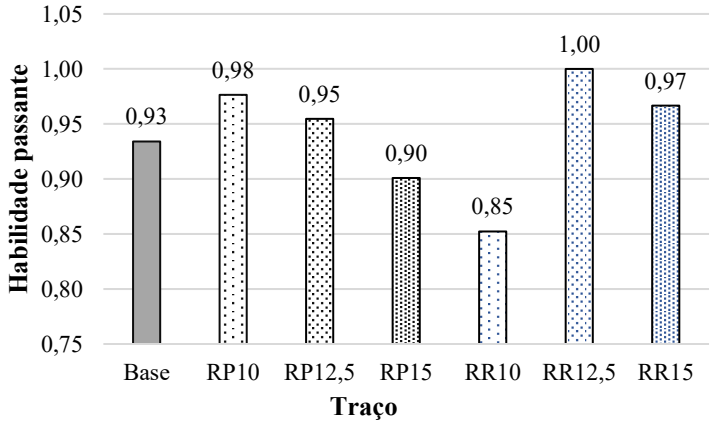


Gráfico 02: Habilidade passante - Caixa L
Fonte: Autores (2026)

No estado endurecido, os ensaios mecânicos evidenciaram que a resistência à tração na flexão, resultados apresentados no Gráfico 03, foi mantida ou incrementada com a adição do PVM, em comparação ao traço de referência.

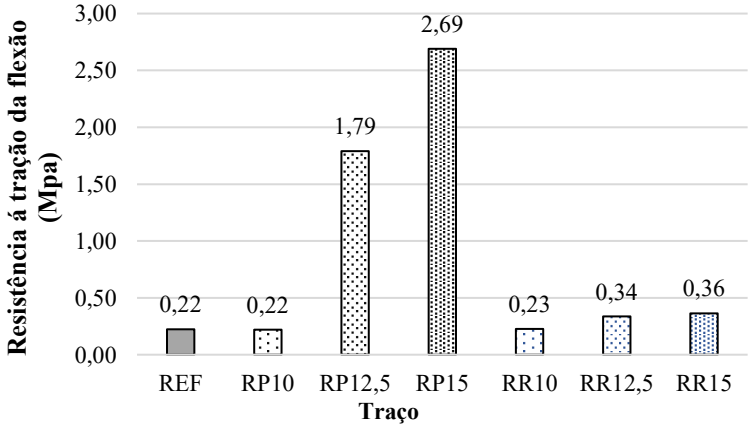


Gráfico 03: Resistência à Tração na Flexão
Fonte: Autores (2026)

Esse desempenho é atribuído principalmente ao efeito filer da fração fina do vidro, que promove o preenchimento de vazios e a densificação da matriz cimentícia, além da morfologia angular das partículas, que favorece o intertravamento mecânico e dificulta a propagação de fissuras sob esforços de tração.

No Gráfico 04 são apresentados os resultados da relação à resistência à compressão e, observou-se comportamento distinto em função da granulometria e do teor de substituição. Os traços com PVM retido e o traço com 10% de resíduo passante apresentaram resistências inferiores ao traço de referência. Esse resultado é associado à geometria angular das partículas de vidro, cujas arestas vivas atuam como concentradores de tensão, favorecendo a nucleação precoce de microfissuras sob carregamento compressivo, conforme evidenciado por análises microestruturais por microscopia eletrônica de varredura.

Por outro lado, os traços com 12,5% e 15% de PVM passante apresentaram resistências à compressão superiores ao traço de referência, indicando a existência de uma faixa ótima de substituição. Nesse intervalo, o volume de finos parece maximizar o empacotamento das partículas e a densificação da matriz, potencializando o efeito filer e favorecendo a formação de produtos de hidratação mais uniformemente distribuídos.

De modo geral, os resultados indicam que a fração mais fina do pó de vidro moído apresenta desempenho superior, sobretudo pela combinação entre maior estabilidade reológica no estado fresco e ganho de desempenho mecânico no estado endurecido para determinados teores de substituição. Esses achados reforçam o potencial do PVM como material alternativo sustentável para aplicação em argamassas autonivelantes, destacando a importância da adequada seleção da granulometria e do teor de incorporação.

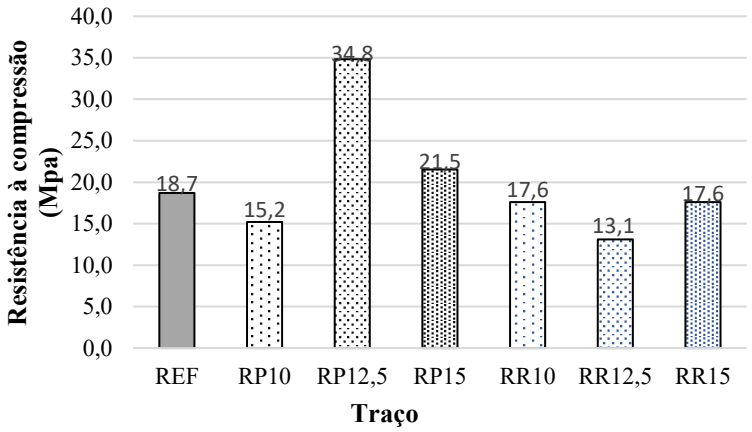


Gráfico 04: Resistência à Tração na Flexão
Fonte: Autores (2026)

A análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada com o objetivo de complementar a interpretação dos resultados reológicos e mecânicos, permitindo a avaliação da morfologia das partículas de pó de vidro moído (PVM) e de sua interação com a matriz cimentícia. As imagens obtidas evidenciaram diferenças marcantes entre as frações granulométricas analisadas, as quais se refletiram diretamente no desempenho das argamassas.

As micrografias do PVM passante na peneira de 0,15 mm revelaram partículas de dimensões reduzidas, observado na Figura 04, com elevada angularidade e presença de múltiplas arestas e vértices.

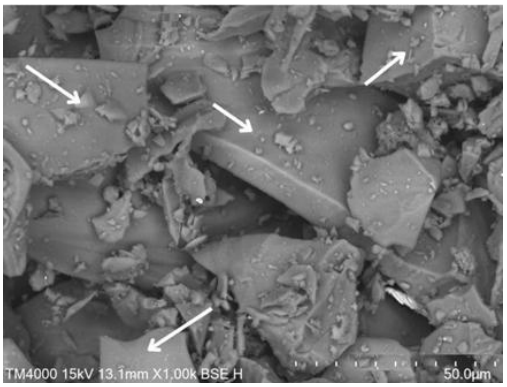


Figura 015: MEV - resíduo passante na peneira 0,15mm
Fonte: Autores (2026)

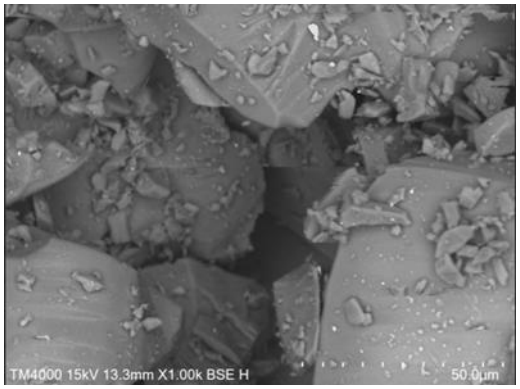


Figura 016: MEV - resíduo retido na peneira 0,15mm
Fonte: Autores (2026)

Essa morfologia resulta em aumento significativo da área superficial específica, favorecendo o efeito filer, com preenchimento mais eficiente dos vazios intersticiais da matriz. Tal característica explica o aumento da coesão e da estabilidade

observados no estado fresco, bem como o incremento das resistências mecânicas, especialmente à compressão, nos teores de 12,5% e 15%, em que se observou uma matriz mais densa e homogênea.

Por outro lado, as imagens referentes ao PVM retido na peneira de 0,15 mm (Figura 05) indicaram partículas de maior dimensão, também angulares, porém com superfícies predominantemente lisas e vítreas. Essa condição contribui para a redução do atrito entre as partículas sólidas e a pasta cimentícia, justificando a maior fluidez observada nos ensaios de espalhamento. Entretanto, a presença de arestas vivas e cantos pontiagudos nessas partículas foi associada à atuação como concentradores de tensão sob carregamento compressivo, favorecendo o surgimento e a propagação de microfissuras, o que se refletiu na redução da resistência à compressão para os traços contendo essa fração.

Adicionalmente, a análise das superfícies de fratura dos corpos de prova evidenciou que as argamassas com maior teor de PVM fino apresentaram microestrutura mais compacta, com menor incidência de vazios e melhor aderência entre a pasta cimentícia e as partículas de vidro. Em contraste, nos traços com PVM mais grosso, observaram-se regiões com descontinuidades e microfissuras iniciadas junto às arestas das partículas, corroborando os resultados mecânicos obtidos.

De forma geral, a análise por MEV confirmou que o desempenho das argamassas autonivelantes está fortemente relacionado à morfologia e à granulometria do PVM incorporado. A fração mais fina favorece a densificação e a homogeneização da matriz cimentícia, enquanto a fração mais grossa, embora contribua para a fluidez, pode comprometer o desempenho mecânico sob compressão. Esses achados reforçam a importância do controle granulométrico do resíduo para a otimização do comportamento global do compósito

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que a incorporação do pó de vidro moído (PVM) como substituto parcial do agregado miúdo em argamassas autonivelantes é tecnicamente viável, desde que adequadamente controladas a granulometria e o teor de substituição. No estado fresco, todas as misturas mantiveram elevada fluidez e capacidade de autonivelamento, atendendo aos requisitos de espalhamento, viscosidade e habilidade passante. Observou-se que a fração mais fina do PVM promoveu maior estabilidade reológica, reduzindo a ocorrência de exsudação e segregação, enquanto a fração mais grossa favoreceu o aumento da fluidez, com leve prejuízo à coesão em alguns teores.

No estado endurecido, a adição do PVM resultou em manutenção ou incremento da resistência à tração na flexão, comportamento atribuído ao efeito filer e ao intertravamento mecânico proporcionado pela morfologia angular das partículas de vidro. Em relação à resistência à compressão, verificou-se desempenho dependente da granulometria e do teor de incorporação, com destaque positivo para os teores de 12,5% e 15% do PVM passante na peneira de 0,15 mm, nos quais houve ganho de resistência em relação ao traço de referência.

A análise microestrutural por MEV corroborou os resultados mecânicos, evidenciando que a fração mais fina do PVM contribui para a densificação e homogeneização da matriz cimentícia, enquanto partículas mais grossas tendem a atuar como concentradores de tensão sob carregamento compressivo. De forma geral, os resultados indicam a existência de um intervalo ótimo de substituição, no qual se maximizam os benefícios físicos do resíduo sem comprometer o desempenho do compósito.

Assim, o uso do pó de vidro moído, especialmente em sua fração mais fina, mostra-se uma alternativa promissora e sustentável para aplicação em argamassas autonivelantes, contribuindo para a valorização de resíduos e para a redução do consumo de recursos naturais. Recomenda-se, contudo, a realização de estudos complementares, com maior número de repetições e idades de ensaio, visando à consolidação estatística dos resultados e à definição precisa do teor ótimo de incorporação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro que permitiu a compra de equipamentos utilizados nesta pesquisa por meio do MultiLab e à Universidade do Oeste de Santa Catarina - Unoesc, pelo apoio recebido. Bem como à empresa Camargo Química pelo envio dos aditivos utilizados na confecção das amostras, bases primordiais do presente estudo.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.211 – Agregados para concreto - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2022.

____. **NBR 11.768-1 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2019.

____. **NBR 13.279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável - Parte 2.** Rio de Janeiro, 2017.

____. **NBR 15823-4: Concreto autoadensável - Parte 4.** Rio de Janeiro, 2017.

____. **NBR 15823-5: Concreto autoadensável - Parte 5.** Rio de Janeiro, 2017.

____. **NBR 16.697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: 16 nov. 2025.

CHAVES, P. S. **Argamassa autonivelante com adição mineral (fíler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2018.

MENDES, Gabriela Azambuja. **Dosagem de argamassa autonivelante com adição de resíduos do corte de mármores e graníticos (RCMG): análise das propriedades físicas e mecânicas**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina - Udesc, Joinville, 2019. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2019_08_05_Gabriela_Azambuja_Mendes_15689961309151_706.pdf. Acesso em: 10 dez. 2025.

NENEVÊ, B, L. **Desenvolvimento de Formulações de Argamassas Autonivelantes para Contrapiso e Proposição de Requisitos de Desempenho**. Trabalho de conclusão de curso – UFPR - Curitiba, 2017.

RIBEIRO NETO, Djalma Valério. **Efeito da utilização de resíduos sólidos de rochas ornamentais de seridó potiguar nas propriedades de argamassa autonivelante**. 2023. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN, Natal, 2023. Disponível em: https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/2622/Djalma%20Val%c3%a9rio%20Ribeiro%20Neto_Argamassa%20autonivelante%20com%20res%c3%adduo%20de%20RPRO.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 nov. 2025.

RIBEIRO NETO, D. V.; SILVA, T. M. R.; SILVA, A. S.; MONTEIRO, MACHADO, T. G.; NOBREGA, A. F. **Estudo da utilização do resíduo de vidro em argamassas autonivelantes: uma análise das propriedades no estado fresco.** In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2025. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/6846/5167>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MALVA FIBER BIOMATS (*Urena lobata* L.) AS AN ALTERNATIVE TO PLASTIC MULCH: TECHNOLOGICAL INNOVATION AND BIOECONOMIC POTENTIAL IN THE AMAZON

1 Albejamerte Pereira de Castro, 2 Aldenor da Silva Ferreira, 3 Jozângelo Fernandes da Cruz, 4 Cléo Carvalho Ohana, 5 Silvia Tavares Maia, 6 Luciana Raffi Menegaldo Ferreira, 7 Vinicius Rainer Boniolo

1 Federal University of Amazonas, e-mail: albejamere@ufam.edu.br; 2 Federal University of São Carlos, Lagoa do Sino Campus, e-mail:aldenorferreira@ufscar.br; 3Federal Institute of Acre, Cruzeiro do Sul Campus, e-mail: jozangelo.cruz@ifac.edu.br; 4 Federal University of Amazonas, e-mail: cleohana@gmail.com; 5 Federal University of Amazonas, e-mail: silvia.maia98@gmail.com; 6 Federal University of São Carlos, Lagoa do Sino Campus, e-mail: lucianarmf@estudante.ufscar.br; University of Campinas, e-mail: rainer.engambiental@gmil.com

Keywords: Biodegradable biomats; Bioeconomy; Natural fibers.

Abstract

The increasing use of plastics in agriculture, particularly in the form of mulching, has generated significant environmental impacts associated with the low biodegradability of these materials. In this context, the present study analyzes the development of a biodegradable mat produced from malva fiber (*Urena lobata* L.) as a sustainable alternative to the use of agricultural plastics.

The research integrates agronomic, technological, and environmental approaches, including the experimental cultivation of malva in upland conditions, the improvement of fiber extraction processes, the development of biomaterials, and agronomic evaluation in pineapple cultivation. Preliminary results indicate that the biomats have potential for maintaining soil moisture, controlling weed growth, and improving soil conditions, in addition to undergoing natural decomposition without generating persistent residues. Furthermore, the use of malva fiber in the production of ecobags is discussed, expanding the possibilities for value addition. It is concluded that the valorization of malva within the context of the Amazon bioeconomy may contribute to reducing dependence on petrochemical materials, strengthening family farming, and promoting the development of sustainable production chains in the region.

Introduction

The intensive use of disposable plastics throughout the 20th century consolidated a consumption pattern based on convenience and disposability, whose environmental impacts have become increasingly critical. The persistence of these materials in the environment, combined with their widespread dispersion, has generated significant consequences for ecosystems and human health, particularly due to the accumulation of waste and the formation of microplastics in soils and aquatic environments (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017; SHEN; WORRELL; PATEL, 2010). This scenario highlights a central contradiction of modernity: the productive and logistical efficiency associated with synthetic materials has been accompanied by substantial long-term environmental costs.

In this context, the search for alternative materials, especially those of renewable and biodegradable origin, has become central to sustainability debates, mobilizing different fields of knowledge, from the social sciences to engineering. Plant fibers present relevant environmental advantages over petroleum-derived polymers, particularly in terms of biodegradability, lower pollutant emissions throughout their life cycle, and the possibility of reintegration into the environment without generating persistent residues (SHEN; WORRELL; PATEL, 2010).

In the agricultural sector, these advantages become even more evident, especially considering the growing concern about the impacts of plastic use in soils, as in the case of conventional mulching, whose incomplete degradation compromises environmental quality and the sustainability of production systems (STEINMETZ et al., 2016). Another product made from malva fibers is ecobags, reusable bags produced from natural fibers such as jute, malva, sisal, and cotton, which represent a concrete response to the need to replace single-use plastics.

In this scenario, the bioeconomy emerges as a strategic approach by articulating the sustainable use of natural resources with economic value generation, proposing the replacement of fossil-based materials with renewable alternatives. It represents a paradigm that repositions nature not only as a source of resources, but also as a foundation for technological innovation and the development of more sustainable production systems.

In the Brazilian Amazon, particularly in the states of Amazonas and Pará, malva production has historical, economic, and social relevance. Predominantly developed in floodplain areas and associated with family farming, this activity once positioned Brazil as an important global producer of these fibers, especially during the 1960s and 1970s (HOMMA, 2014; FERREIRA, 2022). In addition to its economic importance, it is a low-impact agricultural practice, based on natural soil fertilization processes linked to the hydrological dynamics of Amazonian rivers.

Despite the decline observed since the 1990s, associated with the expansion of synthetic materials and the weakening of the production chain, malva fibers have regained relevance in the contemporary context, particularly as strategic inputs for the development of biomaterials (FERREIRA, 2022). Among these, biodegradable biomats for agricultural use stand out as a

promising alternative to plastic mulching, contributing to soil protection, moisture retention, and the incorporation of organic matter during decomposition (KASIRAJAN; NGOUAJIO, 2012).

Additionally, the use of these fibers in the production of ecobags expands the possibilities for inserting malva into diversified markets, reinforcing its potential for value addition and the structuring of sustainable production chains. This diversification is essential for strengthening the Amazon bioeconomy, as it integrates technological innovation, valorization of natural resources, and income generation for local populations (FERREIRA, 2022).

In this sense, the present study aims to analyze the bioeconomic potential of malva fibers as a sustainable alternative to plastic materials, with emphasis on the development of biodegradable biomats for agricultural use and, complementarily, on the production of ecobags, considering their environmental, technological, economic, and social dimensions.

Material and Methods

This study was developed using an integrated approach, combining bibliographic research and fieldwork, with the aim of analyzing the potential of malva fiber (Urena lobata L.) in the development of biodegradable biomats for agricultural use, as well as its implications within the context of the Amazon bioeconomy.

From a methodological standpoint, the research is characterized as qualitative and exploratory in nature, based on a literature review and document analysis. Scientific articles and technical reports related to natural fiber production, bioeconomy, and environmental sustainability were analyzed. Among the main references used, the work *A cultura da juta e da malva na Amazônia Ocidental: sementes de uma nova racionalidade ambiental?* (WITKOSKI et al., 2010) stands out, bringing together contributions from several researchers on the productive, social, and environmental aspects of malva cultivation.

The bibliographic analysis was conducted using an interdisciplinary approach, integrating contributions from ecological economics and the social sciences, with a focus on understanding the production chain of natural fibers and their role within the Amazon bioeconomy. This stage enabled the development of the theoretical framework and the contextualization of plant fibers as alternatives to petroleum-based materials.

The fieldwork stage was carried out at the Experimental Farm of the Federal University of Amazonas (UFAM), in an area characterized by Yellow Oxisol, where malva cultivation was established under upland conditions. Crop management was conducted based on agronomic practices adapted to the region's soil and climate conditions, including soil preparation, acidity correction, fertilization, and monitoring of plant development.

After the production cycle, the raw material obtained was directed to the fiber extraction process using a mechanical decortication system. The extracted fibers were subjected to cleaning, drying, and structural organization procedures, and were subsequently used in the production of biodegradable biomat prototypes. These prototypes were developed with variations in density, thickness, and fiber distribution, in order to evaluate different material configurations.

The biomats were characterized in terms of their physical and functional properties, including mechanical strength, water retention capacity, and structural stability. Additionally, the degradation dynamics of the material under environmental conditions were considered, with the aim of evaluating its behavior over time when applied to the soil.

Agronomic evaluation was conducted through a field experiment with pineapple cultivation, using a randomized block design, involving different soil cover treatments, including malva biomats, conventional plant cover, uncovered soil, and plastic mulching. Variables related to soil conditions, such as moisture and temperature, were monitored, as well as plant development parameters and the occurrence of weeds.

It is important to note that the study is still ongoing, and definitive conclusions regarding the comparative performance of treatments are not yet possible. However, preliminary observations indicate that the use of malva biomats shows significant potential for weed control and contributes to maintaining soil moisture conditions. These initial findings reinforce the relevance of the study and highlight the need for further analysis to consolidate the results.

The data obtained are being analyzed using descriptive and inferential statistical methods, according to the nature of the variables investigated, in order to identify behavioral patterns and relationships among the analyzed factors. The interpretation of results is carried out in an integrated manner, articulating the agronomic, technological, and environmental dimensions involved in the study.

Results and Discussion

The analysis of the potential of malva fibers for the development of biodegradable biomats is situated within a broader context marked by two of the most pressing contemporary challenges: climate change and biodiversity loss. The accelerated loss of species and the degradation of ecosystems compromise the functioning of natural systems and directly affect ecosystem services essential for sustaining life and human well-being (DÍAZ et al., 2019; ROCKSTRÖM et al., 2009). The reduction of biodiversity may trigger cascading species loss processes, increasing ecological instability and intensifying environmental and social impacts on a global scale.

In this context, the debate on development models capable of reconciling economic growth, technological innovation, and environmental conservation becomes increasingly central. The bioeconomy has emerged as a relevant strategy by promoting the sustainable use of renewable biological resources for the production of food, energy, materials, and services (GEORGESCU-ROEGEN, 1975). From the perspective of ecological economics, economic activity should be understood as a subsystem of the biosphere, dependent on physical and ecological limits (MAY; LUSTOSA; VINHA, 2010), thereby challenging the paradigm of unlimited growth and reinforcing the need for a transition toward low-carbon economies.

In the Amazon, this discussion assumes strategic importance. The region hosts the largest tropical rainforest on the planet and one of the greatest concentrations of biodiversity in the world, as well as a vast repository of traditional knowledge related to the use of natural resources (NOBRE, 2026). Despite this richness, significant challenges remain in transforming this potential into technological innovation and income generation for local populations. The lack of robust strategies integrating science, technology, and productive chains limits the consolidation of a fully structured bioeconomy in the region.

Recent experiences demonstrate, however, that the valorization of sociobiodiversity resources can generate economically relevant production chains. The case of açaí (Euterpe oleracea Mart. and Euterpe precatoria Mart.) stands out as an emblematic example of Amazonian bioeconomy, highlighting the potential for value generation through the sustainable use of natural resources. In this context, plant fibers emerge as promising resources due to their renewable, biodegradable, and versatile nature, with applications across multiple sectors, including construction, textiles, packaging, and agriculture (FARUK et al., 2012).

In the agricultural sector, materials derived from natural fibers have been investigated as sustainable alternatives to replace synthetic inputs, particularly plastics used for soil covering. In this sense, the use of malva fiber in the development of biodegradable biomats represents a strategy aligned with the growing demand for sustainable innovation.

The integrated analysis of the production, processing, and application of malva fiber highlights its potential as a strategic input for the development of biomaterials aimed at agricultural sustainability. The articulation between upland cultivation, mechanized processing, and biomat development enables a systemic understanding of the technical, environmental, and productive viability of this value chain within the Amazon bioeconomy.

Regarding upland cultivation, the adaptation of malva to conditions different from traditional floodplain systems represents a significant agronomic advancement. Cultivation in Yellow Oxisols, with appropriate soil correction and fertilization, expands the possibilities for territorial expansion and reduces dependence on the hydrological dynamics of Amazonian rivers. This productive transition tends to increase the stability of raw material supply, a key factor for the consolidation of more structured production chains.

Fiber quality is a central factor for its application in biomaterials. Parameters such as tensile strength, elasticity, density, and length indicate that malva fiber exhibits suitable characteristics for use in biomats, particularly due to the combination of mechanical resistance and structural flexibility.

In terms of processing, the mechanization of fiber extraction contributes to standardization and increased efficiency, while reducing physical labor demands. The development of technologies adapted to regional conditions is therefore essential for the technical feasibility of this production chain.

The development of biodegradable biomats from malva fiber represents a significant innovation, with potential application as soil cover in agricultural systems. Variations in parameters such as density and thickness allow adjustments in functional properties, including water retention and structural stability, which are essential for field performance.

Preliminary observations indicate that the use of these biomats contributes to soil moisture retention and shows significant potential for weed control, reducing competition for resources and promoting crop development. These findings reinforce the relevance of replacing synthetic materials with bio-based alternatives.

From an environmental perspective, the biodegradability of biomats represents a significant advantage over conventional plastic mulching, whose persistence in soil can generate long-term negative impacts. As malva biomats decompose, they contribute to the incorporation of organic matter into the soil, improving its physical, chemical, and biological properties (STEINMETZ et al., 2016).

Beyond agricultural applications, malva fiber also presents potential for diversification of uses, particularly in the production of ecobags as an alternative to plastic bags. This application expands value-added opportunities and highlights the multifunctionality of the fiber within the bioeconomy framework.

From a socioeconomic perspective, the valorization of the malva production chain may contribute to strengthening family farming in the Amazon, promoting income generation and productive inclusion. However, the consolidation of this potential depends on overcoming structural constraints and implementing public policies that foster innovation and the development of sustainable production chains.

Thus, the analysis indicates that malva biomats, along with complementary applications such as ecobags, should not only be understood as technical alternatives to plastic materials, but also as strategic drivers for sustainable development in the Amazon, integrating innovation, environmental conservation, and the valorization of sociobiodiversity.



Figure 1: Illustrative image of a biomat made from natural fibers.
Source: Available at: https://newlifeambiental.com.br/servico/biomantas-de-fibras-vegetais. Accessed on: Apr. 5, 2026.

Final Considerations

The results presented in this study indicate that malva fibers have significant potential to be consolidated as a sustainable alternative to plastic materials, particularly in the context of replacing petrochemical inputs with biodegradable biomaterials. In the specific case of agricultural biomats, preliminary data indicate promising performance in weed control and soil moisture retention, while also contributing to the reduction of environmental contamination associated with plastic use.

Beyond their technical feasibility, the use of these fibers should be understood within the broader framework of the bioeconomy, as a strategy capable of integrating technological innovation, the valorization of natural resources, and income generation. In this sense, the malva production chain presents considerable potential to contribute to regional development in the Amazon, especially due to its integration with family farming systems and its compatibility with low-impact agricultural practices.

However, the realization of this potential depends on overcoming structural constraints that still limit the consolidation of this production chain. Among these challenges are the limited availability of high-quality seeds, technological constraints in fiber processing, logistical difficulties, and the lack of consistent public policies to support production and innovation. Overcoming these barriers requires coordinated efforts among research institutions, producers, and public authorities to enable the development of local production systems based on the sustainable use of Amazonian sociobiodiversity.

Additionally, the diversification of fiber applications, as demonstrated by the production of biomats and ecobags, expands opportunities for value addition and market integration. This multifunctionality represents a strategic element for the economic resilience of the production chain, allowing it to adapt to different demands and productive contexts.

From an environmental perspective, the replacement of plastic materials with biodegradable alternatives is part of a global agenda aimed at addressing climate change and biodiversity loss. In this context, the adoption of plant-based biomaterials represents not only a technical solution but also an approach aligned with the ecological limits of the planet, as proposed by ecological economics.

On the other hand, the transition to sustainable materials is not limited to the technological dimension. It is a broader process involving changes in production and consumption patterns, requiring cultural, institutional, and regulatory transformations. The adoption of products such as ecobags and biomats implies, in this sense, a reconfiguration of social practices and production systems, guided by a new environmental rationality in which economic efficiency cannot be dissociated from ecological sustainability.

Finally, it is important to highlight that the results presented here, although still partial, point to consistent pathways for the consolidation of an Amazonian bioeconomy based on the sustainable use of natural resources and the valorization of local knowledge. The continuity of research and further analysis will be essential for validating the findings and advancing the large-scale application of these technologies.

Thus, malva biomats and ecobags should not be understood merely as alternative products, but as concrete expressions of a development model that seeks to reconcile innovation, environmental conservation, and social justice, contributing to the construction of more sustainable futures in the Amazon and in Brazil.

References

DÍAZ, S.; SETTELE, J.; BRONDÍZIO, E. S. *et al*. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn: IPBES, 2019. Disponível em: https://share.google/4IKFEjVhOZIv6qZQ9. Acesso em 7 abr. 2026.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, v. 37, p. 1552–1596, 2012. Disponível em: https://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2019/11/Biocomposites_reinforced_with_natural_fi.pdf. Acesso em: 5 fev. 2026.

FERREIRA, A. da S. *Fios dourados: singularidades e possibilidades do cultivo de juta entre o Brasil e a Índia.* Embu das Artes, SP: Alexa Cultural. Manaus: EDUA, 2022. 398 p.

GEORGESCU-ROEGEN, N. Bioeconomic aspects of entropy. *In*: ZEMAN, J. (Ed.) *Entropy and Information in Science and Philosophy.* Amsterdam: Elsevier, 1975. Disponível em: https://share.google/VklFZqkD0uDqyxL4p. Acesso em: 5 fev. 2026.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, v. 3, n. 7, 2017. Disponível em: https://sciencedatabase.strategian.com/?p=1546#:~:text=Description:%20Plastics%20have%20outgrown%20most,1000005&sciodt=0%2C16&hl=en. Acesso em: 6 abr. 2026.

HOMMA, A. K. O. Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia e domesticação. Belém: Embrapa, 2014.

KASIRAJAN, S.; NGOUAJIO, M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 32, p. 501–529, 2012.

NOBRE, C. A.; NOBRE, I. A. The Amazonia Third Way: The Amazonia sustainable development initiative. *Proceedings of the*

National Academy of Sciences, v. 116, n. 21, p. 10717–10723, 2019. Disponível em: https://www.intechopen.com/chapters/63918. Acesso em: 7 abr. 2026.

NOBRE, C. Amazônia tem ciência e biodiversidade, mas falta inovação. *UOL Ecoa*, 10 mar. 2026. Disponível em: https://www.uol.com.br/ecoa/colunas/carlos-nobre/2026/03/10/amazonia-tem-ciencia-e-biodiversidade-mas-falta-inovacao.htm. Acesso em: 19 mar. 2026.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K. *et al*. A safe operating space for humanity**.** *Nature*, London, v. 461, p. 472–475, 2009. DOI: https://doi.org/10.1038/461472a

SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. Present and future development in plastics from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 4, n. 1, 2010.

STEINMETZ, Z.; WOLLMANN, C.; SCHAEFER, M.; et al. Plastic mulching in agriculture: trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment*, v. 550, p. 690–705, 2016.

WITKOSKI, A. C. *et al*. (org.). *A cultura da juta e da malva na Amazônia Ocidental: sementes de uma nova racionalidade ambiental?* Manaus: EDUA, 2010.

APPLICATION OF CIRCULAR ECONOMY IN URBAN SOLID WASTE MANAGEMENT: STRATEGIES, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES FOR SUSTAINABLE CITIES

1 Camila Gallassi, 2 Vinicius Rainer Boniolo, 3 Rafael de Oliveira Tiezzi, 4 Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho

1 Federal University of Paraná (UFPR), e-mail: camilagallassi@gmail.com; 2 State University of Campinas, e-mail: v301257@dac.unicamp.br; 3 Federal University of São Carlos (UFSCar) - Lagoa do Sino Campus, e-mail:rafaeltiezzi@ufscar.br; 4 Federal University of São Carlos (UFSCar) - Lagoa do Sino Campus, e-mail:jorge.pantoja@ufscar.br

Palavras-chave: Circular economy; solid waste; sustainable cities.

Abstract

Rapid urbanization and growing solid waste generation challenge cities' environmental, social, and economic sustainability. The linear economy model, based on extraction, production, consumption, and disposal, is increasingly unsustainable. The circular economy (CE) offers an alternative by promoting waste reduction, material reuse, recycling, and regeneration of natural systems. This study reviews global and Brazilian CE initiatives in urban solid waste management, including pilot projects, municipal programs, national policies, and international collaborations, highlighting strategies such as selective collection, composting, reverse logistics, and energy valorization. CE adoption reduces environmental impacts, operational costs, and landfill dependence while generating social and economic benefits, including employment and community engagement. In the energy sector, CE supports resource efficiency, renewable energy integration, and second-life applications for batteries and industrial by-products, contributing to low-carbon transitions. The study underscores the importance of public policy, technological innovation, and collaborative governance for advancing sustainable, resilient, and circular urban systems aligned with SDGs 6, 7, 11, and 12.

Introduction

The increasing urbanization and generation of solid waste in cities place significant pressure on public management systems, resulting in environmental, social, and economic challenges. The traditional linear economy model, based on production, consumption, and disposal, is unsustainable, even in urban centers, which face limitations in landfill space and high costs for waste treatment. According to Silva, Sano, and Chaves (2021), the growth in the consumption of complex and disposable materials under the current linear economy scenario results in a high demand for sanitary landfills.

According to Santos et al. (2023), especially in developing countries, there is an observed increase in waste generation due to factors such as economic development and population and urban growth. Moreover, these factors drive changes in lifestyle, leading to alterations in production and consumption patterns. Consequently, there is an increase in the generation of solid waste, both in quantity and diversity (Marchi & Gonçalves, 2020). For this reason, it is necessary to maintain constant updates on the topic to identify the best practices and alternatives for urban waste management.

In this context, the circular economy emerges as a promising alternative, proposing the reduction of natural resource use, the maximization of material reuse, and the minimization of waste. Tiossi and Simon (2021), cited in Amui et al. (2016), point out that in the current situation, it is necessary to change the original economic model, which is considered harmful to the ecological system. The application of circular economy principles to urban waste management can reduce environmental impacts and generate new economic and social opportunities, such as the development of value chains based on recycling, composting, and clean energy production.

According to the Ellen MacArthur Foundation, one of the leading authorities on the subject, the circular economy is considered a restorative and regenerative economic system by design, aimed at decoupling economic growth from the consumption of finite resources. It is based on three fundamental principles: eliminating waste and pollution at the source, circulating products and materials for as long as possible, and regenerating natural systems.

The Foundation further notes that, although urban centers occupy only 2% of the Earth's land surface, they consume more than 75% of natural resources, generate over 50% of solid waste, and are responsible for up to 60% of greenhouse gas emissions. This dynamic exacerbates pollution, accelerates climate change, and contributes to biodiversity loss. In the context of climate change, it is necessary to reconsider strategies for reducing greenhouse gas emissions, as the transition to renewable energy and energy efficiency alone addresses only 55% of global emissions (Ellen MacArthur Foundation, 2024).

Highlighting the importance of strengthening and consolidating initiatives aimed at sustainable development, documents released in December 2015, including the European Union Action Plan for the Circular Economy and the Paris Agreement, adopted during the 21st Conference of the Parties (COP 21), emphasize the need to address climate change, promote the transition to a Circular Economy (CE), and adopt a life-cycle approach to products and services (Oliveira, França, & Rangel, 2019).

In this context, this study directly contributes to the debate on sustainable cities, a central theme in global policies aimed at combating climate change and promoting sustainability. Furthermore, the integration of circular solutions in waste management can transform the way cities operate, creating more resilient systems that provide a higher quality of life for their inhabitants.

This aligns with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly Goal 11 (Sustainable Cities and Communities), which aims to make cities and human settlements inclusive, safe, resilient, and sustainable, addressing, among other issues, the need to reduce the negative per capita environmental impact of cities by 2030, focusing on air quality and municipal waste management; Goal 12 (Responsible Consumption and Production), which seeks to ensure sustainable consumption and production patterns, including the substantial reduction of waste generation by 2030 through prevention, reduction, recycling, and reuse; and Goal 6 (Clean Water and Sanitation), whose main objective is to ensure the availability and sustainable management of water and sanitation for all, addressing the need to improve water quality by 2030, reduce pollution, eliminate dumping, minimize the release of hazardous chemicals and materials, halve the proportion of untreated wastewater, and substantially increase global recycling and safe reuse (UNITED NATIONS BRAZIL, n.d.).

The primary objective of this article is to analyze the application of circular economy principles in the urban environment to optimize solid waste management; propose strategies to reduce environmental impact, enhance the value of discarded materials, and promote more efficient cities; and address the challenges and opportunities associated with implementing circular strategies in waste management. To this end, the study investigates the economic and social opportunities generated by the circular economy in the urban context and examines how cities can adopt and implement strategies for managing urban waste, identifying key practices and technologies based on circular economy principles applied to urban solid waste management. Additionally, the study analyzes the challenges and opportunities of transforming waste into resources, contributing to a more sustainable and balanced future. Finally, public policies and governance models are proposed to encourage the adoption of the circular economy in cities.

Methodology

The study can be characterized as exploratory research that employed an integrative literature review approach, combining aspects of narrative and systematic reviews, with a focus on circular economy and urban waste management. It encompassed scientific articles, technical reports, books, and other publications to compile the fundamental concepts of the circular economy, as well as its application in the urban context, specifically relating to urban solid waste management. In addition to the integrative approach, it is important to highlight that the study can also be considered mixed-methods, as it combined qualitative and quantitative aspects in the description of the cases analyzed.

After structuring the concepts based on a narrative perspective, a systematic approach was used to identify cases of the application of these concepts, aiming to analyze trends and the implementation of successful initiatives in Brazil and worldwide in urban waste management related to the circular economy. This stage was guided by the following research question: “How are the principles of the circular economy being applied in urban solid waste management, and what strategies, challenges, and opportunities exist in the context of sustainable cities?”

The search for publications utilized platforms such as Web of Science, Scopus, SciELO, and primarily Google Scholar, which, according to Paixão, Pereira, and Santos (2024, apud Canto et al., 2023), is a widely used tool in the academic community and includes relevant international scientific data. Keywords were used in combination with the Boolean operator “AND” to enhance the precision of the search, for example: “Circular Economy” AND “Sustainable Cities,” “Solid Waste” AND “Circular Economy,” and “Urban Waste Management” AND “Circular Economy,” among others. An initial screening of the publications was performed based on relevance, first by reviewing titles and abstracts, and then considering the most recent publications within the last five years (2019–2024), selecting those most appropriate for the topic and proceeding with full-text analysis. From this reading, information was extracted on applied strategies, reported challenges, identified opportunities, and measurable indicators when available. This process enabled the compilation of examples and the identification of potential strategies, challenges, and opportunities related to circular waste management practices in cities that serve as examples of concept application.

Furthermore, a survey was conducted on public policies, infrastructure, technological innovation, and civil society engagement in the locations corresponding to these cases, in order to understand which initiatives within public administration can encourage the adoption of such practices.

Finally, the results were discussed based on this information, and the study sought to compile challenges related to issues such as infrastructure and governance that limit the adoption of the circular economy in cities. Recommendations for public policies to promote the transition to a circular model were also provided, including the proposal of collaborative governance mechanisms involving both government and civil society to incentivize the adoption of the circular economy in urban waste management. Conclusions were drawn regarding the feasibility and benefits of the circular economy in urban management for promoting more efficient and sustainable cities.

Development

According to Santana et al. (2022), the circular economy (CE) is a key alternative for sustainable development of organizations and society. Emerging as a divergent model from the traditional linear economy, which follows the extract-produce-dispose logic (Lima, Silva, & Sobral, 2022), CE emphasizes waste elimination, material reuse, and recycling, thereby keeping resources in circulation and treating waste as input for new production processes (Kleina, 2023). This approach relies on two cycles: the technical cycle, involving reuse, repair, remanufacturing, and recycling, and the biological cycle, which returns biodegradable materials to nature, such as through composting of organic waste (Kleina, 2023).

CE is guided by three principles: eliminating waste and pollution, circulating products and materials, and regenerating nature. The principle of circulating materials aligns with designing products to re-enter the economy at the end of their life cycle,

either technically or biologically (Ellen MacArthur Foundation, 2024; Kleina, 2023). Regenerating nature focuses on improving environmental quality rather than merely extracting resources, following a regenerative model inspired by natural systems.

In the context of urban solid waste management, CE's approach of transforming waste into resources is essential for promoting sustainable cities that meet present needs without compromising future generations (Abdalla & Sampaio, 2018 apud Lacerda & Cândido, 2013). In Brazil, initiatives are limited, with no comprehensive plan or guidelines (Ribeiro, Morais, & Lima, 2023). Notable projects include "Sampa Circular," a partnership between São Paulo's city government and the Ellen MacArthur Foundation, and the 2024 National Circular Economy Strategy, established by decree to guide the transition from a linear to a circular economy, under the oversight of the National Circular Economy Forum (Ministry of Development, Industry, Trade and Services, 2024).

Practical CE strategies for urban waste management include selective collection and sorting, reverse logistics, reuse and repair initiatives, composting, biodigestion, fertigation, and wastewater reuse. In Brazil, approximately half of urban solid waste is organic (around 36 million tons), yet only 1% is reused (Santos et al., 2022). According to ABRELPE data, organic waste represents 45.3% of urban solid waste, recyclables 33.6% (plastics 16.8%, paper/cardboard 10.4%, glass 2.7%, metals 2.3%, multilayer packaging 1.4%), other wastes 5.6%, and rejects 15.5% (Ministry of Environment and Climate Change, 2020). Given this composition, landfilling remains the predominant disposal method globally, despite its environmental impact, highlighting the importance of composting, energy recovery, and selective collection for sustainable urban waste management (Silva, Sano, & Chaves, 2021).

Analysis of Successful Practices, Strategies, and Technologies

An analysis of publications and articles on circular economy (CE) applications in urban solid waste management identified several successful initiatives worldwide that could be applied in Brazil. These examples were categorized by scope and impact: pilot projects, municipal, state/provincial, national, and global/international initiatives.

Pilot Projects

In Belém-PA, the Acqua Marine Building Pilot Project promoted selective waste collection through resident awareness and environmental education, aiming for an environmental certification to recognize sustainable practices (Santos et al., 2023). In Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, an environmental education program engaged 291 participants in domestic composting and vermicomposting, combining theoretical and practical workshops. After the program, 65.2% of participants reported composting at home, while 2.2% donated organic waste, illustrating the effectiveness of pilot projects in fostering circular practices (Santos et al., 2022). Pilot projects allow for testing innovative methods under controlled conditions, providing data on feasibility, impact, and community acceptance, and serve as replicable models for broader implementation.

Municipal-Level Initiatives

In Flanders, Belgium, over 5,000 volunteers were trained in home composting over 25 years, resulting in a 41% adoption rate among residents (Santos et al., 2022 apud Vlaco, 2018). In Amsterdam, Netherlands, the city committed in 2020 to achieving a fully circular economy by 2025, applying the Donut Economy model (Raworth) and developing tools like the "Amsterdam Circular Monitor" to track material flows, CO_2 emissions, and strategic trends (Ellen MacArthur Foundation, 2024; Parreira & Guimarães, 2024).

In Brazil, circular economy concepts have been applied through composting programs. In Lages, Santa Catarina, the "Lixo Orgânico Zero" project enabled an estimated 80% of school organic waste to be composted (Santos et al., 2022 apud Oliveira et al., 2019). In Curitiba, Paraná, two public programs—"Câmbio Verde," exchanging recyclables for food, and "Lixo Tóxico Domiciliar," collecting hazardous household waste—illustrate coordinated municipal action promoting circular practices and community engagement (Weinschutz & Kolicheski, 2019).

These examples demonstrate growing adoption of circular economy principles in diverse contexts, from household composting to advanced public policies. Municipal initiatives in Flanders, Amsterdam, Lages, and Curitiba highlight the effectiveness of coordinated governance in waste management, community engagement, and replicable models. Success depends on collaboration among local governments, businesses, and civil society, emphasizing the role of municipal policies in fostering a sustainable, regenerative, and circular economy.

State/Province-Level Initiatives

In Pontevedra, Spain, the "Revitaliza" program integrates domestic, community, and small-scale composting, emphasizing local waste management ("zero kilometer") (Santos et al., 2022 apud Mato et al., 2019). In California, USA, "Zero Waste" initiatives promote reuse and recycling, aiming to reduce landfill disposal. Significant achievements include recycling 500 billion bottles and cans, processing 300 million tires, and recycling hazardous waste such as 2.2 billion gallons of used motor oil (CalRecycle, [s/d]). Despite these efforts, over 40 million tons of waste are still sent to landfills annually, highlighting the importance of scaling circular practices at state levels. These examples demonstrate that integrated, decentralized approaches supported by broad public policies can enhance circular economy adoption and long-term impact.

National-Level Initiatives

Japan exemplifies efficient national waste management due to high population density and limited land, employing incineration with energy recovery as a primary treatment method (Silva, 2018 apud Yolin, 2015). Since 1954, the Public Cleaning Law has assigned municipal responsibility for household and certain special wastes, encouraging waste separation, recycling,

and source reduction. Japan currently manages 45.3 million tons of solid waste annually, with a recycling rate of 20.8% and per capita generation of 400 kg/year. National legislation, combined with public education on waste separation, illustrates how coordinated policies can create a robust, circular, and sustainable waste management system (Silva et al., 2018).

Global/International Initiatives

The "Fashion for Good" platform (founded 2017) exemplifies global collaboration to promote sustainable innovation in the fashion industry. It brings together brands, retailers, suppliers, NGOs, innovators, and financiers to rethink product design, production, use, and reuse, including innovations from organic waste-derived materials and rental/resale business models, resulting in over 3,000 innovations and 421 implementation cases (Fashion for Good, [s/d]). In India, a project focused on textile waste (3,944 kt/year, 48% recyclable) tested semi- and fully-automated sorting technologies, improving fiber and color categorization for high-quality recycling feedstock, demonstrating the feasibility of advanced recycling systems (Fashion for Good, [s/d]).

These global and international examples underscore the importance of collaborative action across sectors and borders, showing that innovation, technology, and coordinated networks can significantly advance circular economy adoption worldwide, providing scalable and adaptable solutions for sustainable urban and industrial systems.

Economic and Social Opportunities Generated by the Circular Economy

Beyond successful practices, strategies, and technologies, the study evaluated how the circular economy can create new value chains, generate employment, and stimulate the local economy through material reuse and waste valorization. The purpose of this analysis was to explore social benefits, such as improving urban quality of life, promoting the social inclusion of vulnerable groups in recycling and composting initiatives, and strengthening community participation in waste management.

Observed benefits include operational cost reductions and resource efficiency, decreased raw material expenses, process optimization, and waste reduction, consequently lowering disposal costs. Furthermore, opportunities for innovation and new business models were identified, including the creation of new markets and products, and the promotion of innovation and sustainable design.

The circular economy in waste management also serves as a driver for job creation, economic development, and opportunities in emerging sectors, such as electronic waste recycling. In Brazil, for example, the structuring and implementation of reverse logistics systems by manufacturers, importers, distributors, and retailers of electronic products and components is mandated under the National Solid Waste Policy, established by Law No. 12.305/2010. According to Pereira (2022) apud Azevedo et al. (2017), employment generation in this sector is feasible through investments in new recycling facilities for such materials.

Challenges in Implementing the Circular Economy

Some of the observed barriers to implementing the circular economy include the lack of effective public policies and supporting sectors, inconsistent regulations, non-competitive markets, and resistance to change from governments and private sectors, including the absence of circular economy targets within industrial policy (Tourinho, 2023 apud World Bank, 2022). Part of this resistance is typically associated with high initial implementation costs, difficulties in material recovery, organizational capacity, risk perception, and the lack of adequate infrastructure.

In the public sector, raising awareness and engaging civil society represents a challenge; if not properly addressed, it can hinder the widespread adoption of the circular economy in urban contexts. Additionally, many public managers lack knowledge on the subject, which complicates the implementation of effective policies. The absence of infrastructure for collection, sorting, and recycling of materials also constitutes a barrier to operationalizing circular practices, especially in regions distant from major urban centers (Streit, Faria, and Carvalho, 2022). Furthermore, the lack of fiscal and economic incentives discourages companies and industries from investing in the transition to a circular economy (Pinto, 2024).

According to the World Bank (2022) apud Tourinho (2023), private sector involvement will be essential for adopting circular economy-based business models; however, this is often driven more by profit opportunities than by corporate responsibility, with cost reduction and profit margin increases through input reduction remaining a key motivator. Within the private sector, Michaelis (2003) apud Miyashiro et al. (2023) questions the role of already established companies in implementing the circular economy, suggesting that because it is a disruptive concept and these companies were developed within the current market framework, their impact may be overestimated. Considering this, Hockerts and Wüstenhagen (2010) apud Miyashiro et al. (2023) argue that there may be greater opportunities for entities involved from the outset in sustainable development initiatives.

Circular Economy and the Energy Sector

The implementation of circular economy principles in the energy sector can enhance resource efficiency and reduce environmental impacts. By emphasizing the reuse, recycling, and recovery of materials used in energy production and infrastructure, such as metals from solar panels, batteries, and wind turbines, the sector can minimize the extraction of virgin resources and decrease associated carbon emissions (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2024; OLIVEIRA; FRANÇA; RANGEL, 2019). Moreover, the adoption of circular strategies supports the design of energy systems that prioritize longevity and modularity, allowing equipment and components to be repurposed or upgraded rather than discarded.

Circular economy practices also encourage the integration of renewable energy sources and distributed energy generation. For example, waste-to-energy projects transform municipal and industrial organic waste into bioenergy, simultaneously addressing waste management challenges and contributing to the energy mix (DOS SANTOS et al., 2022;

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2025). Similarly, the recovery of heat from industrial processes or from wastewater treatment plants exemplifies how circular approaches can create synergies between energy efficiency and sustainability objectives. Such initiatives reduce overall energy consumption and greenhouse gas emissions, aligning with Sustainable Development Goals, particularly SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production) (UNITED NATIONS BRAZIL, 2024).

Furthermore, the circular economy fosters innovation in energy storage and smart grids. By reusing materials in batteries, developing second-life applications for electric vehicle batteries, and optimizing energy distribution networks, the energy sector can increase resilience and reliability while reducing operational costs (MIYASHIRO et al., 2023; FERREIRA; ROSAMILHA, 2024). These approaches not only support a low-carbon transition but also create new business opportunities and jobs in emerging green industries, reinforcing the socio-economic benefits of circular economy strategies. Therefore, integrating circular principles into the energy sector is crucial for building sustainable, efficient, and resilient urban and industrial energy systems.

Conclusion

The analyzed experiences and obtained results demonstrate various potential initiatives that can be applied and serve as inspiration for other cities, considering the contextual variables of each location. It is evident that there are multiple challenges and opportunities related to the circular economy, necessitating a focus on solutions to the identified challenges while maximizing available opportunities. It is also crucial to discuss public policies, technological innovation, and awareness—both from civil society and from public and private sectors—to drive the broad implementation of the circular economy in urban contexts.

Considering all levels of initiatives addressed, ranging from pilot projects to global-level actions, it can be concluded that both public and private initiatives are already being implemented, such as recycling and composting programs. The positive outcomes of these initiatives illustrate how circular practices can contribute to resource optimization and the reduction of solid waste generation in the studied locations. As a consequence of waste reduction, there is also a contribution to urban environmental health.

Adopting more effective governance models for the implementation and monitoring of the circular economy in cities is essential to promote integration and cooperation between public and private sectors, in addition to actively engaging civil society. These efforts are crucial not only to optimize resource use and reduce environmental impacts but also to advance the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs). Specifically, circular economy initiatives play a strategic role in achieving targets such as SDG 6 (Clean Water and Sanitation) by promoting water reuse and conservation; SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) by encouraging more resilient and sustainable urban solutions; and SDG 12 (Responsible Consumption and Production) by transforming production and consumption patterns. Thus, the implementation of the circular economy in cities directly contributes to building a more sustainable and balanced future.

References

CALRECYCLE. *Zero Waste Plan*. State of California. Available at: https://calrecycle.ca.gov/zerowasteplan/. Accessed: Feb. 9, 2025.

DA SILVA, N. S.; SANO, E. E.; CHAVES, J. M. *Circular Economy Model for Solid Waste Management in Feira de Santana*. Available at: https://www.sustentarewipis.com.br/wp-content/uploads/artigos/2021/430775.pdf. Accessed: Feb. 9, 2025.

DEPUTACIÓN DE PONTEVEDRA. *Serviços e Programas: Local Composting Program (Revitaliza)*. Available at: https://www.depo.gal/web/residuos/programa-de-compostaxe-local-revitaliza. Accessed: Feb. 9, 2025.

DOS SANTOS, K. L.; PANIZZON, J.; RODRIGUES, T. F.; MATTILA, H.; JAHNO, V. D. *Teaching Domestic Composting as an Instrument for Promoting Circular Economy in Urban Solid Waste Management Systems*. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 17, n. 6, p. 296–319, Dec. 1, 2022. Available at: https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/13341/10244. Accessed: Feb. 3, 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Circular Economy Principles*. Available at: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-principles. Accessed: Nov. 30, 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Cities and Circular Economy: Overview. Circular Cities: Thriving, Liveable, Resilient*. Available at: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/cities/overview. Accessed: Nov. 30, 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Targeting 100% Circularity: Amsterdam*. Available at: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/exemplos-circulares/moldando-uma-economia-compartilhada-amsterda. Accessed: Jan. 10, 2024.

FERREIRA, L.; ROSAMILHA, N. J. *Sustainability, Circular Economy, and Projects: Research Opportunities*. Revista de Gestão e Projetos, v. 15, n. 3, p. 463–475, Dec. 9, 2024. DOI: https://doi.org/10.5585/gep.v15i3.27650. Accessed: Feb. 9, 2025.

JORGE, A.; CERQUEIRA, A.; CARVALHO, J. *Which Country Is This? Challenges for a Circular Packaging Economy in Brazil*. [S.l.: s.n.]. Available at: https://anpad.com.br/uploads/articles/120/approved/0224cd598e48c5041c7947fd5cb20d53.pdf?utm_source. Accessed: Feb. 9, 2025.

KLEINA, O. *Check the Main Goals of the Circular Economy*. Available at: https://posdigital.pucpr.br/blog/objetivoeconomiacircular?utm_source#os_3_pilares_da_economia_circular. Accessed: Feb. 9, 2025.

LÚCIO, R. et al. *Prediction Model of Construction and Demolition Waste Generation for Medium-Sized Brazilian Cities*. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 28, Jan. 1, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-415220220060. Accessed: Feb. 9, 2025.

MARCHI, C. M. D. F.; GONÇALVES, I. O. *Composting: The Importance of Organic Waste Reuse for Sustainability in Higher Education Institutions*. Santa Maria, v.19, e1, 2020. DOI: 10.5902/2236130841718. ISSN 2236-1308.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. *Federal Government Launches the National Circular Economy Strategy*. Available at: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/junho/governo-federal-lancaa-estrategia-nacional-de-economia-circular. Accessed: Feb. 9, 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. *Urban Solid Waste*. Available at: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/qualidade-ambiental-e-meio-ambiente-urbano/residuos-solidos-urbanos. Accessed: Feb. 9, 2025.

MIYASHIRO, M. K. et al. *Entrepreneurship in the Circular Economy: A Systematic Review of Material Cycles and Business Models*. Cadernos EBAPE.BR, v. 21, p. e2021, Nov. 17, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/1679-395120220210.

UNITED NATIONS BRAZIL. *Sustainable Development Goals (SDGs)*. Available at: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Accessed: Nov. 30, 2024.

OLIVEIRA, F. R. de; FRANÇA, S. L. B.; RANGEL, L. A. D. *Principles of Circular Economy for Product Development in Local Productive Arrangements*. Interações (Campo Grande), v. 20, n. 4, p. 1179–1193, 2019. DOI: 10.20435/inter.v20i4.1921. Available at: https://interacoesucdb.emnuvens.com.br/interacoes/article/view/1921. Accessed: Nov. 30, 2024.

PAIXÃO, M. M.; PEREIRA, R. O.; SANTOS, A. S. *Micropollutants in Potable Water Reuse: Review on Guiding Documents and Operating Plants Around the World*. Eng Sanit Ambient, v. 29, e20240060, 2024.

PEREIRA, M. D. *A Study on Circular Economy and Urban Mining of Electronic Waste in the Médio Piracicaba-MG Microregion*. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2022. Available at: http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/4260.

PINTO, L. F. T.-J. V. *Public Policies for the Circular Economy: The Case of São Tomé and Príncipe*. Universidade do Minho, Escola de Economia e Gestão, 2024. Available at: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/93226/1/Luis%20Filipe%20Ten-juan%20Viegas%20Pinto.pdf. Accessed: Feb. 9, 2025.

PREFEITURA DE CURITIBA. *Green Exchange – Annual Calendar*. Available at: https://www.curitiba.pr.gov.br/servicos/cambio-verde-calendario-anual/544. Accessed: Jan. 10, 2025.

QUEST. *Sorting for Circularity India: Post-Consumer Pilot – Fashion for Good*. Available at: https://www.fashionforgood.com/case-study/sorting-for-circularity-india-post-consumer-pilot/. Accessed: Feb. 9, 2025.

SANTOS, V. C. P.; ARAÚJO, M. L.; DE SOUSA, E. A.; DANTAS, A.; DA CUNHA, J. A. *Circular Economy and Shared Responsibility: Public Policies, Market, and Community – Bela Cidade Program and Pilot Project Ed. Acqua Marine*. Proceedings of the South American Congress on Solid Waste and Sustainability, May 12, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.IV-005. Accessed: Feb. 9, 2025.

SCHNEIDER, L.; GUIMARÃES, A. *Circular Cities: A Sustainable Approach for Urban Future*. Circular Cities. Journal on Innovation and Sustainability RISUS, v. 15, n. 3, p. 206–228, Nov. 27, 2024. DOI: http://doi.org/10.23925/2179-3565.2024v15i3p206-228. Accessed: Feb. 9, 2025.

TIOSSI, F. M.; SIMON, A. T. *Circular Economy: Contributions to Sustainability Development*. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 2, p. 11912.

TOWARD SOCIO-ENVIRONMENTAL SHARED VALUE NETWORKS: AN INTEGRATED MODEL OF GOVERNANCE, VALUE CO-CREATION, AND TERRITORIAL DYNAMICS

1 Thais Diniz Reis Drumond, 2 Carlos Alberto Franco da Costa, 3 Sônia Marise Salles Carvalho, 4 Fábio Soares Pereira, 5 Herika Fernanda Dantas Montilha Satrapa, 6 Willian Ramon Barbosa Bessa, 7 Rodrigo Duarte Soliani

1Instituto Federal do Acre (IFAC), e-mail: thais.drumond@ifac.edu.br; 2Universidade Federal do Acre (FAC), e-mail: carlos.costa@ufac.br; 3Universidade de Brasília (UnB), e-mail: sonia.carvalho@unb.br; 4Instituto Federal do Acre (IFAC), e-mail: fabio.pereira@ifac.edu.br; 5Instituto Federal do Acre (IFAC), e-mail: herika.montilha@ifac.edu.br, 6Instituto Federal do Acre (IFAC), e-mail: willian.bessa@ifac.edu.br; 7Instituto Federal do Acre (IFAC), e-mail: rodrigo.soliani@ifac.edu.br

Keywords: Collaborative governance; Creating shared value; Bioeconomy.

Abstract

Sustainable transitions in bioeconomy systems depend on collaborative arrangements capable of articulating governance, innovation, and territorial dynamics, yet existing research offers limited understanding of how these interdependent dimensions jointly shape socioproductive networks, particularly in the Amazon. This study proposes an integrated analytical model of Socio-Environmental Shared Value Networks (SESVNs) to explain and operationalize how collaborative governance, value co-creation, and territorial conditions shape sustainable bioeconomy arrangements. Grounded in a qualitative and exploratory theoretical–conceptual essay supported by a systematic literature review, the study identifies three interdependent analytical dimensions—institutional–relational, value–productive, and territorial. The proposed model conceptualizes these dimensions as mutually conditioning components that explain the viability, resilience, and performance of collaborative socioproductive networks. Beyond conceptual integration, the study advances an operational layer through indicators for diagnosis, monitoring, and strategic intervention, illustrated through the COOPERIACO network. The article contributes by positioning territory as constitutive of governance and innovation processes and by advancing an integrated perspective connecting collaborative governance, shared value creation, and territorial dynamics. The model also offers analytical support for governance arrangements, territorial planning, and policies aimed at strengthening forest-based value chains, while providing a basis for advancing research on collaborative capacities in sustainability transitions.

Introduction

The expansion of the bioeconomy has intensified recognition that sustainable transitions depend on collaborative arrangements capable of articulating science, technology, markets, and local communities (Escobar; Torres; Rodríguez, 2024). In this context, value co-creation strategies and sustainability-oriented innovation (SOI) have increasingly been positioned as mechanisms for integrating economic, social, and environmental objectives through interinstitutional coordination and collaborative capabilities (Hoffmann *et al*., 2022; Oliveira-Duarte *et al*., 2021).

These challenges are particularly evident in the Amazon, where fragmented socioproductive chains, low institutional density, and asymmetric interactions among actors constrain the consolidation of forest-based development models (Silva *et al*., 2025). Logistical vulnerabilities, dependence on intermediaries, and governance limitations reinforce the need for stronger coordination, collective learning, and metagovernance mechanisms (Oskam; Bossink; de Man, 2021; Maritan *et al*., 2024). In this setting, strengthening the Amazonian bioeconomy involves not only valuing forest products, but also structuring collaborative arrangements that enable socioproductive coordination and shared value generation (Bergamo *et al*., 2022).

However, existing scholarship has tended to treat governance, value creation, and territorial conditions as analytically decoupled dimensions, often privileging one dimension while relegating the others to contextual roles. This tendency results in analytical frameworks that fail to capture how coordination mechanisms, value generation processes, and territorial constraints interact in shaping the performance, resilience, and distributional outcomes of socioproductive networks (De Almeida *et al*., 2021; Pinsky; Marcovitch; Val, 2024). As a result, these approaches offer limited explanatory power for contexts marked by institutional asymmetry and infrastructural constraints, such as the Amazonian bioeconomy.

This gap is not merely empirical, but fundamentally analytical, as it reflects a structural limitation in existing frameworks, which remain insufficient to explain how these dimensions co-evolve under context-specific conditions. Addressing this limitation requires the development of territorially sensitive analytical models capable of guiding collaborative governance and shared value (CSV) arrangements in complex socioproductive systems (Dias *et al*., 2025).

In response, this article develops an integrated analytical model that not only connects collaborative governance and CSV approaches, but repositions territory as a constitutive dimension of socioproductive coordination and value co-creation in the Amazonian bioeconomy. Based on a theoretical essay supported by a systematic literature review, the

study articulates evidence on SOI, multistakeholder collaboration, dynamic capabilities, and metagovernance to examine how these elements interact in shaping more inclusive, resilient, and Triple Bottom Line (TBL)-oriented territorial arrangements. By advancing the notion of Socio-Environmental Shared Value Networks (SESVNs), the study proposes a territorially grounded analytical framework for interpreting collaborative dynamics in Amazonian bioeconomy systems.

Collaborative Governance and Shared Value Creation in the Amazonian Bioeconomy

CSV, SOI, and collaborative governance can be understood as complementary dimensions for interpreting the structuring of sustainable socioproductive networks. However, their articulation in the literature often remains partial, with limited attention to how these dimensions interact under conditions of institutional asymmetry and territorial constraint. CSV expresses a strategic orientation that aligns competitiveness with social and environmental value generation (Porter; Kramer, 2011), while SOI represents the transformation processes through which this orientation is operationalized. Value co-creation, in turn, functions as the relational mechanism through which heterogeneous actors mobilize resources, knowledge, and capabilities in collaborative contexts (Adams *et al*., 2016; De Almeida *et al*., 2021). In multi-actor networks, these dynamics unfold through interdependent processes of value creation and value capture, shaped by complementarities, collective learning, and tensions between mutual and individual interests (Freudenreich; Lüdeke-Freund; Schaltegger, 2020; Oskam; Bossink; de Man, 2021).

These processes depend on governance arrangements capable of sustaining trust, coordination, accountability, and adaptive mediation among actors operating under different logics and incentives. In this sense, collaborative governance functions as institutional infrastructure for organizing cooperation, while metagovernance supports the alignment of expectations, conflict mediation, and the adaptive capacity of networks (Fiandrino *et al*., 2025; Hoffmann *et al*., 2022). However, many governance frameworks implicitly assume relatively stable institutional environments, which contrasts with the fragmented, asymmetric, and infrastructure-constrained conditions observed in the Amazonian bioeconomy. This mismatch limits the explanatory capacity of governance approaches when applied to territorially complex and institutionally heterogeneous contexts.

In the Amazonian bioeconomy, these dynamics are not only shaped but structurally constrained by territorial conditions, including sociocultural diversity, low institutional density, resource seasonality, logistical constraints, and power asymmetries along value chains (Pinsky; Marcovitch; Val, 2024; Silva *et al*., 2025). In such contexts, frugal and sociotechnical innovation approaches may support adaptive and territorially embedded forms of shared value creation (Nodari *et al*., 2025). However, the literature still tends to treat territorial factors as contextual variables rather than as constitutive elements of governance and value creation processes. As a result, the viability of socioproductive networks is often analyzed without fully accounting for how coordination mechanisms, productive arrangements, and traditional knowledge systems are co-shaped by territorial dynamics.

These dynamics are illustrated by initiatives such as Origens Brasil, which reveal not only the potential of territorial cooperation but also the tensions arising from coordination challenges, value distribution asymmetries, and institutional fragmentation in forest-based economies (Dias *et al*., 2025). Such cases demonstrate that collaborative governance and shared value creation cannot be dissociated from territorial conditions, as these directly influence the feasibility, scalability, and sustainability of socioproductive arrangements.

From this perspective, the limitations of existing approaches necessitate the formulation of a new analytical category, conceptualized here as SESVNs, understood as multistakeholder arrangements in which economic value generation and distribution, social inclusion, and forest conservation are co-produced through interdependent governance and innovation processes. By integrating collaborative governance, value co-creation, and territorial conditions into a single analytical framework, the SESVN perspective provides the conceptual foundation for interpreting the relational, productive, and territorial dynamics that shape Amazonian bioeconomy systems.

Methodology

This study adopts a qualitative, exploratory approach and is structured as a theoretical–conceptual essay grounded in a systematic literature review (SLR). The strategy integrates three complementary theoretical perspectives, collaborative governance, CSV, and territorial bioeconomy, identified in the initial mapping as central to interpreting socioproductive dynamics in Amazonian contexts and supporting the development of an analytical model. This approach is consistent with methodological perspectives that recognize SLRs as a basis for conceptual model development (Paul; Khatri; Duggal, 2024).

The review followed the guidelines proposed by Sauer and Seuring (2023) and was conducted in the Web of Science, Scopus, and SciELO databases, covering peer-reviewed articles published in Portuguese and English between 2011 and 2025. The search strategy employed structured Boolean combinations related to collaborative governance, shared value, co-creation, and Amazonian bioeconomy, applied to titles, abstracts, and keywords. Records were consolidated, duplicates removed, and screened through title and abstract review, followed by full-text analysis. The process began with 386 records (Web of Science = 142; Scopus = 198; SciELO = 46), from which duplicates (n = 58) and non-eligible studies were excluded through successive screening stages, resulting in a final sample of 32 articles. Inclusion criteria comprised studies aligned with at least one of the three analytical axes and within the defined temporal scope. Studies focused

exclusively on traditional public governance, disconnected from co-creation or sustainability debates, or without sufficient theoretical grounding were excluded.

The selected material was analyzed through thematic coding inspired by Braun and Clarke (2023). The coding process followed an iterative and abductive logic, combining theoretically informed categories with patterns emerging from the literature. Initial codes were derived from the three guiding perspectives of the study: collaborative governance, shared value, and territorial bioeconomy, while allowing for the identification of recurrent concepts and relational patterns across the selected studies.

Through successive rounds of coding and comparison, conceptually related elements were grouped into higher-order categories, enabling the consolidation of interpretive themes. Analytical saturation was considered achieved when additional coding iterations no longer produced substantively new categories, but rather reinforced existing patterns and relationships among governance mechanisms, value creation processes, and territorial conditions.

This analytical process resulted in the identification of three interdependent analytical axes that resulted from the convergence of recurrent conceptual patterns across the reviewed studies. Rather than being predefined, these axes were progressively refined through the grouping of codes that consistently co-occurred in the literature, revealing underlying structures linking governance mechanisms, value creation dynamics, and territorial conditions.

The institutional–relational axis reflects patterns associated with coordination, trust, and metagovernance; the value–productive axis captures processes related to co-creation, learning, and value distribution; and the territorial axis synthesizes contextual factors that condition the viability and performance of collaborative arrangements. Together, these axes represent an analytical abstraction derived from the literature, forming the analytical foundation upon which the conceptual model proposed in this study is constructed.

Results and Discussion

Debates on collaborative governance and CSV in the Amazonian bioeconomy have emphasized coordination, co-creation, and metagovernance as central mechanisms, yet gaps remain regarding how these are translated into effective collaborative capacities under conditions of institutional asymmetry (Hoffmann *et al*., 2022; Oskam; Bossink; de Man, 2021). To examine how these limitations have been addressed in the literature, a structured review was conducted. Figure 1 summarizes the selection procedure, from database retrieval and duplicate removal to eligibility assessment.

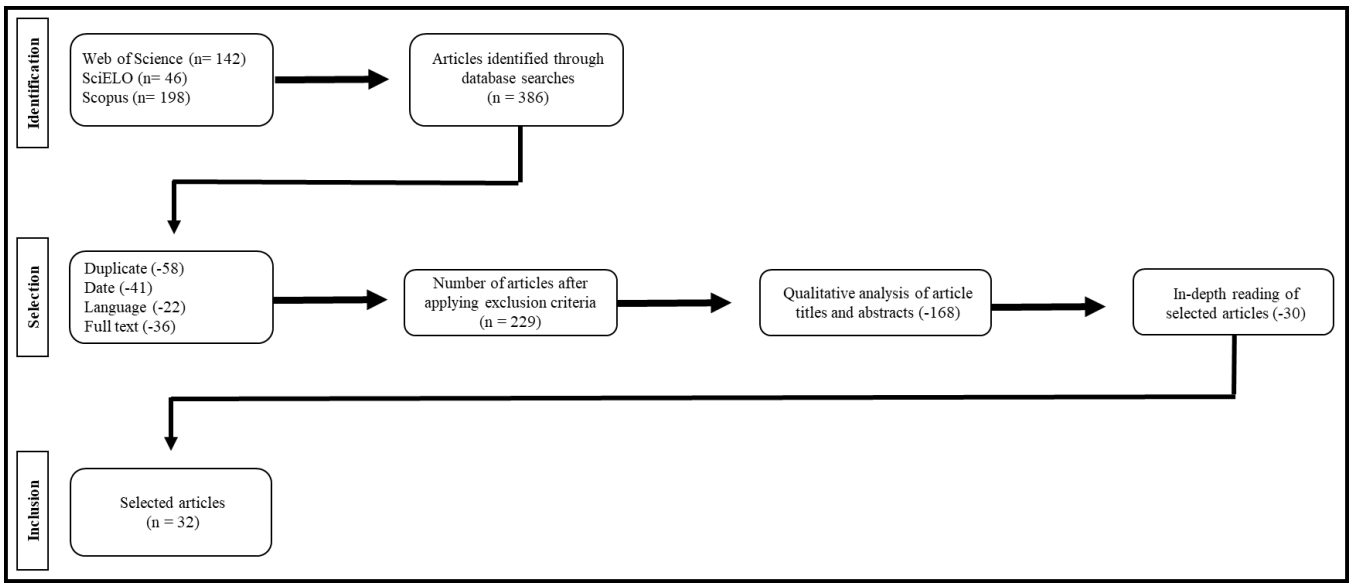


Figure 1: SLR selection process.
Source: Authors' elaboration, 2026.

After this process, 32 articles composed the final review set, with publications concentrated from 2018 onward, indicating that the articulation between SOI, collaborative ecosystems, and value co-creation has gained greater analytical integration only in recent years. Despite these advances, studies focused on the Amazon remain fragmented, frequently addressing governance, markets, or socioproductive arrangements in isolation rather than through integrated analytical perspectives (Pinsky; Marcovitch; Val, 2024; Silva *et al*., 2025).

Thematic coding organized the findings into three interdependent analytical dimensions: (i) collaborative governance and relational capacities; (ii) value creation and capture in multi-actor networks; and (iii) territorial specificities of the Amazonian bioeconomy. Synthesized in Table 1, these dimensions do not merely summarize the review findings; they operate as an analytical bridge through which dispersed conceptual patterns are reorganized into an integrated structure that underpins the proposed model by articulating institutional, productive, and territorial dynamics.

Table 1: Analytical dimensions underpinning the proposed model (*Source: Authors' elaboration, 2026*).

Analytical dimension	Core mechanisms	Analytical contribution
Collaborative governance and relational capacities	Coordination, trust, metagovernance, role complementarity	Provides the institutional infrastructure for collective action and network stability
Value creation and capture in multi-actor networks	Co-creation, resource integration, learning, value distribution	Explains how collaborative arrangements generate and sustain socio-environmental and economic value
Territorial specificities of the Amazonian bioeconomy	Seasonality, sociocultural diversity, asymmetries, logistical constraints	Defines the contextual conditions shaping the viability and performance of socioproductive networks

The three analytical dimensions constitute an integrated framework for interpreting sustainability-oriented collaborative dynamics. Collaborative governance and relational capacities provide the institutional basis of cooperation, supporting coordination, trust, and network stability (Beyers, 2024; Emerson; Nabatchi; Balogh, 2012). Value creation and capture explain how collaborative arrangements generate socio-environmental and economic value while managing tensions inherent to multi-actor networks (Freudenreich; Lüdeke-Freund; Schaltegger, 2020; Oskam; Bossink; de Man, 2021).

The territorial dimension conditions the viability and performance of these processes, as factors such as seasonality, asymmetries, and territorial knowledge shape how collaboration materializes in Amazonian socioproductive networks (Polge; Torre, 2018; Pinsky; Marcovitch; Val, 2024). The analytical dimensions operate as interdependent components: collaborative governance structures cooperation, value co-creation provides the value-generating orientation of collaboration, and territorial conditions modulate adaptation and outcomes. This integrated reading moves beyond fragmented interpretations by positioning governance, value creation, and territoriality as interdependent dimensions of socioproductive network performance. This synthesis forms the analytical foundation for the model proposed in the following section.

Integrated analytical model of Socio-Environmental Shared Value Networks (SESVNs)

The analytical framework proposed in this study was derived from the interpretive integration of the SLR findings into a conceptual structure designed to explain the relational, productive, and territorial dynamics that shape SESVNs in the Amazonian bioeconomy. Consistent with approaches that recognize systematic reviews as a basis for analytical model development (Paul; Khatri; Duggal, 2021; Schreiber; Cramer, 2024), this synthesis enabled the identification of relationships of complementarity and mutual influence among the elements synthesized in the review.

The resulting model is structured around three interrelated analytical dimensions: an institutional–relational dimension, centered on coordination, trust, and metagovernance; a value–productive dimension, encompassing co-creation, value capture, and collective learning; and a territorial dimension, incorporating the socio-environmental and socioproductive conditions that shape collaboration in the Amazonian bioeconomy. Articulated through these dimensions, the model provides an interpretive basis for analyzing the viability, consolidation, and monitoring of collaborative bioeconomy arrangements. Figure 2 synthesizes this integrated conceptual structure and the interrelations among its dimensions.

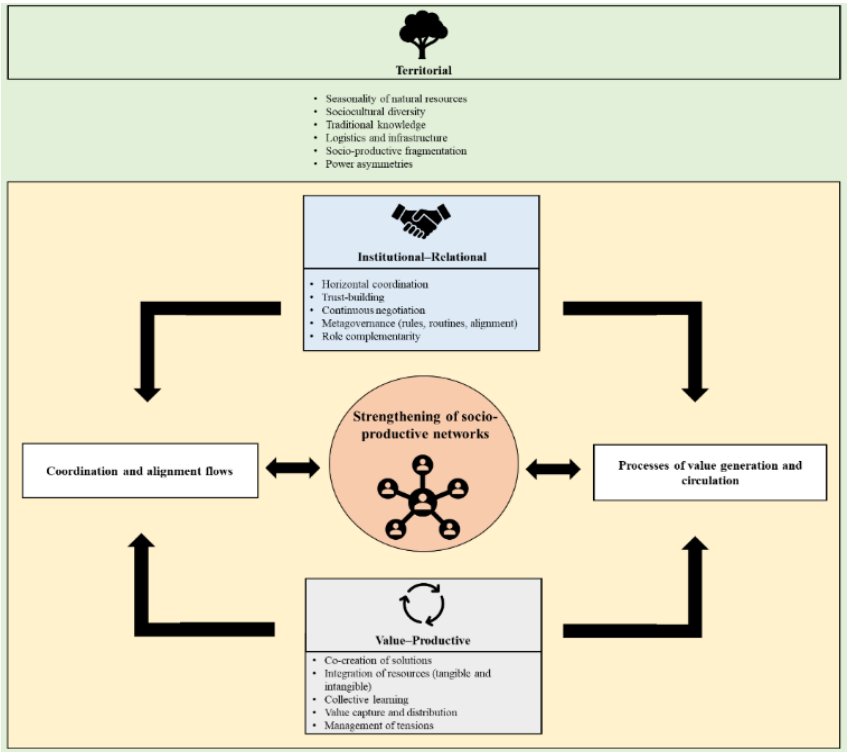


Figure 2: Analytical model of SESVNs in the Amazonian bioeconomy.Source: Authors' elaboration (2026).

The model integrates three interdependent analytical dimensions in which institutional and productive dynamics are conditioned by territorial factors. The institutional–relational dimension encompasses coordination, trust, metagovernance, and role complementarity as mechanisms that sustain cooperation, stabilize networks, and reduce information asymmetries (Kovanen; Ulrich; Gailing, 2023). The value–productive dimension captures co-creation, collective learning, and value generation and distribution processes that orient collaborative arrangements toward socio-environmental and productive outcomes (Silva; Gohr, 2025).

These dimensions are articulated through a relational sequence that explains how collaborative arrangements emerge and stabilize in practice. The institutional–relational dimension establishes the conditions for coordination by structuring trust, alignment mechanisms, and interorganizational governance. Building on this foundation, the value–productive dimension transforms coordinated interactions into processes of value co-creation, collective learning, and value distribution among actors. Transversally, the territorial dimension incorporates contextual conditions, such as seasonality, sociocultural diversity, asymmetries, logistical constraints, and low institutional density, that shape how these processes unfold by influencing their scale, timing, costs, legitimacy, and overall feasibility (Hoffmann *et al*., 2022).

While the model conceptualizes these dimensions as interdependent and reinforcing, their interaction is not inherently stable or harmonious. The articulation among governance, value creation, and territorial conditions involves trade-offs and tensions that may affect the performance and sustainability of collaborative arrangements. For instance, coordination mechanisms that enhance alignment and collective action may also increase governance complexity and decision-making costs, particularly in contexts marked by actor heterogeneity and institutional asymmetry. Similarly, efforts to maximize local value capture through co-creation and processing may conflict with existing market structures and intermediary dependencies, generating tensions between collective and individual interests. At the same time, territorial constraints, such as seasonality and logistical limitations, may restrict the scalability and economic viability of value-generating activities, even when governance arrangements are robust.

Under such conditions, the failure of SESVNs may occur when persistent misalignments among these dimensions arise, such as when governance structures are insufficient to coordinate actors, when value distribution mechanisms are perceived as inequitable, or when territorial constraints outweigh the adaptive capacity of the network. These dynamics highlight that the effectiveness of SESVNs depends not only on the presence of these dimensions, but on their continuous alignment under context-specific conditions.

In this sense, territorial factors do not merely contextualize collaboration but actively modulate the effectiveness of governance and value creation dynamics, influencing the viability and resilience of socioproductive networks. Their interaction is expressed through coordination and value circulation dynamics, in which governance structures enable collaboration, co-creation processes generate and distribute value, and territorial conditions modulate their effectiveness and sustainability. Together, these dynamics contribute to the strengthening of socioproductive networks, represented in the model as the integrative outcome of the articulation among governance, productive dynamics, and territorial conditions. This perspective positions SESVNs not as stable configurations, but as adaptive and tension-laden arrangements whose outcomes depend on the continuous negotiation among governance, value, and territorial dynamics.

Operationalization and illustrative application of the integrated analytical model

To extend the analytical model from conceptual synthesis to practical application, a set of indicators was defined to operationalize its three structuring dimensions and support diagnosis, monitoring, and decision support in collaborative bioeconomy arrangements. Derived from recurring conceptual patterns identified in the SLR, these indicators translate governance, value-productive dynamics, and territorial conditions into observable parameters for territorial diagnostics, policy design, and network strengthening (Braun; Clarke, 2023; Paul; Khatri; Duggal, 2024). As an illustrative application of this framework, the COOPERIACO socioproductive network is mobilized not as a validation case, but as an analytical example of how the model can support diagnosis and strategic interpretation in practice.

Table 2 summarizes the indicators associated with each analytical dimension and their potential applications. Considered jointly, they constitute an operational layer of the model, enabling the assessment of collaborative maturity, value generation and distribution dynamics, and territorial conditions affecting the adaptive resilience of socioproductive networks. Operationally, the model can be applied through three complementary steps: diagnosing each analytical dimension through the proposed indicators, interpreting interactions among dimensions, and translating these insights into strategic interventions in collaborative arrangements.

Table 2: Operational dimensions and illustrative application of the analytical model.
(*Source: Authors' elaboration, 2026*).

Analytical dimension	Key operational markers	Strategic applications	Illustrative manifestations in COOPERIACO
Institutional–Relational	Trust, coordination spaces, actor diversity, metagovernance	Collaborative maturity assessment; governance strengthening	Trust-based coordination, assemblies, cooperative governance protocols

Value–Productive	Co-creation, shared resources, value distribution, collective learning	Innovation strategies; impact monitoring; value chain sustainability	Collaborative innovation, shared infrastructure, TBL outcomes
Territorial	Seasonality dependence, asymmetries, logistics, territorial knowledge	Territorial planning; risk identification; adaptive governance	Seasonal dependence, logistical constraints, territorial legitimacy

Based on the illustrative evidence presented above, the COOPERIACO network helps clarify how institutional coordination, value creation and productive dynamics, and territorial conditions interact in practice. In analytical terms, the application reveals how governance arrangements sustain relational stability, how value–productive dynamics support resilience and shared value generation, and how territorial conditions shape the viability and adaptation of the network.

More specifically, the model enables the identification of distinct diagnostic patterns. First, a central vulnerability emerges from the network's dependence on seasonal dynamics and logistical constraints, which directly affect production flows, cost structures, and income stability. Second, a strategic potential is observed in opportunities for local value addition, particularly through processing and differentiation of forest-based products, which may enhance value capture within the territory. Third, governance-related risks are associated with the potential diversion of production to intermediaries, reflecting the need to strengthen coordination mechanisms and reinforce collective arrangements. Finally, an institutional opportunity lies in the consolidation of governance instruments, such as traceability systems, cooperative protocols, and mechanisms that reinforce transparency and collective commercialization channels.

Accordingly, the COOPERIACO experience moves beyond an illustrative example and demonstrates how the model can generate structured diagnoses that inform targeted strategic interventions in collaborative bioeconomy initiatives, particularly in contexts marked by territorial constraints and institutional asymmetries.

Implications of the model for strengthening the Amazonian bioeconomy

The analytical model proposed in this study advances prior research by integrating collaborative governance, value creation processes, and territorial conditions into a single analytical structure. In doing so, it extends existing debates that have tended to treat these dimensions separately, particularly in studies of sustainability-oriented innovation and shared value (Adams *et al*., 2016; Jacobi *et al*., 2022). In the Amazonian context, where collaboration unfolds under institutional asymmetries, logistical constraints, and sociocultural diversity, this integration indicates a structural limitation in existing approaches, which tend to overlook how governance effectiveness is fundamentally conditioned by territorially embedded relational capacities (Dias *et al*., 2025; Hoffmann *et al*., 2022; Oskam; Bossink; de Man, 2021).

From a theoretical standpoint, the model contributes by repositioning territory as a constitutive dimension of collaborative governance and value co-creation processes. This perspective challenges interpretations that frame co-creation primarily as an organizational or market-centered phenomenon, advancing instead a territorially conditioned and relationally mediated understanding of collaborative dynamics (Polge; Torre, 2018; Wood; Morais, 2022). By articulating governance, productive dynamics, and territorial conditions as mutually conditioning dimensions, the model provides a more comprehensive explanation of the factors influencing the stability and performance of socioproductive networks.

Moreover, prevailing approaches to collaborative governance and value co-creation often assume that coordination mechanisms and value-generating processes can be scaled independently of territorial constraints (Fiandrino *et al*., 2025; Nodari *et al*., 2025). The findings of this study challenge this assumption by demonstrating that territorial conditions do not merely influence, but actively delimit the scope and effectiveness of these processes (Moraes; Azevedo-Ramos, 2025). This implies that models derived from more institutionally dense or infrastructurally stable contexts may have limited explanatory and prescriptive power when applied to Amazonian socioproductive systems.

This theoretical repositioning is operationalized through the development of a set of indicators that translate these dimensions into observable and analytically tractable elements. At the analytical and methodological level, the study contributes by enabling structured diagnosis, monitoring, and interpretation of collaborative arrangements. This operational layer is consistent with discussions on value co-creation and capture in multi-actor innovation networks (Reypens; Lievens; Blazevic, 2016), while extending them by incorporating territorial constraints and asymmetries as integral components of analysis.

The illustrative application in the COOPERIACO network reinforces this contribution by demonstrating how the model can generate structured diagnoses. These diagnoses enable the identification of key vulnerabilities, including logistical dependence and seasonal constraints, as well as governance-related risks associated with intermediary dependence and strategic opportunities for local value addition and institutional strengthening. In this respect, the model moves beyond descriptive interpretation by enabling analytically grounded and context-sensitive diagnoses of socioproductive dynamics, particularly by revealing how vulnerabilities, governance risks, and value capture opportunities are structurally interconnected.

From an applied perspective, the model offers an analytical basis for informing governance arrangements, territorial planning, and public policies aimed at strengthening forest-based value chains. In contexts marked by infrastructural limitations and fragmented coordination, such as the Amazonian bioeconomy, the capacity to diagnose relational, productive, and territorial dynamics in an integrated manner becomes particularly relevant for designing adaptive and territorially grounded interventions.

Despite these contributions, the model remains conceptual in scope and therefore analytically transferable rather than

empirically generalizable. The application to the COOPERIACO network is illustrative and does not constitute empirical validation, and the proposed indicators require further refinement through participatory and context-sensitive applications. These limitations point to the need for future research to advance the empirical testing, calibration, and comparative analysis of the model across different socioproductive and institutional settings.

Final considerations

This study developed an integrated analytical model to explain how collaborative governance, value co-creation, and territorial conditions interact in shaping Socio-Environmental Shared Value Networks (SESVNs) in the Amazonian bioeconomy. By articulating institutional–relational, value–productive, and territorial dimensions, the model advances a territorially grounded perspective that directly addresses a persistent limitation in the literature, namely the analytical fragmentation between governance, value creation, and territorial dynamics.

The findings also reinforce the analytical relevance of the Amazonian context, not merely as an empirical setting, but as a critical context for theory development, from which new analytical insights emerge regarding the co-evolution of governance, innovation, and territorial dynamics under conditions of structural constraint. In this regard, the study contributes to sustainability-oriented innovation and collaborative governance debates by demonstrating that the effectiveness of these processes is inherently conditioned by territorially embedded factors.

While the model provides a structured framework for interpretation and intervention, its broader contribution lies in establishing a foundation for future empirical, comparative, and participatory research. Advancing this agenda will be essential for understanding how collaborative capacities are formed, adapted, and sustained across diverse socioproductive and institutional configurations.

Ultimately, the study suggests that strengthening the Amazonian bioeconomy requires moving beyond approaches centered exclusively on technological diffusion or market expansion, toward the deliberate design of collaborative arrangements that are simultaneously relationally robust and territorially grounded. In this perspective, the Amazon is not only a site of application, but a source of analytical frameworks capable of reshaping how sustainability transitions are understood in territorially complex contexts.

References

ADAMS, R. *et al*. Sustainability-oriented innovation: a systematic review. *International Journal of Management Reviews*, v. 18, n. 2, p. 180–205, 2016.

BERGAMO, D. *et al*. The Amazon bioeconomy: beyond the use of forest products. *Ecological Economics*, v. 199, p. 107448, 2022.

BEYERS, F. Collaborative governance and personal relationships for sustainability transformation in the textile sector. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 13347, 2024.

BRAUN, V.; CLARKE, V. Toward good practice in thematic analysis: avoiding common problems and be(com)ing a knowing researcher. *International Journal of Transgender Health*, v. 24, n. 1, p. 1–6, 2023.

DE ALMEIDA, J. M. G. *et al*. Towards an integrative framework of collaborative capabilities for sustainability: a systematic review and research agenda. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123789, 2021.

DIAS, G. N. *et al*. Sustainability-based value creation within a multi-stakeholder network: balancing expectation conflicts within the Amazon context. *Business Strategy and the Environment*, v. 34, n. 1, p. 116–128, 2025.

EMERSON, K.; NABATCHI, T.; BALOGH, S. An integrative framework for collaborative governance. *Journal of Public Administration Research and Theory*, v. 22, n. 1, p. 1–29, 2012.

ESCOBAR, C. H. G.; TORRES, J. C. G.; RODRÍGUEZ, A. O. V. A critical analysis of the dynamics of stakeholders for bioeconomy innovation: the case of Caldas, Colombia. *Sustainability*, v. 16, n. 23, p. 10370, 2024.

FIANDRINO, S. *et al*. Metagovernance forms for enhancing sustainability-oriented innovation in a knowledge ecosystem. *Business Ethics, the Environment & Responsibility*, v. 34, n. 1, p. 215–230, 2025.

FREUDENREICH, B.; LÜDEKE-FREUND, F.; SCHALTEGGER, S. A stakeholder theory perspective on business models: value creation for sustainability. *Journal of Business Ethics*, v. 166, n. 1, p. 3–18, 2020.

HOFFMANN, M. G. *et al*. Characteristics of innovation ecosystems' governance: an integrative literature review. *International Journal of Innovation Management*, v. 26, n. 8, p. 2250062, 2022.

JACOBI, J. *et al*. Transdisciplinary co-creation increases the utilization of knowledge from sustainable development research. *Environmental Science & Policy*, v. 129, p. 107–115, 2022.

KOVANEN, S.; ULRICH, P.; GAILING, L. Institutionalizing collaborative regional governance in organizationally thin regions: regional development agencies and the neglect of social innovations. *Frontiers in Political Science*, v. 5, p. 1092295, 2023.

MARITAN, F. B. *et al*. Regional development through innovation: a proposal for a technological hub framework. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 15, n. 10, e4255, 2024.

MORAES, I.; AZEVEDO-RAMOS, C. Implicações socioambientais do ordenamento territorial de florestas públicas: um estudo de caso na Amazônia brasileira. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 21, n. 2, 2025.

NODARI, C. H. *et al*. Integrating frugal innovation and value co-creation for sustainable development. *Revista Gestão Organizacional*, v. 18, n. 2, p. 69–93, 2025.

OLIVEIRA-DUARTE, L. *et al*. Innovation ecosystem framework directed to Sustainable Development Goal #17 partnerships implementation. *Sustainable Development*, v. 29, n. 5, p. 1018–1036, 2021.

OSKAM, I.; BOSSINK, B.; DE MAN, A.-P. Valuing value in innovation ecosystems: how cross-sector actors overcome tensions in collaborative sustainable business model development. *Business & Society*, v. 60, n. 5, p. 1059–1091, 2021.

PAUL, J.; KHATRI, P.; DUGGAL, H. K. Frameworks for developing impactful systematic literature reviews and theory building: what, why and how? *Journal of Decision Systems*, v. 33, n. 4, p. 537–550, 2024.

PINSKY, V. C.; MARCOVITCH, J.; VAL, A. L. Experimentalist governance in bioeconomy: insights from the Brazilian Amazon. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 28, n. 6, e240170, 2024.

POLGE, E.; TORRE, A. Territorial governance and proximity dynamics: the case of two public policy arrangements in the Brazilian Amazon. *Papers in Regional Science*, v. 97, n. 4, p. 909–930, 2018.

PORTER, M. E.; KRAMER, M. R. Creating shared value. *Harvard Business Review*, v. 89, n. 1-2, p. 62–77, 2011.

REYPENS, C.; LIEVENS, A.; BLAZEVIC, V. Leveraging value in multi-stakeholder innovation networks: a process framework for value co-creation and capture. *Industrial Marketing Management*, v. 56, p. 40–50, 2016.

SAUER, P. C.; SEURING, S. How to conduct systematic literature reviews in management research: a guide in 6 steps and 14 decisions. *Review of Managerial Science*, v. 17, n. 5, p. 1899–1933, 2023.

SCHREIBER, F.; CRAMER, C. Towards a conceptual systematic review: proposing a methodological framework. *Educational Review*, p. 1–22, 2022.

SILVA, J. C. K. *et al*. Can a digital platform framework advance the bioeconomy and sustainability in the Amazon? A literature review. *Gestão & Produção*, v. 32, e14724, 2025.

SILVA, J. S. da; GOHR, C. F. A framework integrating dynamic capabilities with sustainability-oriented innovation activities in collaborative networks: a systematic literature review. *International Journal of Innovation*, v. 13, n. 1, e26400, 2025.

VINCENZI, T. B. de *et al*. Technology and innovation: a systematic literature review on sustainability research in the Amazon. *BAR – Brazilian Administration Review*, v. 20, n. 4, e220020, 2023.

WOOD JUNIOR, T.; MORAIS, D. O. C. de. Organizing for sustainable development: a multi-stakeholder project in the Amazon. *Journal of Cleaner Production*, v. 362, p. 132193, 2022.

MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DO GEL C-S-H EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UMA REVISÃO SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR

Sylvia Bernadete Alves Salgado, Sady Gama da Silva, Rosa Cristina Cecche Lintz, Luísa Andréia Gachet
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP, Brasil, e-mail: sylviasalgado4@gmail.com, gachet@unicamp.br, rosalint@unicamp.br, sadygama@gmail.com

Palavras-chave: Sustentabilidade, Resíduos industriais, Economia Circular

Resumo

Responsável por elevado impacto ambiental global das emissões de dióxido de carbono, a indústria de cimento Portland torna imperativa a busca por alternativas sustentáveis que unam redução de impactos ambientais e o bom desempenho técnico dos produtos derivados do cimento. O trabalho investiga através de uma revisão a incorporação de resíduos industriais em compósitos cimentícios e suas interações como o principal produto de hidratação do cimento Portland, o gel silicato de cálcio (C-S-H). Este gel apresenta estrutura lamenar nas intercamadas com a presença do cátion (Ca^{+2}) e tetraédricos de silicato em cadeias, o qual a composição pode ser modificada pela incorporação de alumínio durante a hidratação do sistema contendo adições como cinzas volantes e escórias de alto forno. Por meio destes materiais a substituição parcial do clinquer promove reações pozolânicas de hidratação que modificam o conjunto de fases hidratadas mantendo as propriedades dos ligantes adequadas. Resultando na redução no consumo de clínquer em até 30%, pesquisas na literatura indicam que a adição de escórias de alto forno promove atividade pozolânica e hidráulica, incluindo a formação do gel C-A-S-H modificado além de fases secundárias contendo magnésio (hidrotalcita). Esta estratégia reduz as emissões de dióxido de carbono, valoriza resíduos industriais e contribui para a economia circular no ciclo de vida do concreto. Dentre as limitações encontradas nesse estudo destacam-se a necessidade de estudos de análise de ciclo de vida completo e validação em escala industrial. Novas fontes de resíduos ricos em alumínio e outros elementos devem ser investigadas, com desenvolvimento de protocolos de caracterização microestrutural e ambiental específicos para compósitos cimentícios sustentáveis.

Introdução

Caracterizada como um dos setores que causa maior impacto ambiental global, a indústria do cimento é responsável por aproximadamente 8% das emissões antropogênicas de dióxido de carbono (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Cerca de uma tonelada de cimento Portland tradicional gera em média 0,9 toneladas de dióxido de carbono oriundo principalmente dos processos de descarbonatação do calcário que acontecem em temperaturas aproximadamente em torno de 1450°C, além da queima de combustível fóssil que também ocorre durante o processo. (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017)

Diante desses dados, a indústria cimenteira enfrenta a crescente pressão para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis que se mostrem compatíveis com as metas globais de emissões estabelecidas no Acordo de Paris. Inúmeras estratégias têm sido pesquisadas e desenvolvidas com a intenção de reduzir os impactos ambientais da produção de cimento Portland, incluindo substituição parcial do clínquer por adições minerais suplementares, dentre outras como uso de combustíveis alternativos, otimização do processo de clinquerização e captura e armazenamento de carbono (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017).

Como estratégia mais consolidada e aplicada, a substituição parcial do clínquer via incorporação de adições minerais suplementares como cinzas volantes e escórias de alto forno, além de outros resíduos industriais tem se mostrado com potencial para reduzir o consumo de clínquer significativamente, mantendo os ligantes e suas propriedades. (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Alinhado aos princípios de economia circular, a incorporação de resíduos industriais em compósitos cimentícios tem forte potencial de transformar débitos ambientais em matérias primas de benefícios adicionais.

Diversos resíduos industriais, como escórias metalúrgicas, cinzas de termoelétricas e resíduos minerais contêm em sua composição química silicatos de diferentes cátions como de alumínio (Al^{+3}) e magnésio (Mg^{+2}) que em condições adequadas experimentais podem contribuir para formação de produtos alternativos de hidratação (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). A viabilização técnica desta incorporação depende diretamente da compreensão dos mecanismos de interação entre os cátions presentes nos resíduos e a estrutura do gel (C-S-H - silicato de cálcio hidratado), principal produto de hidratação do cimento Portland responsável pelas propriedades ligantes (RICHARDSON; GROVES, 1992; TAYLOR, 1997).

Com o objetivo mais específico, este trabalho buscou caracterizar a estrutura do gel (C-S-H), revisando evidencias na literatura mais recente sobre modificações estruturais e formações de fases secundárias induzidas por adições minerais contendo diferentes elementos como alumínio, magnésio e ferro, ressaltando essas incorporações por meio de escórias e cinzas, identificando contribuições para sustentabilidade sob a perspectiva ambiental, apontando contribuições para a sustentabilidade e para a economia circular, além de identificar lacunas de conhecimentos e futuras direções de pesquisas.

Material e Métodos

Em formato de revisão bibliográfica narrativa, este trabalho visa analisar a incorporação de resíduos industriais em compósitos cimentícios através de substituições catiônicas. A busca foi conduzida em bases de dados científicas incluindo Scopus, Web of Science e Google Scholar, utilizando como descritores os termos em inglês calcium silicate hydrate, cationic substitution, blast furnace slag, industrial waste, magnesium oxide e sustainable cement.

Foram priorizadas pesquisas nos últimos quatorze anos abordando diretamente aspectos estruturais do gel (C-S-H) (caracterizados predominantemente em pasta de cimento por técnicas avançadas como ressonância magnética nuclear, difração de raios X e microscopia eletrônica) provocados pela incorporação de escórias em sistemas cimentícios e seus impactos.

O resumo das evidências foi organizado de forma sistemática, abordando inicialmente a estrutura do gel e o papel dos cátions de alumínio, e magnésio especificamente, seguida pela discussão de mecanismos de substituição, tipos de resíduos industriais aplicáveis e suas contribuições para sustentabilidade ambiental no ramo da Engenharia Civil.

Resultados e Discussão

Estrutura do gel (C-S-H) e papel dos cátions

O silicato de cálcio hidratado (gel - C-S-H) constitui o principal produto de hidratação do cimento Portland, sendo responsável por 50 a 60% do volume de sólidos da pasta endurecida. O gel apresenta ampla contribuição às propriedades ligantes dos compósitos cimentícios (RICHARDSON; GROVES, 1992; TAYLOR, 1997). A estrutura química do silicato de cálcio é caracterizada por camadas de tetraédricos de silicato (SiO_4) intercaladas por cátions cálcio (Ca^{+2}) e moléculas de água, com espaçamento interlamelar variando entre 1,2 e 1,4 nanômetros conforme o grau de hidratação e a razão Ca/Si (RICHARDSON, 2014).

Com uma composição química variável, o (C-S-H) com razão Ca/Si tipicamente entre 1,2 e 2,3, nos quais valores mais baixos são associados a maior grau de polimerização das cadeias silicatas (RICHARDSON, 2014). Constituída por unidade estrutural básica em dímeros de dois tetraédricos, os quais compartilham um átomo de oxigênio central, configurando uma espécie Q1 (tetraedro com uma ponte siloxano). Os cátions cálcio (Ca^{+2}) posicionam-se entre os oxigênios não-ponteantes, neutralizando as cargas negativas e conferindo coesão à estrutura lamelar (TAYLOR, 1997).

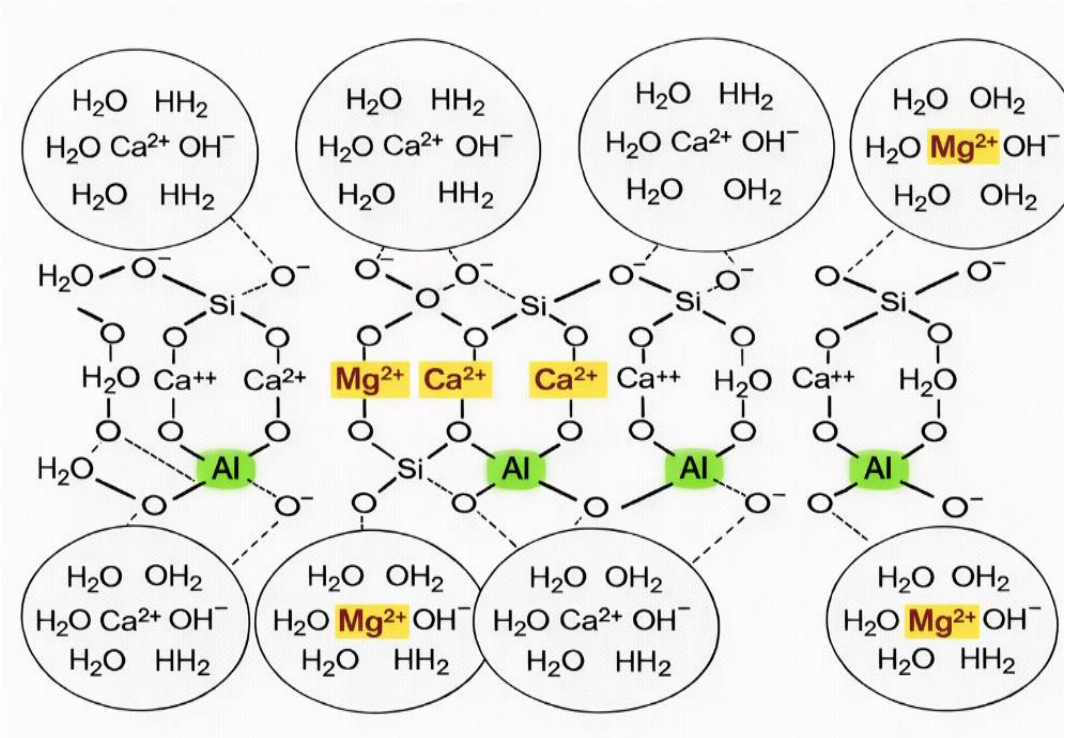


Figura 1: Representação esquemática da estrutura do gel (C-S-H).
Fonte: Adaptado de Bernard et al. (2020).

Figura 1: Representação esquemática da estrutura do gel (C-S-H). O elemento magnésio forma fases secundárias separadas, enquanto a incorporação de alumínio ocorre nos sítios tetraédricos (substituindo silício).

A presença de cátions nas posições das intercamadas é fundamental para a estabilidade estrutural do gel, neutralizando as cargas negativas dos grupos silicatos permitindo a formação de ligações de hidrogênio entre as camadas (RICHARDSON, 2014). Desde que os cátions competidores apresentem compatibilidade química e dimensional adequados, esta característica estrutural torna o gel um sistema aberto a modificações catiônicas. (RICHARDSON, 2014)

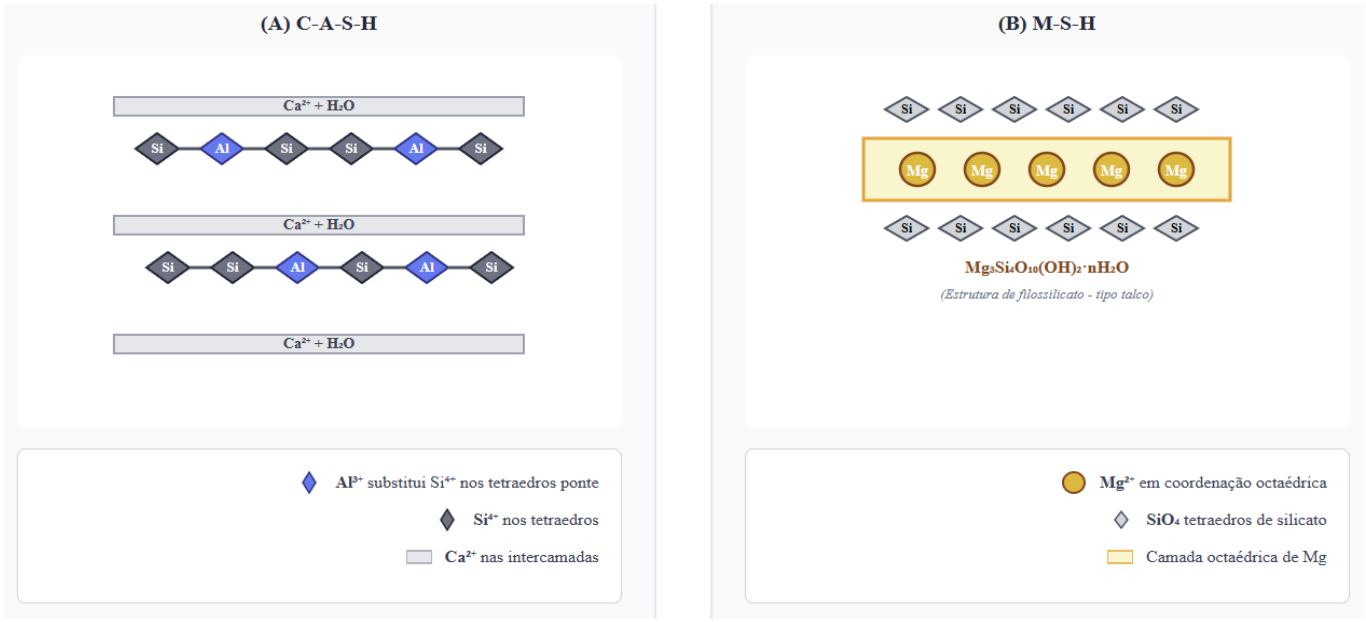


Figura 2 - Produto de hidratação em sistemas cimentícios com escória de alto forno
Fonte: Adaptado de Bernard et al (2018, 2020) e Richardson (2014)

Figura 2 – Produtos de hidratação principais do sistema cimentício - (A) (C-A-S-H) (destacado em azul) gel principal com alumínio substituindo silício nos sítios tetraédricos das cadeias. (B) M-S-H (destacado em laranja) constitui o gel de magnésio-silicato com estrutura de filossilicato (tipo talco), formado como fase separada do (C-S-H) devido a incompatibilidade entre sistemas (Ca-Si e Mg-Si).

Substituições catiônicas e incorporação de resíduos industriais

A substituição parcial dos cátions cálcio (Ca^{+2}) por cátions alternativos no gel tem sido investigada como estratégia para incorporação de resíduos industriais em compósitos cimentícios. Pesquisas indicam que cátions como de magnésio (Mg^{+2}), alumínio e ferro, presentes em cinzas volantes e em escórias metalúrgicas promovem a formação de fases distintas como (C-A-S-H), (substituindo Si nos tetraédricos), enquanto magnésio forma (M-S-H) e hidrotalcita como fases separadas" (BERNARD et al., 2020; RICHARDSON, 2014).

Em particular os cátions de magnésio (Mg^{+2}) tem apresentado crescente atenção nesse processo devido à sua abundância em resíduos industriais como escória de alto forno e resíduos de mineração de serpentinito (rochas metamórficas ricas em magnésio). Pesquisas indicam que sua introdução durante a hidratação do cimento possui potencial de promover modificações estruturais. (BERNARD et al., 2020).

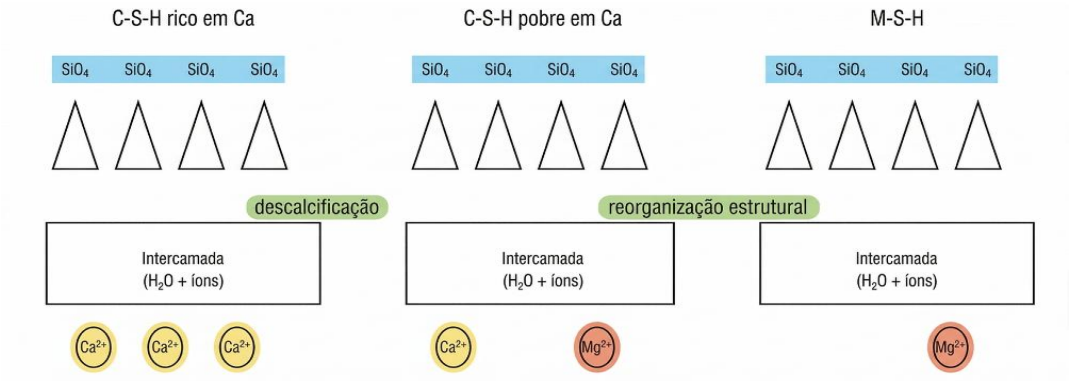


Figura 3 – formação de fases em sistemas com o magnésio
Fonte: Adaptado de Bernard et al. (2020).

Figura 3: Formação de fases em sistemas com magnésio, demonstrando (C-S-H) (esquerda), competição (Ca-Mg) pela sílica (centro), e (M-S-H) formado como fase separada (direita).

Cinza volante e outras fontes de resíduos industriais

Além das escórias metalúrgicas, a cinza volante oriunda da combustão de carvão mineral em termelétricas é um importante resíduo industrial característico para incorporação em compósitos cimentícios. Com composição rica em sílica e alumina, a cinza

volante possui atividade pozolânica que induz o refinamento da estrutura porosa e redução da permeabilidade dos concretos (JUENGER et al., 2019). A incorporação de cinza volante em substituição parcial ao clínquer do ponto de vista ambiental apresenta duplo benefício: apresenta alternativa de descarte adequado de resíduos industriais nos quais à disposição de aterros representa significativo passivo ambiental além de reduzir a demanda de cimento, diminuindo as emissões de gás carbónico.

A cinza volante apresenta em sua composição química cátions de alumínio que também possibilitam substituições catiônicas no gel, com formação de fases do tipo (C-A-S-H), (silicato-aluminato de cálcio hidratado) que apresentam características microestruturais distintas e potencial para maior resistência a ataques químicos (LOTHENBACH et al., 2015). A interação entre diferentes fontes de resíduos industriais, combinando escórias ricas em magnésio com cinzas volantes ricas em alumínio representa uma promissora fronteira de investigação para desenvolvimento de ligantes sustentáveis com menor impacto ambiental.

Resíduos de mineração, cinzas de biomassa e subprodutos de processos industriais regionalmente disponíveis também têm sido investigados como fontes alternativas de adições minerais (JUENGER et al., 2019). Seguindo princípios da economia circular a valorização destes materiais residuais alternativos contribui não apenas para redução de emissões associadas ao cimento, mas também para redução de impactos ambientais relacionados à extração de matérias-primas virgens e à disposição inadequada de resíduos.

Escória de alto forno e sinergia com adições magnesianas

O subproduto da indústria siderúrgica caracterizado pelas escórias de alto forno, apresenta composição química rica em silicatos (SiO_4^{4-}), aluminatos (AlO_2^{-1}) e óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (Mg^{+2}). Sua incorporação em cimento Portland é prática consolidada, com substituições de até 70% do clínquer sendo tecnicamente viáveis (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). A atividade pozolânica da escória gera produtos de hidratação adicionais e refinamento da estrutura porosa devido consumo de hidróxido de cálcio Ca $(OH)_2$ através de reações secundárias.

Pesquisas mais recentes demonstram que a incorporação simultânea de escória de alto forno (cátions de cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) e fontes de magnésio, como óxido de magnésio (MgO) reativo provenientes de resíduos de mineração, promovem sinergia entre atividade pozolânica e modificação catiônica do gel (ARAÚJO, 2022). Ao consumir hidróxido de cálcio Ca $(OH)_2$, a escória reduz a disponibilidade de cálcio na solução dos poros, favorecendo termodinamicamente a estabilização de fases contendo magnésio. Simultaneamente, o magnésio proveniente de resíduos forma fases hidratadas separadas (M-S-H, hidrotalcita), gerando sistema cimentício com características microestruturais distintas e menor dependência de clínquer (ARAÚJO, 2022).

Estudos indicam que substituições de 10 a 30% do clínquer por combinações de óxido de magnésio (MgO) reativo e escória resultam em matrizes com propriedades ligantes adequadas, além da redução significativa de emissões de dióxido de carbono associadas à produção (ARAÚJO, 2022). A aplicabilidade técnica e ambiental desta estratégia química posiciona escória-magnésio e outros resíduos como alternativa promissora para concretos sustentáveis.

Análise de ciclo de vida e quantificação de impactos ambientais

Considerando todas as etapas desde a extração de matérias-primas até a destinação final dos materiais, a quantificação precisa dos benefícios ambientais associados às substituições catiônicas exige aplicação de metodologias de análise de ciclo de vida (ACV), (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017). Estudos preliminares de (ACV) reforçam que concretos produzidos com substituição de 30% do clínquer por escória de alto forno apresentam redução de aproximadamente 25% nas emissões totais de dióxido de carbono equivalente ao longo do ciclo de vida, considerando produção, transporte, uso e fim de vida (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Além disso, a incorporação de resíduos industriais favorece também a redução do consumo de recursos naturais não-renováveis, especialmente calcário e argila utilizados na produção de clínquer. A substituição de 30% do clínquer implica em redução equivalente na extração destes recursos, associados a benefícios ambientais, preservação de jazidas minerais e redução de impactos em ecossistemas locais.

A Tabela 1 apresenta síntese dos principais estudos revisados e suas contribuições para sustentabilidade ambiental nesse trabalho.

Tabela 1: Síntese dos principais estudos sobre incorporação de resíduos industriais em compósitos cimentícios e suas contribuições para sustentabilidade ambiental.

Autor/Ano	Tipo de Resíduo/Adição	Teor de Substituição	Principais Contribuições para Sustentabilidade
Lothenbach et al. (2011)	Escória de alto forno, cinza volante, pozolanas	30-70% do clínquer	Redução de emissões de CO_2; refinamento microestrutural; valorização de subprodutos industriais
Bernard et al. (2020)	Resíduos ricos em magnésio (MgO reativo)	Adição complementar	Formação de fases (M-S-H); maior estabilidade química; menor dependência ddo cátion Ca^{+2}
Araújo (2022)	Escória de alto forno + MgO reativo	10-30% substituição	Sinergia pozolânica-catiônica; redução 25-30% emissões; viabilidade técnico-ambiental

Richardson (2014)	Estudos estruturais C-S-H	N/A	Base científica para substituições catiônicas; compreensão de mecanismos de incorporação
Monteiro et al. (2017)	Análise de sustentabilidade de concreto	Avaliação geral	Quantificação de impactos ambientais; diretrizes para concreto sustentável
Scrivener et al. (2018)	Cimentos eco-eficientes	20-50% substituição	Soluções economicamente viáveis; redução de CO_2; viabilidade industrial
Juenger et al. (2019)	Materiais cimentícios suplementares diversos	variável	Fontes novas de SCMs; caracterização ambiental; economia circular
Araújo (2022)	Escória de alto forno + MgO reativo	10-30% substituição	Sinergia pozolânica-catiônica; redução 25-30% emissões; viabilidade técnico-ambiental
Bernard et al. (2023)	Cimentos à base de MgO	Alternativa ao PC	Emissões negativas de CO_2; formação de M-S-H; matérias-primas livres de carbono
Zhang et al. (2024)	MgO + GGBS + cinza volante	Substituições variáveis	Redução 60% emissões CO_2; avaliação de ciclo de vida; otimização ambiental
Ruan et al. (2025)	Escória de alto forno + escória de carbeto	100% resíduos sólidos	Formação de (C-A-S-H) e hidrotalcita; avaliação ambiental; economia circular completa
Yang et al. (2025)	Escória de magnésio + escória de alto forno	50% BFS + 50% cimento	Sinergia entre escórias; resistência 6,129 MPa; valorização de resíduos de mineração
Evangelista et al. (2025)	MgO reativo como substituição parcial	Variável	Análise de ciclo de vida comparativa; durabilidade otimizada; menor impacto ambiental

Fonte: Elaboração própria com base nos estudos incluídos na revisão.

Resíduos industriais como escória de alto forno e cinza volante geralmente apresentam custo menor ao do clínquer, tornando os cimentos economicamente vantajosos. A viabilidade econômica das substituições também representa aspecto importante para consolidação destas estratégias. Esta associação de benefícios ambientais e econômicos configura as substituições catiônicas como estratégia compatível aos princípios de desenvolvimento sustentável, conciliando aspectos econômicos, técnicos e ambientais.

Considerações Finais

A incorporação de resíduos industriais em compósitos cimentícios revisada neste trabalho evidencia que tal estratégia se caracteriza viável e ambientalmente relevante para a Engenharia Civil sustentável. A atividade pozolâmica e hidráulica destes materiais modificados pela incorporação de resíduos que contenham alumínio (formando C-A-S-H) e magnésio (formando fases secundárias como hidrotalcita) causam a modificação do gel, embora mantenham suas propriedades dos ligantes (TAYLOR, 1997; BERNARD et al.; RICHARDSON, 2014). Tal incorporação, possibilita as substituições de até 30% do clínquer com manutenção de propriedades aglomerantes adequadas, o que contribui para redução de emissões de dióxido de carbono e para a valorização de resíduos industriais, confirmando os benefícios ambientais segundo princípios de economia circular. (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017; JUENGER et al., 2019).

Durante a pesquisa foram identificadas limitações principalmente nos estudos de caracterização microestrutural conduzidos predominantemente em pastas de cimento sob condições laboratoriais, o que demanda validações necessárias também em escalas industriais em argamassas e concretos. identificou-se também lacunas em estudos de análises de ciclo de vida completos, além da necessidade de quantificações dos impactos ambientais totais considerando todas as etapas, desde a extração, o processamento, o transporte até a destinação final dos materiais. Há a necessidade adicional do desenvolvimento de protocolos e normas específicos para a caracterização de compósitos cimentícios com adições minerais suplementares.

Como perspectivas futuras promissoras, recomenda-se investigação de novas fontes de resíduos ricos em cátions alternativos, incluindo rejeitos de mineração, cinzas de biomassa e subprodutos industriais regionalmente disponíveis. O desenvolvimento de metodologias de caracterização ambiental específicas para estes sistemas, incluindo avaliação de lixiviação de elementos e impactos em recursos hídricos, mostra-se necessário para consolidação técnica regulatória das substituições catiônicas como prática sustentável no ramo Engenharia Civil.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processos nº 402704/2023-1 e 309102/2023-5. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação e à equipe do Laboratório de Materiais da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), situada em Limeira, SP, Brasil.

Declaração de uso de Inteligência Artificial

Os autores utilizaram ferramentas de Inteligência Artificial exclusivamente como apoio à organização textual, revisão linguística e estruturação formal do artigo. Os autores declaram que todo o conteúdo científico, a interpretação dos resultados, as análises e as conclusões são de sua inteira responsabilidade.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, M. E. S. O. *Influência da magnésia reativa na pasta de cimento Portland composto com escória de alto forno*. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2022.

BERNARD, E. et al. *Characterization of magnesium silicate hydrate (M-S-H)*. Cement and Concrete Research, v. 116, p. 309-330, 2020.

BERNARD, E. et al. *Magnesium and calcium silicate hydrates, Part I: Investigation of the possible magnesium incorporation in calcium silicate hydrate (C-S-H) and of the calcium in magnesium silicate hydrate (M-S-H)*. Applied Geochemistry, v. 89, p. 229-242, 2018.

BERNARD, E. et al. *MgO-Based Cements – Current Status and Opportunities*. RILEM Technical Letters, v. 8, p. 65-78, 2023.

EVANGELISTA, L.; SILVA, R.; BRITO, J. *A comprehensive study on the impact of reactive magnesium oxide (MgO) on concrete properties: mechanical and durability assessment*. Journal of Construction Materials, v. 17, p. 2693-2712, 2025.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. *Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights*. Cement and Concrete Research, v. 122, p. 257-273, 2019.

LOTHENBACH, B. et al. *Influence of limestone on the hydration of Portland cements*. Cement and Concrete Research, v. 75, p. 165-173, 2015.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. *Supplementary cementitious materials*. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. *Towards sustainable concrete*. Nature Materials, v. 16, n. 7, p. 698-699, 2017.

RICHARDSON, I. G. *Model structures for C-(A)-S-H(I)*. Acta Crystallographica Section B, v. 70, n. 6, p. 903-923, 2014.

RICHARDSON, I. G.; GROVES, G. W. *Models for the composition and structure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel in hardened tricalcium silicate pastes*. Cement and Concrete Research, v. 22, n. 6, p. 1001-1010, 1992.

RUAN, S. et al. *Study on the synergistic hydration mechanism of granulated blast furnace slag-carbide slag-based cementitious materials and the properties of full-solid waste backfill materials*. Scientific Reports, v. 15, 2025.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 2-26, 2018.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

YANG, J. et al. *Effect of magnesium slag and blast furnace slag as partial cement substitutes on properties of cemented tailings backfill*. Journal of Central South University, v. 32, p. 2696-2716, 2025.

ZHANG, L. et al. *Is It Possible to Make Magnesia-Based Cement Environmentally Friendly?* ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 12, 2024.

UTILIZAÇÃO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO ADSORVENTE PARA REMOÇÃO DE CORANTE INDUSTRIAL EM MEIO AQUOSO: ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO, OTIMIZAÇÃO, CINÉTICA, ISOTERMAS E TERMODINÂMICA

1 Gabriela Schwantes Pagliarin, 2Thaís Martins Neves, 3 Nilson Romeu Marcílio, 4 Nicéia Chies Da Fré

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Feliz, e-mail: gabriela.pagliarin@aluno.feliz.ifrs.edu.br; 2 Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e-mail: thais.tneves@gmail.com; 3 Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e-mail: nilson@enq.ufrgs.br; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Feliz, e-mail: niceia.fre@feliz.ifrs.edu.br

Palavras-chave: Cinza da casca de arroz; Adsorção; Corantes têxteis.

Resumo

A utilização de resíduos agroindustriais apresenta-se como uma alternativa promissora para a remoção de poluentes em efluentes industriais. Com esse propósito, o presente trabalho avaliou a aplicação da cinza da casca de arroz (CCA) como biossorvente para a remoção do corante têxtil catiônico Azul Quimacryl BL–PÓ (AQ) em meio aquoso. A pesquisa iniciou-se com a caracterização da CCA. O planejamento experimental (PEXP) permitiu estimar as melhores condições operacionais de pH, quantidade de adsorvente e concentração do adsorvato, possibilitando a avaliação da cinética de adsorção, das isotermas de equilíbrio e do estudo termodinâmico. A cinética foi ajustada aos modelos de pseudo-primeira-ordem, pseudo-segunda-ordem e Elovich, enquanto as isotermas foram modeladas segundo Langmuir, Freundlich, Sips e Redlich-Peterson, em três temperaturas (298 K, 318 K e 328 K). Os resultados da caracterização confirmaram a presença de sílica na forma de cristobalita, grupos funcionais Si–O–Si e Si–O, além de perda de massa de 8,69 % ao ser submetida a altas temperaturas, teor de 72,8 % de sílica, ponto de carga zero em pH 8,3 e ampla faixa granulométrica. A otimização pelo PEXP indicou como melhores condições: concentração de corante de 10 mg/L, massa de adsorvente de 1,2 g/100 mL e pH natural da solução (6,00). A cinética atingiu o equilíbrio em 30 minutos e apresentou melhor ajuste ao modelo de pseudo-segunda ordem, com coeficiente de correlação (R^2) de 0,9981. Os dados experimentais das isotermas de adsorção apresentaram melhor ajuste ao modelo de Freundlich, o qual exibiu coeficientes de correlação elevados para as três temperaturas investigadas. A análise termodinâmica revelou que o processo de adsorção é favorecido pelo aumento da temperatura, espontâneo e energeticamente favorável. O mecanismo predominante do processo foi caracterizado como fisissorção, associada à heterogeneidade da superfície do adsorvente. O estudo demonstrou elevada eficiência, com remoção de 90 % do corante em solução, utilizando um resíduo agroindustrial amplamente disponível na Região Sul do país e sem necessidade de tratamentos prévios de superfície, ácidos ou básicos, evidenciando o potencial da CCA como biossorvente sustentável para aplicação em tratamentos de efluentes têxteis.

Introdução

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (Abit, 2024), a indústria têxtil pode ser considerada a segunda maior empregadora no setor de transformação do Brasil. A indústria têxtil se caracteriza por consumir um elevado volume de água em seus processos de tingimento, variando conforme a fibra, maquinário, entre outras características dos processos produtivos (Haque; Nahar; Sayem, 2021). O efluente gerado traz consigo dificuldades de tratamento, por possuir elevada carga orgânica e compostos de baixa biodegradabilidade (Salem, 2010).

Métodos tradicionais de tratamento nem sempre apresentam grande eficiência na remoção de corantes catiônicos de efluentes têxteis, o que tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao uso da adsorção como alternativa para a remoção desses poluentes (Zanoni e Yamanaka, 2016). A adsorção é um processo de separação de substâncias que estão presentes em fases fluidas, sendo considerada um fenômeno de transferência de massa (Worch, 2021). Vários fatores podem interferir no processo de adsorção, como por exemplo, a taxa de transferência de massa, tempo de contato, concentração do adsorvato, tipo e características do adsorvente, pH, temperatura, entre outros (Cavalcanti, 2012).

O Brasil, sendo um dos maiores produtores agrícolas do mundo, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias baseadas em biossorção, um processo que utiliza materiais de origem natural capazes de adsorver contaminantes (Ribas e Silva, 2022). Nesse contexto, destaca-se a cinza da casca de arroz como um biossorvente promissor. Na safra de 2024, foram colhidas aproximadamente 10 milhões de toneladas de arroz, sendo que cerca de 20% desse total corresponde à casca. Por não apresentar valor nutricional significativo, a casca do arroz é comumente utilizada como biomassa para geração de energia, resultando na formação da cinza da casca de arroz como subproduto. Devido à sua elevada área superficial, esse material torna-se viável e economicamente atrativo para aplicação em processos de biossorção (IBGE, 2024; Pressi, 2021).

Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia para a utilização do resíduo cinza da casca de arroz como potencial adsorvente na remoção do corante catiônico Azul Quimacryl em meio aquoso. Foram realizados estudos de caracterização com a cinza da casca de arroz, a otimização do processo de adsorção pelo planejamento experimental, cinéticas, isotermas e termodinâmica de adsorção. Assim, além de mitigar os impactos

ambientais associados ao descarte inadequado desse resíduo agroindustrial, busca-se propor uma alternativa sustentável para o setor têxtil. Ressalta-se que o processo de adsorção foi conduzido sem a necessidade de pré-tratamento ácido ou básico do material adsorvente.

Materiais e Métodos

Preparo e caracterização dos materiais:

A Cinza da Casca de Arroz (CCA), um resíduo da indústria do arroz, foi obtida por doação de um produtor rural do município de Feliz – RS, utilizada como ingrediente no substrato para a produção de morangos. Realizou-se o peneiramento e separação da fração com granulometrias inferiores a 50 mesh, para evitar a influência da turbidez nas leituras de absorbância, após o processo de adsorção. Após o peneiramento, o material foi lavado e seco em 100 °C por 24 h.

A CCA foi caracterizada pela granulometria utilizando peneiras de inox (Tamis Produtos Laboratoriais LTDA) com malhas de 20, 35, 50, 60, 70, 100 e 140 mesh. A determinação do ponto de carga zero (PCZ) foi realizada com base nos estudos de Pereira (2024). Os ensaios foram realizados em triplicata, ajustando-se o pH de soluções de NaCl de 0,1 mol/L entre 2,33 e 10,52, utilizando soluções de HCl 0,1 mol/L e NaOH 0,1 mol/L. Em erlenmeyers contendo 200 mL de NaCl 0,1 mol/L com os pH ajustados, adicionou-se 0,2 g de CCA. As amostras foram mantidas sob agitação orbital (180 rpm) por 24 h a 25 °C. Após esse período, foram filtradas e o pH final foi medido. A análise de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada entre 650 e 4000 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1} em equipamento FTIR (PerkinElmer Spectrum 10.5.2). A análise de Difração de Raios-X (DRX) foi realizada em equipamento (D2 Phaser - Bruker: tensão de 30 kV e radiação Cu (Kα)). A análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizada em equipamento WD-FRX (RIX 3100 Rigaku). As análises de Termogravimetria (TGA) e Derivada Termogravimétrica (DTG) foram realizadas até a temperatura de 992,53 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e atmosfera inerte em equipamento SDT (Q600 V20.9 Build 20 TA Instruments).

O corante catiônico Azul Quimacryl BL – PÓ (AQ) foi doado por uma indústria têxtil localizada no município de Caxias do Sul (RS). A partir desse corante, foi preparada uma solução com concentração de 1 mg/L utilizando água destilada.

O espectro de absorção molecular do corante AQ foi obtido a partir de uma solução de 25 mg/L, determinando-se o comprimento de onda de máxima absorção por meio de varredura entre 190 e 1100 nm em equipamento espectrofotômetro UV-Vis (Nova 6100UV Nova Instrumentos). A curva de calibração do corante AQ foi construída a partir de 10 soluções com concentrações entre 2 e 50, analisadas por espectrofotometria UV-Vis. A partir do ajuste linear dos dados, obteve-se uma equação capaz de determinar concentrações desconhecidas do corante.

Planejamento experimental:

Os testes de planejamento experimental (PEXP) foram conduzidos por meio de um planejamento composto central rotacional (DCCR), avaliando três variáveis: pH, quantidade de CCA e concentração de AQ. A Tabela 01 mostra os valores dos níveis de cada uma das variáveis.

Tabela 01: Variáveis testadas e códigos do planejamento experimental.

Variáveis	Código	Níveis				
		-1,68	**-1**	**0**	**1**	**1,68**
pH	X_1	5	6	7	8	9
Quantidade CCA, g/100mL	X_2	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
Concentração AQ, mg/L	X_3	10	20	30	40	50

O PEXP resultou em 20 diferentes experimentos (Tabela 02), sendo realizados em triplicata, totalizando 60 amostras. Os experimentos foram conduzidos em shaker com condições fixas de velocidade de agitação de 150 rpm, volume de solução de 100 mL e temperatura de 25 °C. A partir dos resultados obtidos, foram calculados os percentuais de remoção pela Equação 01 e realizada a análise de variância ANOVA com nível de significância de 5% (α = 0,05). A relação matemática entre as três variáveis testadas (pH, quantidade de adsorvente e concentração do adsorvato) foi obtida a partir dos valores de interação entre elas na remoção do corante AQ.

$$\%rem = \frac{Ci - Cf}{Ci} \times 100 \qquad (01)$$

Onde: *Ci* e *Cf* são as concentrações iniciais e finais do corante, respectivamente.

A metodologia de superfície de resposta (MSR) foi aplicada para encontrar as condições otimizadas de operação do processo de adsorção. Essas condições foram utilizadas para a determinação da cinética de adsorção e para a obtenção das isotermas de equilíbrio.

Tabela 02: Variáveis testadas e códigos do planejamento experimental.

Ensaio	X_1 pH	X_2 Quantidade CCA (g/100 mL)	X_3 Concentração AQ (mg/L)	X_1 (Cód.)	X_2 (Cód.)	X_3 (Cód.)
1	6	0,6	20	-1	-1	-1
2	6	0,6	40	-1	-1	1
3	6	1,2	20	-1	1	-1
4	6	1,2	40	-1	1	1
5	8	0,6	20	1	-1	-1
6	8	0,6	40	1	-1	1
7	8	1,2	20	1	1	-1
8	8	1,2	40	1	1	1
9	7	0,9	30	0	0	0
10	7	0,9	30	0	0	0
11	7	0,9	30	0	0	0
12	7	0,9	30	0	0	0
13	7	0,9	30	0	0	0
14	7	0,9	30	0	0	0
15	9	0,9	30	1,68	0	0
16	5	0,9	30	-1,68	0	0
17	7	1,5	30	0	1,68	0
18	7	0,3	30	0	-1,68	0
19	7	0,9	50	0	0	1,68
20	7	0,9	10	0	0	-1,68

Cinética, isotermas e estudo termodinâmico:

A partir do PEXP a modelagem cinética da adsorção do AQ pela CCA foi construída, utilizando os modelos de pseudo-primeira-ordem (Murphy *et al*., 2023), pseudo-segunda-ordem (Murphy *et al*., 2023) e Elovich (Wang e Guo, 2023). Os ensaios para a determinação da cinética de adsorção foram realizados em duplicata a 298 K, utilizando 100 mL de solução de AQ (10 mg/L), 1,2 g de adsorvente, agitação de 150 rpm em tempo de: 2; 5; 10; 15; 20; 30; 40 e 60 min. A concentração final de AQ na solução (C_f, mg/L) e a quantidade de AQ adsorvida por quantidade de adsorvente em cada tempo (q_t, mg/g) foram calculadas utilizando-se as Equações 2 – obtida pela curva de calibração do AQ – e 3, respectivamente.

$$C_f = \frac{(\text{ABS} - 0{,}0294)}{0{,}0502} \qquad (02)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_f)V}{m} \qquad (03)$$

Onde ABS é obtido a partir da leitura em espectrofotômetro (adimensional), C_0 a concentração inicial da solução (mg/L), V o volume da solução (L) e m a massa do adsorvente (g).

Os ensaios para a obtenção das isotermas de adsorção a partir de dados do PEXP foram realizados em duplicata nas temperaturas de 298, 318 e 328 K, utilizando 100 mL de solução, 1,2 g de adsorvente e diferentes concentrações de AQ entre 10 e 160 mg/L. A partir das leituras em espectrofotômetro das amostras foi encontrada a concentração de equilíbrio (C_e, mg/L) e a quantidade de AQ adsorvida por quantidade de adsorvente no equilíbrio (q_e, mg/g) utilizando as Equações 2 e 3. Os dados foram ajustados aos modelos de Langmuir (Langmuir, 1918), Freundlich (Freundlich, 1906), Sips (Sips, 1948) e Redlich-Peterson (Redlich e Peterson, 1959).

O estudo termodinâmico foi realizado com base na isoterma de melhor ajuste, calculando-se os parâmetros de constante de equilíbrio (Kc), energia livre de Gibbs (ΔG°), entalpia (ΔH°) e entropia (ΔS°) (Lima *et al*., 2019), nas temperaturas de 298 K, 318 K e 328 K. A natureza térmica, a espontaneidade e a favorabilidade do processo foram avaliadas.

Resultados e Discussões

Caracterização dos materiais:

A CCA bruta apresentou ampla distribuição granulométrica (0,05 a 0,9 mm), característica de materiais obtidos por queima sem controle rigoroso. A análise indicou predominância de partículas finas, com cerca de 50% retidas até 50 mesh, o que limita o uso direto do material, sendo necessária a separação granulométrica. O diâmetro médio de Sauter foi de 0,174 mm, inferior ao reportado por Schmitz (2019), possivelmente devido à predominância de partículas mais finas na amostra coletada.

O PCZ da CCA foi determinado em aproximadamente 8,3 (Figura 01 - A), indicando o pH em que a carga da superfície é nula. A análise de FTIR (Figura 01 - B) da CCA apresentou uma banda estreita e bastante intensa em 1090,95 cm^{-1}, atribuído a vibração de estiramento assimétrico do Si–O–Si, já a banda, menos intensa, de 792,4 cm^{-1} deve-se a vibração de flexão do Si-O (Cavalcante et al., 2024; Zanoni et al., 2019).

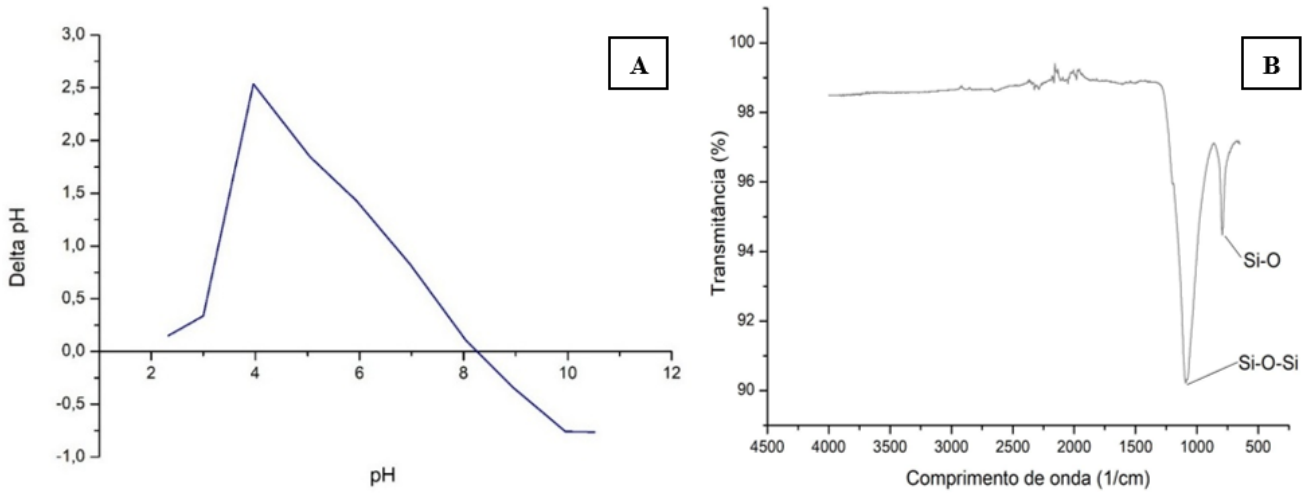


Figura 01: (A) Ponto de carga zero CCA; (B) Espectroscopia Infravermelho com Transformada de Fourier CCA.

A análise de FRX da CCA mostrou predominância de SiO_2 (72,8%), com menores teores de CaO (1,8%) e K_2O (1,4%), além de outros componentes e matéria orgânica residual.

A análise de DRX (Figura 02 - A) indicou predominância de cristobalita, associada às variações de temperatura no processo em grelha. Embora fases amorfas possam se formar em torno de 700 ºC, temperaturas mais elevadas favorecem estruturas cristalinas, podendo ser influenciadas por contaminantes (Fernandes et al., 2016; Zou e Yang, 2019). Ainda assim, a presença de um halo entre 18 e 24° indicou que a amostra é parcialmente amorfa, enquanto os picos em 2θ igual a 21,9°, 28,5°; 31,5° e 36,3° confirmam a presença da fase cristobalita (Zou e Yang, 2019; Schmitz, 2019; Islam et al., 2025).

As curvas de TGA/DTG (Figura 02 - B) indicaram perda de massa total de 8,69 % para a CCA. Desse valor, 2,57 % correspondem à remoção de umidade, 0,25 % à liberação de voláteis e 5,87 % a resíduos de combustão, associados à presença de carbono.

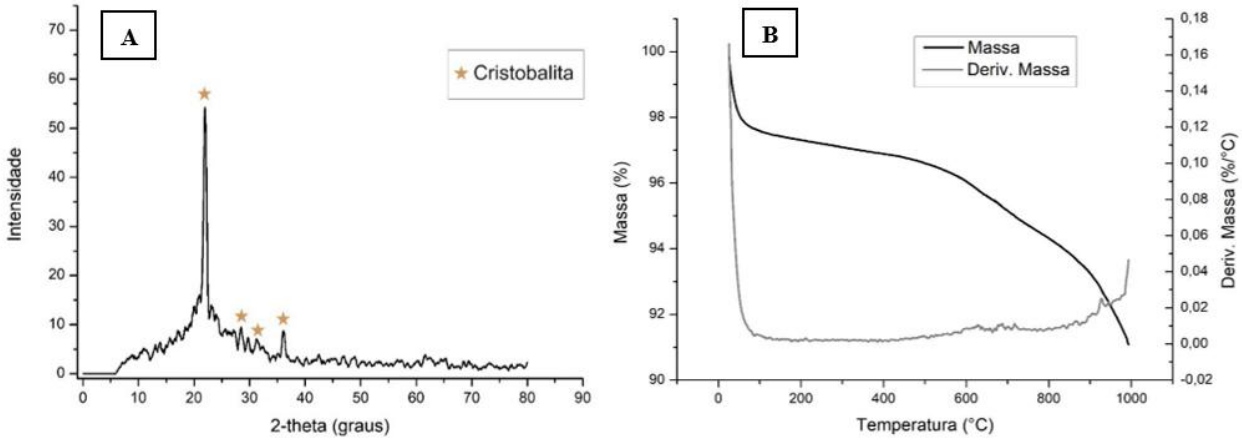


Figura 02: (A) Difração de Raios-X CCA; (B) Termogravimetria e Derivada Termogravimétrica CCA.

O espectro de absorção molecular do corante AQ (Figura 03 – A) revelou um máximo de absorção em 600 nm. A curva de calibração (Figura 03 – B) apresentou comportamento linear, com coeficiente de correlação (R^2) de 0,9987, indicando excelente ajuste das leituras de absorbância com a concentração do corante.

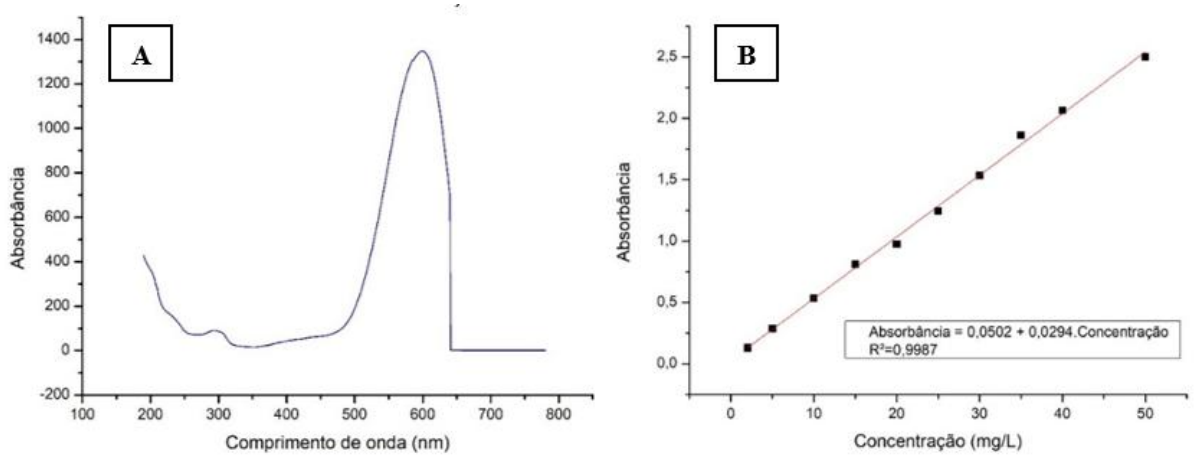


Figura 03: (A) Espectro de absorção molecular do AQ; (B) Curva de calibração do corante AQ.

Planejamento experimental:

Os percentuais de remoção do corante AQ com o adsorvente CCA são apresentados na Tabela 03. As variações observadas nos desvios padrão das triplicatas são atribuídas à heterogeneidade do material CCA.

Tabela 03: Matriz do DCCR e remoções de AQ utilizando CCA.

Ensaio	pH	Quantidade CCA (g/100 mL)	Concentração AQ (mg/L)	Remoção (%)
1	-1 (6)	-1 (0,6)	-1 (20)	72,62 ±0,63
2	-1 (6)	-1 (0,6)	1 (40)	68,07 ±0,56
3	-1 (6)	1 (1,2)	-1 (20)	88,26 ±0,53
4	-1 (6)	1 (1,2)	1 (40)	87,77 ±0,58
5	1 (8)	-1 (0,6)	-1 (20)	64,41 ±2,02
6	1 (8)	-1 (0,6)	1 (40)	66,23 ±1,05
7	1 (8)	1 (1,2)	-1 (20)	87,17 ±0,21
8	1 (8)	1 (1,2)	1 (40)	84,64 ±0,10
9	0 (7)	0 (0,9)	0 (30)	80,96 ±2,27
10	0 (7)	0 (0,9)	0 (30)	81,92 ±0,70
11	0 (7)	0 (0,9)	0 (30)	82,05 ±2,05
12	0 (7)	0 (0,9)	0 (30)	81,86 ±1,04
13	0 (7)	0 (0,9)	0 (30)	81,68 ±2,95
14	0 (7)	0 (0,9)	0 (30)	81,68 ±0,75
15	1,68 (9)	0 (0,9)	0 (30)	81,40 ±0,66
16	-1,68 (5)	0 (0,9)	0 (30)	78,07 ±0,87
17	0 (7)	1,68 (1,5)	0 (30)	90,96 ±0,72
18	0 (7)	-1,68 (0,3)	0 (30)	48,72 ±0,61
19	0 (7)	0 (0,9)	1,68 (50)	74,90 ±0,63
20	0 (7)	0 (0,9)	-1,68 (10)	84,61 ±0,47

A partir dos resultados do PEXP, foi realizada a análise de variância (ANOVA) (Tabela 04), em um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), obtidos para a variável resposta Remoção (%) de corante AQ pela CCA.

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias Quadráticas	F_{calc}	F_{tab}
Regressão	5590,50	9	621,17	98,13	8,81
Resíduo	316,50	50	6,33		
Erro padrão	2,52				
Total	5907,00	59			
R^2	0,9464				
R^2_{ajd}	0,9368				

Tabela 04: Análise de variância (ANOVA) do DCCR para a variável resposta Remoção (%) utilizando o adsorvente CCA (α = 0,05).

O modelo quadrático apresentou excelente ajuste aos dados experimentais de adsorção do corante, com R^2 = 0,9464 e R^2_{adj} = 0,9368, indicando que mais de 93% da variabilidade da Remoção (%) foi explicada. O teste F confirmou a significância do modelo (F_{calc} = 98,13; p < 0,05), sendo altamente preditivo por apresentar valor muito superior ao F_{tab}. A regressão foi realizada com 95 % de confiança, e o gráfico de Pareto (Figura 04) evidencia os efeitos das variáveis estudadas na Remoção (%) do AQ (Montgomery, 2019). Na Figura 04, o termo linear da quantidade de CCA foi o mais significativo e com efeito positivo, indicando que o aumento do adsorvente favorece a remoção do corante. A concentração de AQ apresentou efeito negativo significativo, mostrando maior eficiência em menores concentrações. Já o pH e suas interações não foram significativos no intervalo estudado. Dessa forma, adotou-se o pH natural da solução (6,00) para os estudos de cinética e isotermas, o que pode ser vantajoso do ponto de vista industrial, por dispensar tratamento básico ou ácido das cinzas.

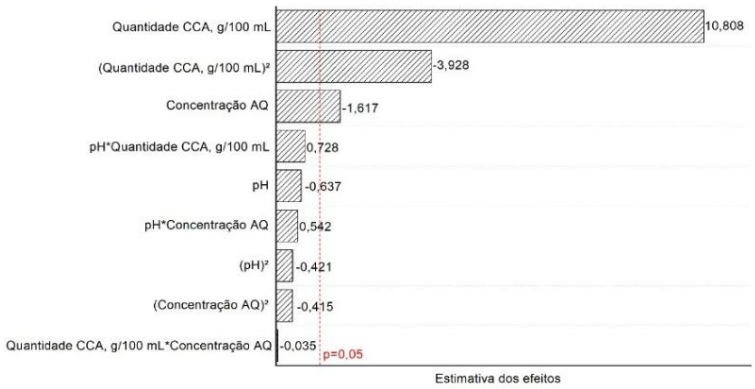


Figura 04: Gráfico de Pareto dos efeitos das variáveis na remoção do AQ.

A regressão resultou em um modelo polinomial de segunda ordem (Equação 04), considerando todas as variáveis, com o pH fixado em seu valor natural.

$$Remoção\ (\%) = 81{,}650 - 0{,}637 * X_1 - 0{,}421 * X_1^2 + 10{,}808 * X_2 - 3{,}928 * X_2^2 - 1{,}617 * X_3 - 0{,}415 * X_3{}^2 + 0{,}728 * X_1 * X_2 + 0{,}542 * X_1 * X_3 - 0{,}036 * X_2 * X_3 \quad (04)$$

Portanto, a partir da verificação do modelo pela análise estatística, utilizou-se a Equação 04 para a obtenção da superfície de resposta (Figura 05) que ilustra a influência das variáveis Quantidade CCA e Concentração de AQ no % Remoção.

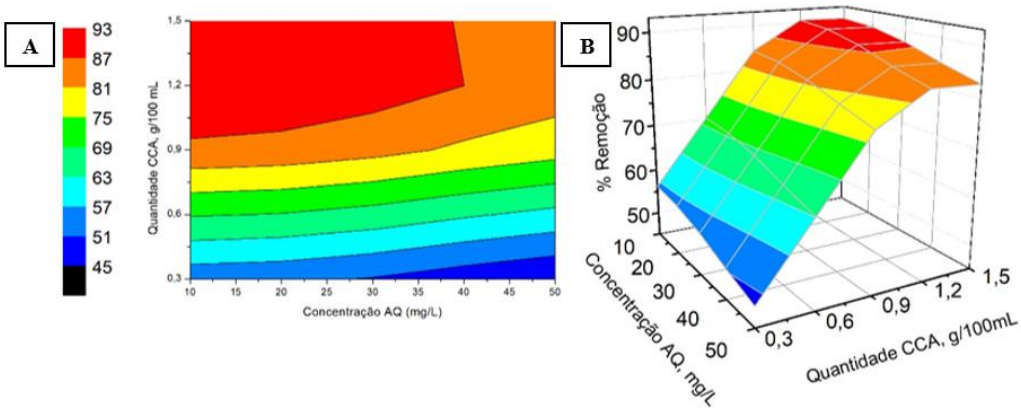


Figura 05: Superfície de resposta para a Remoção (%) de AQ utilizando CCA: (A) Remoção (%) do AQ em relação a Concentração de AQ e a Quantidade de CCA (B) curva de contorno.

Cinética, isotermas e estudo termodinâmico:

As condições experimentais otimizadas para a obtenção da cinética de adsorção e isotermas de equilíbrio foram a concentração de AQ de 10 mg/L, quantidade de adsorvente de 1,2 g/100 mL e pH natural da solução (6,00).

A partir da cinética de adsorção (Figura 6), observou-se que o equilíbrio foi atingido em 30 minutos, com adsorção rápida nos primeiros 10 minutos devido à disponibilidade de sítios ativos, seguida de estabilização pela saturação desses sítios. Os modelos apresentaram altos coeficientes de correlação (PPO = 0,9780; PSO = 0,9981; Elovich = 0,9792), sendo o modelo de pseudo-segunda-ordem o que melhor representou a cinética do processo. Esse resultado indicou que o mecanismo dominante envolveu adsorção química, por meio de compartilhamento ou troca de elétrons entre o AQ e a CCA (Cavalcante et al., 2024).

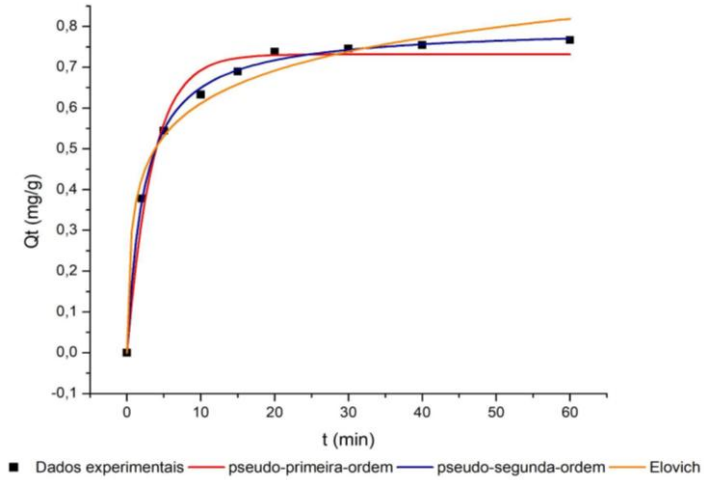


Figura 06: Gráfico da cinética de adsorção.

A partir das isotermas de adsorção (Figura 7) observou-se que o aumento da temperatura melhorou o ajuste dos modelos aos dados experimentais e elevou a capacidade máxima de adsorção (de 8,49 para 8,97 mg/g), indicando um processo endotérmico.

Os modelos apresentaram bons coeficientes de correlação, sendo Freundlich, Sips e Redlich-Peterson os que melhor representaram os dados, porém o de Freundlich apresentou menores erros padrões para as três temperaturas. O ajuste a estes modelos indicou uma adsorção favorável, em superfície heterogênea com a coexistência de mecanismos de mono e multicamada. De modo geral, o comportamento do sistema sugeriu uma distribuição heterogênea dos sítios ativos e possíveis interações entre as moléculas adsorvidas no interior dos poros do adsorvente (Cavalcante et al., 2024).

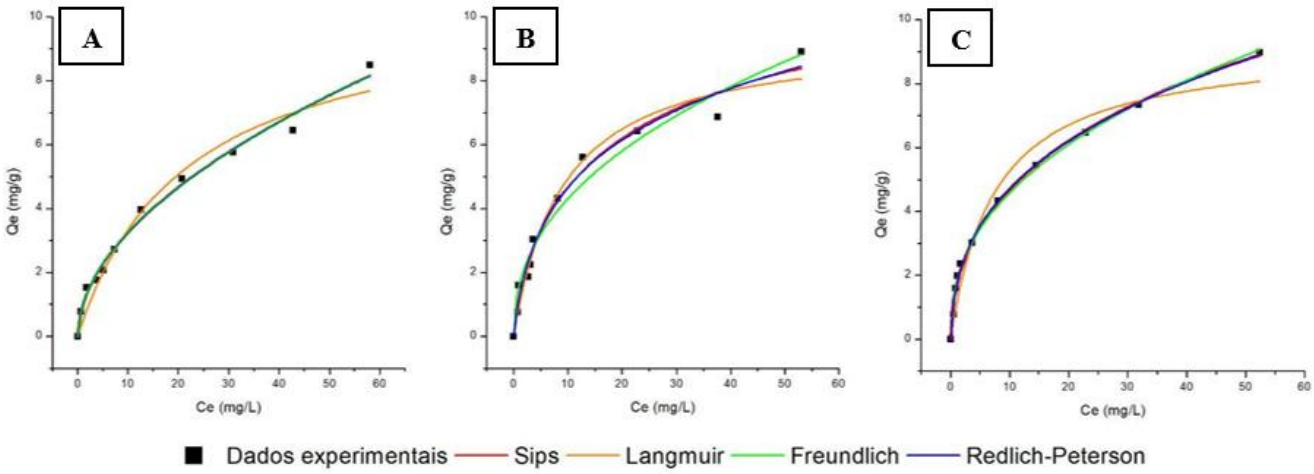


Figura 07: Gráficos das isotermas de adsorção com as temperaturas de (A) 298 K, (B) 318 K e (C) 328 K.

Os valores negativos de ΔG°, nas respectivas temperaturas estudadas, (-33232, -36790 e -38226 kJ/mol) indicaram que a adsorção do corante AQ pela CCA é espontânea e favorável. O valor de ΔH° (16,97 kJ/mol) mostrou que o processo é endotérmico e associado à fisissorção, sendo favorecido pelo aumento da temperatura, o que melhora a difusão e a interação do corante com o adsorvente. O valor positivo de ΔS° (168,52 J/K mol) indicou maior desordem na interface sólido–solução e afinidade do corante pela CCA. O alto valor de R^2 (0,97) obtido confirmou a boa concordância entre o modelo e os dados experimentais.

Considerações finais

A cinza da casca de arroz proveniente indústria arrozeira, sem qualquer tratamento para ativação de superfície, demostrou ser um biossorvente eficiente na remoção do corante Azul Quimacryl BL-PÓ. A caracterização mostrou predominância de sílica na forma de cristobalita. O pH não teve influência significativa na remoção, enquanto a cinética de adsorção ocorreu de acordo com o modelo de pseudo-segunda-ordem e as isotermas de equilíbrio se ajustaram ao modelo de Freundlich. Os parâmetros termodinâmicos indicaram um processo espontâneo, favorável e endotérmico. Dessa forma, a CCA se apresenta como uma alternativa viável, econômica e sustentável para a remoção desse corante catiônico, com potencial para aplicações no tratamento de efluentes de indústrias têxteis.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO – ABIT. Perfil do setor, São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor. Acesso em: 13 jan. 2026.

CAVALCANTE, L. C. *et al*. Kinetic, isothermal and thermodynamic studies of Reactive Black 5 removal using rice husk ashes and powdered activated carbon. **Desalination And Water Treatment**, v. 320, p. 100606, 2024. http://dx.doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100606.

CAVALCANTI, J. E. W. de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. 2. ed. ampl. São Paulo: Engenho Editora Técnica, 2012.

FERNANDES, I. J. *et al*. Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy. **Fuel**, v. 165, p. 351-359, 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.086.

FREUNDLICH, H. Adsorption in solution. **Phys. Chem. Soc.**, v. 40, p. 1361–1368, 1906.

HAQUE, M. S.; NAHAR, N.; SAYEM, S. M. Gestão industrial da água e sustentabilidade: Desenvolvimento da ferramenta SIWP para as indústrias têxteis de Bangladesh. **Recursos Hídricos e Indústria**, v. 25, 100145, 2021. https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100145

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção agropecuária: arroz, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/arroz/br. Acesso em: 12 jan. 2026.

ISLAM, M. M. *et al*. A critical review on textile dye-containing wastewater: ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety. **Cleaner Chemical Engineering**, Bangladesh, v. 11, 100165, 2025. http://dx.doi.org/10.1016/j.clce.2025.100165.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica, and platinum. **J. Am. Chem. Soc.**, v. 40, p. 1361–1403, 1918.

LIMA, É. C. *et al*. A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoof equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. **Journal Of Molecular Liquids**, v. 273, p. 425-434, 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. São Paulo, LTC, 2019.

MURPHY, O. P. *et al*. A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time. **Acs Omega**, Limerick, v. 8, n. 20, p. 17407-17430, abr. 2023. http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.2c08155.

PEREIRA, Mariane A. *et al*. Evaluation of materials derived from rice husk as adsorbents of cationic and anionic dyes. **Cerâmica**, v. 70, p. 1-16, 2024. http://dx.doi.org/10.1590/dxnp6972.

PRESSI, L. **Análise do potencial uso de resíduos agroindustriais como adsorventes alternativos para metais no Rio Grande do Sul**. 2021. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

REDLICH, O, PETERSON, D.L. A useful adsorption isotherm. **J. Chem. Phys**., v. 63, p. 1024–1027, 1959.

RIBAS, F. B. T.; SILVA, W. L. Biossorção: uma revisão sobre métodos alternativos promissores no tratamento de águas residuais. **Matéria**, v. 27, n. 2, 2022. http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620220002.1312.

SALEM, V. **Tingimento têxtil: fibras, conceitos e tecnologias**. São Paulo, SP: Blücher, 2010.

SCHMITZ, Thaís. **Síntese hidrotérmica de zeólitas sem direcionadores orgânicos de estrutura a partir de cinza de casca de arroz sem pré-tratamento**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SIPS, R. On the structure of a catalyst surface. **J. Chem. Phys**., v. 16, p. 490–495, 1948.

WORCH, E. **Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling**, 2 ed., Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2021.

WANG, J.; GUO, X. Adsorption kinetics and isotherm models of heavy metals by various adsorbents: an overview. **Critical Reviews In Environmental Science And Technology**, Pequim, v. 53, n. 21, p. 1837-1865, jun. 2023. http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2023.2221157.

ZANONI, E. T. *et al*. Avaliação da atividade antimicrobiana e adsortividade de nanopartículas de sílica dopadas com CuO. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 1, 2019. http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0661.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. **Corantes: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016.

ZOU, Y.; YANG, T. Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications. **Rice Bran And Rice Bran Oil**, p. 207-246, 2019. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-812828-2.00009-3.

ECONOMIA CIRCULAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL: INCORPORAÇÃO DE LODO CARBONATADO COMO MATERIAL SUPLEMENTAR NA PRODUÇÃO E DESEMPENHO DE ARGAMASSAS

1 Ariane Roberto Becker, 1Walleska Oliveira Pereira de Sena Neiva*,
1 Rosa Cristina Cecche Lintz, 1 Luísa Andréia Gachet
1 Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT-Unicamp), Limeira, Brasil.
**Autor de contato: walleska.neiva@gmail.com (marcado com um asterisco entre os autores)*

Palavras-chave: resíduos industriais; argamassas cimentícias; sustentabilidade na construção civil.

Resumo

A transição para modelos produtivos baseados na economia circular tem incentivado a busca por soluções que promovam a valorização de resíduos industriais e a redução do consumo de recursos naturais na construção civil. Nesse contexto, a incorporação de subprodutos industriais em matrizes cimentícias representa uma alternativa promissora para minimizar impactos ambientais, reduzir a disposição de resíduos em aterros e contribuir para a produção de materiais mais sustentáveis. Entre esses resíduos, destaca-se o lodo carbonatado, subproduto gerado em processos industriais e que apresenta potencial de reutilização como material suplementar ao cimento Portland. Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar a incorporação de lodo carbonatado na produção de argamassas cimentícias, investigando seus efeitos sobre propriedades mecânicas e parâmetros associados à durabilidade. Para isso, foi desenvolvido um traço de argamassa de referência e outros com diferentes teores de substituição parcial do cimento Portland por lodo carbonatado, variando de 10% a 60% em volume. O resíduo foi caracterizado física e quimicamente, incorporado aos traços de argamassa propostos e foram avaliadas suas propriedades mecânicas e microestruturais. Entre os ensaios realizados, destacam-se ensaios de durabilidade (absorção de água, índice de vazios e massa específica). Adicionalmente, foi realizada a determinação da resistência de aderência à tração por meio do ensaio de arrancamento, conforme a ABNT NBR 15258:2021, que permite avaliar a resistência da interface entre a argamassa e o substrato de concreto. Os resultados obtidos contribuem para a avaliação do potencial de reutilização do lodo carbonatado como material suplementar ao cimento na produção de argamassas, evidenciando sua viabilidade técnica e ambiental.

Introdução

Os resíduos das indústrias de galvanoplastia, fábricas de papel e têxteis, de revestimentos cerâmicos, dentre outros, têm sido alvos de pesquisas recentes em vários países, como a Alemanha, o Brasil, a China, a Índia, entre outros, visando sua incorporação em matrizes cimentícias; eles são gerados em grande quantidade e exigem áreas extensas para disposição em aterros (RAO MEDA; SHARMA; TYAGI, 2021). As fábricas de papel e celulose possuem uma produção estimada de 550 milhões de toneladas anuais até 2050, sendo o lodo seu principal resíduo (FAUBERT et al., 2016), também chamado na literatura de lama de carbonato, lama de cal ou lodo carbonático.

Do ponto de vista ambiental e de sustentabilidade global, o uso do lodo carbonático como material cimentício suplementar contribui para um processo produtivo mais limpo (AZEVEDO et al., 2018), ao proporcionar o reaproveitamento dos resíduos industriais e mitigar as emissões de gases associadas à fabricação do cimento (BECKER et al., 2025a), que é responsável por cerca de 5% e 8% do CO_2 produzido a cada ano no mundo (ZHANG et al., 2025). De acordo com as pesquisas de AZEVEDO et al., 2020, foi verificado, por meio da análise do ciclo de vida, que a argamassa com incorporação do lodo carbonático proporciona redução de aproximadamente 10% nas emissões de CO_2, ao ser comparada com argamassas convencionais. Também há vantagens econômicas, visto que os custos de disposição final do lodo carbonático têm aumentado, impulsionando o interesse em seu reaproveitamento (TURNER et al., 2022).

Ademais, o desenvolvimento sustentável está diretamente relacionado ao uso eficiente de recursos naturais, o que promove a busca por construções duráveis. Elas são essenciais para reduzir o consumo de materiais ao longo do tempo e contribuir para a redução dos impactos ambientais gerados pela construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 2014; ASLANI; DEHESTANI, 2020; CAPMAS, 2014). Somado às suas vantagens ambientais, o uso de lodo carbonático influencia positivamente a microestrutura quando em baixos teores, reduzindo os vazios internos do material (GUNAWAN et al., 2025) e o tornando mais denso e menos propício aos ataques que o levam a se deteriorar, o que tende a favorecer a durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Nesse contexto, além dos benefícios ambientais associados ao reaproveitamento de resíduos, o uso do lodo carbonático pode contribuir para a melhoria do desempenho e da durabilidade dos materiais cimentícios.

O lodo carbonático é identificado como material não perigoso e não inerte (BENINI et al., 2019). Sua composição apresenta fibras de origem orgânica e é quimicamente rica em óxido de cálcio, dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro, características que conferem a esse material elevada compatibilidade com matrizes cimentícias e potencial para aplicação em sistemas construtivos; seu estado natural apresenta alta umidade, o que leva à utilização de tratamentos prévios em grande parte dos estudos (GHIRARDI et al., 2018). Ele possui potencial de uso em concretos e argamassas, substituindo parcialmente o cimento, e em outros materiais de construção, como blocos e outras peças cerâmicas, apresentando melhorias no desempenho nas propriedades mecânicas e de durabilidade, a depender dos teores empregados (BENINI et al., 2019). Ensaios de

caracterização física e química conduzidos por diferentes autores indicam que o material apresenta compatibilidade para uso como matéria-prima secundária na fabricação de cimento (RODRIGUES et al., 2016). Além disso, seu potencial comportamento pozolânico foi avaliado a partir da variação da condutividade elétrica em solução saturada de hidróxido de cálcio, evidenciando sua reatividade nesse meio (AZEVEDO et al., 2018). O processo de obtenção e utilização do lodo carbonático pode ser visualizado na Figura 01.

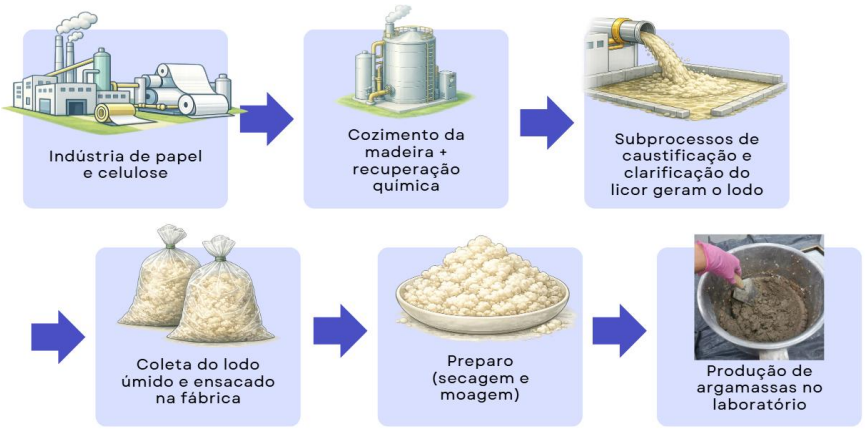


Figura 01: Etapas de geração, coleta e aplicação do lodo carbonático em argamassas
Fonte: Elaborado pelas autoras com base em Benini et al. (2019) e Ghirardi et al. (2018)

Quando o lodo carbonático é combinado com cinzas volantes, em diferentes proporções, para a produção de cerâmica de anortita, observa-se a obtenção de materiais de baixa densidade, o que evidencia seu potencial de aproveitamento, embora haja um aumento na absorção de água (QIN et al., 2015).

Em aplicações em blocos de pavimentação de concreto, a substituição parcial do agregado miúdo por lodo carbonático pode promover melhorias na resistência à compressão em baixos teores (até 5%), além de contribuir para a redução dos custos de produção, apresentando desempenho satisfatório para usos não estruturais (GUNAWAN et al., 2025).

De forma semelhante, a substituição parcial do cimento em blocos de concreto vazado, em teores de até 10%, resulta em propriedades próximas às exigidas pelas normas quanto à resistência à compressão, absorção de água e densidade, indicando a viabilidade do material para aplicação em elementos de vedação, especialmente em paredes internas (PERIASAMY; GOVINDAN, 2025).

Em argamassas cimentícias, a substituição parcial do cimento apresentou resultados técnicos satisfatórios em teor de até 10% de massa, com relação água/aglomerante variando entre 0,80 e 0,95 (AZEVEDO et al., 2018). Em um estudo que comparou a incorporação do resíduo nas formas seca e líquida em argamassas de cimento e cal, verificou-se que o uso do lodo na forma líquida contribui para a redução do tempo de processamento do lodo primário, impactando diretamente na diminuição do custo final das argamassas. Além disso, a mistura líquida fina apresentou resultados mais eficientes, com melhorias nas propriedades tecnológicas, de durabilidade e no desempenho ambiental (AZEVEDO et al., 2020). Observa-se uma redução progressiva da resistência mecânica com o aumento do teor de substituição; todavia, quando em teores de até 40% em argamassas, atende-se aos requisitos de aplicações não estruturais, além de favorecer a durabilidade em função da densificação da matriz (BECKER et al., 2025a). Ainda em estudos com argamassas, a substituição do cimento em até 20% resultou em resistências mecânicas compatíveis com aplicação em revestimentos e assentamentos; os resultados sugeriram que a hidratação prolongada pode trazer melhorias nos resultados (BECKER et al., 2025b).

A microestrutura das matrizes cimentícias pode ser alterada pela incorporação de resíduos, tendo influência em suas propriedades de transporte, e consequentemente, no seu desempenho quanto à durabilidade (BENAMAR et al., 2025; BEDIAKO; VALENTINI, 2024).

Apesar de amplamente disponível no Brasil, ainda há poucos estudos acerca da utilização de resíduo de lodo carbonático proveniente de fábricas de papel (NUNES LOPES et al., 2023), sendo necessárias investigações quanto ao teor ótimo de incorporação, bem como à influência desse resíduo em propriedades relevantes para o desempenho das argamassas, tais como a resistência de aderência à tração (GHIRARDI et al., 2018), resistência à compressão, absorção de água, porosidade, trabalhabilidade, retenção de água, permeabilidade e aspectos relacionados à durabilidade e estabilidade dimensional. Além disso, para que ele seja integrado aos modelos de economia circular, é necessário que mais estudos sejam desenvolvidos (KIRTHIKA et al., 2025).

A resistência de aderência à tração é um parâmetro essencial para argamassas de assentamento, pois está diretamente relacionada à capacidade de vedação das juntas, impedindo a penetração de água das chuvas (CARASEK, 2010). Ela é uma propriedade indispensável para a vida útil dos sistemas compostos pelo substrato e argamassa (ALVES, 2019), sendo este o elo mais crítico (MANAWADU et al., 2023). Estudos apontam para a existência de uma relação entre a porosidade da matriz com a resistência de aderência, que necessita ser mais bem compreendida (AGUIAR, 2020). A argamassa deve possuir um equilíbrio entre fluidez, para penetrar nas rugosidades do substrato, e rigidez, para amenizar as deformações sofridas (TAO et al., 2022). A composição das argamassas é uma das variáveis mais influentes no comportamento quanto à aderência, de modo que um menor teor de cimento tende a diminuir esta propriedade (VAZ; CARASEK, 2019; CAMPOS, 2014; CARASEK, 2017). De modo geral, a incorporação de resíduos pode reduzir a resistência de aderência à tração, principalmente em teores mais elevados, em

função do aumento da porosidade e do teor de ar incorporado (GOMES, 2020). Em baixos teores, porém, o desempenho tende a se manter próximo ao da referência, sem perdas significativas, a depender do tipo de resíduo empregado (BECKER, 2021).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é avaliar como a incorporação de lodo carbonático em argamassas influencia os parâmetros relacionados à durabilidade, considerando aspectos como porosidade, absorção de água, permeabilidade, e a resistência de aderência à tração. Para isso, foram formulados diferentes traços com substituição parcial do cimento Portland em diferentes teores do resíduo, o qual foi submetido a ensaios de caracterização física e química.

Material e Métodos

Para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se a substituição parcial do cimento, em termos volumétricos, por lodo carbonático proveniente da indústria de produção de papel. Foram elaborados sete traços de argamassa: um de referência, sem substituição, e outros seis com teores de substituição de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60%. As proporções adotadas para cada composição estão apresentadas na Tabela 01. As proporções em massa foram obtidas a partir da conversão das substituições volumétricas, considerando as massas específicas dos materiais

Tabela 01: Proporção, em massa (g), de materiais utilizados para a produção das argamassas
Fonte: Os autores (2026)

Traços	Massa total	Cimento	Lodo	Areia	Água
REF	10208	2200	0	6600	1408
T10	10005	1980	17	6600	1408
T20	9801	1760	33	6600	1408
T30	9598	1540	50	6600	1408
T40	9395	1320	67	6600	1408
T50	9191	1100	83	6600	1408
T60	8988	880	100	6600	1408

Foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CPV – ARI, agregado miúdo, lodo carbonático, proveniente de uma fábrica de papel e celulose na região de Limeira – SP, e água. O lodo carbonático, conforme dados reportados na literatura, é constituído majoritariamente por óxido de cálcio (CaO), com teores na faixa de aproximadamente 45% a 53%, apresentando quantidades menores de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de magnésio (MgO). A perda ao fogo é elevada, situando-se entre 37% e 41%, associada à presença de materiais carbonáticos (BECKER, 2026).

O ensaio de absorção de água por capilaridade, apresentado na Figura 02 a) e realizado conforme ABNT NBR 9779:2012, foi realizado em estudo anterior, utilizando corpos de prova cilíndricos, posicionados secos em caixa metálica com tampa, sobre base com lâmina de água constante de (5 ± 1) mm. Foram realizadas pesagens sucessivas para determinar a massa de água absorvida, em intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 h. Complementarmente, o ensaio também foi realizado conforme a ABNT NBR 15259:2005, conforme a Figura 02 b), com corpos de prova prismáticos, avaliando o ganho de massa após 10 e 90 minutos de contato direto com a água. Os ensaios de absorção de água total, índice de vazios e massa específica foram igualmente realizados em estudo anterior, conforme a ABNT NBR 9778:2005, e são apresentados na Figura 03 a) e b). A determinação foi feita a partir de três condições de pesagem: massa seca, massa saturada e massa imersa, utilizando corpos de prova prismáticos. Todos os corpos de prova foram submetidos a cura úmida (imersos em água e mantidos em câmara úmida) até a idade de 28 dias.

Foi realizado o ensaio de resistência de aderência à tração, conforme a ABNT NBR 15258:2021. Foram utilizadas placas cimentícias pré-moldadas de dimensões 50x25x2 cm como substrato seco, sobre o qual as argamassas foram moldadas, de acordo com a ABNT NBR 15258:2021, com espessura de 20 mm. A cura foi realizada em ambiente de laboratório, na câmara úmida, até os 28 dias de idade.



(a) (b)

Figura 02: Corpos de prova para o ensaio de absorção por capilaridade. (a) Corpos de prova cilíndricos com a face inferior em contato com a lâmina de água em caixa metálica com tampa - ABNT NBR 15259:2005. (b) Arranjo para ensaio de corpos de prova prismáticos em contato com lâmina de água em caixa metálica com tampa - ABNT NBR 9778:2005.
Fonte: BECKER, 2026



(a) (b)

Figura 03: (a) Corpos de prova em panela metálica preparados para processo de fervura por 5 horas. (b) Corpos de prova pesados em balança hidrostática após fervura
Fonte: BECKER, 2026



(a) (b) (c) (d)

Figura 04: Preparo das misturas de argamassa e moldagem das placas. (a) Mistura dos materiais na argamassadeira. (b) Argamassa no estado fresco. (c) Moldagem das placas. (d) Placa no estado endurecido após 24 horas.
Fonte: Os autores (2026)

Resultados e Discussão

No ensaio de absorção de água por capilaridade, conduzido conforme a ABNT NBR 9779:2012, observou-se uma elevação progressiva do coeficiente de capilaridade com o aumento do teor de substituição do cimento pelo lodo carbonático. Para teores de até 30%, as variações foram relativamente moderadas, indicando impacto limitado na cinética de absorção. Entretanto, a partir do traço T40, verificou-se um incremento mais acentuado desse coeficiente, evidenciando maior suscetibilidade à penetração de água por ação capilar.

Os traços T50 e T60 apresentaram os maiores valores, caracterizando-se como os mais vulneráveis sob esse aspecto. Conforme ilustrado na Figura 05, o comportamento dos traços ao longo do período de ensaio não se mostrou uniforme, sendo observadas diferenças na evolução da absorção entre as idades analisadas. Destaca-se que os traços T20 e T30 apresentaram desempenho mais próximo ao traço de referência, indicando maior estabilidade frente à incorporação do resíduo em baixos teores.

O ensaio de absorção de água por capilaridade também foi realizado em conformidade com a ABNT NBR 15259:2005, específica para argamassas de assentamento e revestimento, sendo observado comportamento semelhante ao obtido anteriormente. As diferenças em relação ao traço de referência tornaram-se mais evidentes nos traços com maiores teores de substituição. Para níveis de substituição de até 30%, os coeficientes de capilaridade foram inferiores aos da referência, destacando-se o traço T20, que apresentou o menor valor entre as composições, com redução aproximada de 29%.

Por outro lado, o traço T60 apresentou um coeficiente de capilaridade cerca de dez vezes superior ao da referência, o que pode ser atribuído à formação de caminhos preferenciais para a penetração de fluidos e agentes agressivos.

Esses resultados indicam que a incorporação de lodo carbonático em teores elevados compromete a estanqueidade da matriz cimentícia, possivelmente em função do aumento da porosidade e da interconectividade dos poros. Tal condição favorece o transporte de líquidos e substâncias agressivas, impactando negativamente a durabilidade do material e restringindo sua aplicação em ambientes mais severos.

Essa tendência está em consonância com a literatura, que aponta a existência de um teor ótimo de substituição do cimento — geralmente entre 5% e 30% — no qual predominam efeitos benéficos, como o efeito fíler, contribuindo para a melhoria da microestrutura sem prejuízos significativos ao desempenho (BENAMAR et al., 2025; BEDIAKO; VALENTINI, 2024). Nesse sentido, estudos recentes evidenciam a influência do teor de incorporação na microestrutura das matrizes cimentícias, com refinamento em baixos teores, aumento da porosidade em teores mais elevados e a relação direta entre estrutura de poros e o desempenho do material, especialmente quanto ao transporte de fluidos e à durabilidade (YUVARAJ et al., 2026; ZEWDIE et al., 2026; ZENG et al., 2026).

Os resultados de absorção de água total (Figura 06a), confirmam a tendência observada nos ensaios anteriores, evidenciando o aumento da capacidade de retenção de água com a elevação do teor de lodo carbonático incorporado às argamassas. Esse comportamento pode estar associado, em parte, à natureza hidrofílica das fibras de celulose presentes no resíduo, que favorecem a absorção e retenção de umidade na matriz.

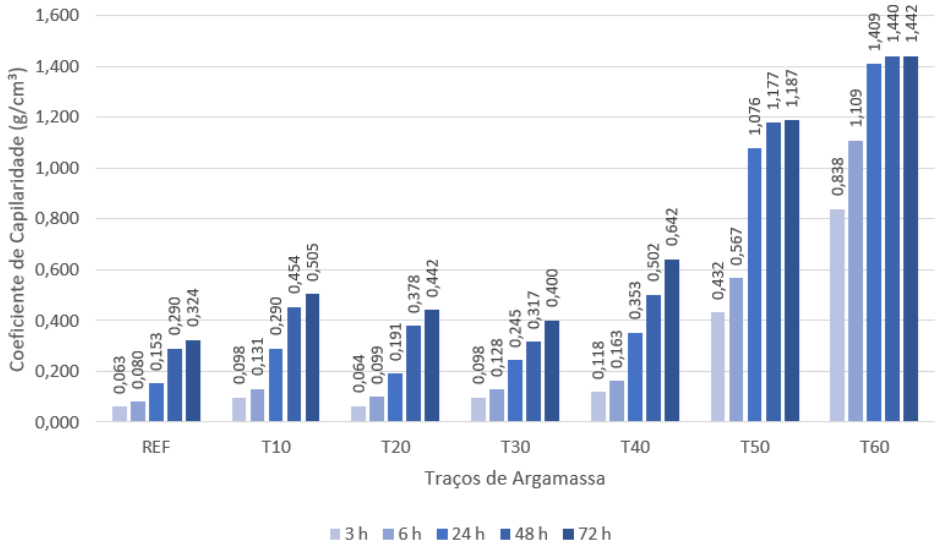
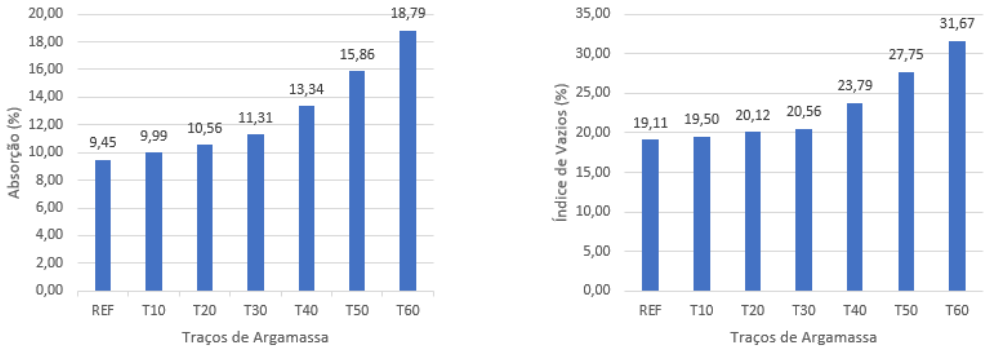


Figura 05: (a) Coeficiente de capilaridade, conforme a ABNT NBR 9779:2012
Fonte: BECKER, 2026



(a) (b)

Figura 06: (a) Absorção total. (b) Índice de vazios
Fonte: BECKER, 2026

Em consonância com esses resultados, verifica-se também um aumento de aproximadamente 65% no índice de vazios (Figura 06b), acompanhado da redução da massa específica das argamassas, resultando em um material mais leve. Tais alterações podem ser atribuídas à própria estrutura do lodo carbonático, caracterizada por elevada porosidade intrínseca, além de sua influência na organização da matriz, dificultando o empacotamento das partículas e a adequada compactação do material.

Em teores baixos de substituição, o desempenho se mantém satisfatório, sem indicação de grandes prejuízos para a durabilidade do compósito e mantendo resultados próximos ao traço de referência. A absorção capilar é um dos principais mecanismos de penetração de agentes agressivos no interior de matrizes cimentícias (CASCUDO, 1997). Portanto, os resultados indicam uma tendência de redução da durabilidade com o aumento do teor de lodo carbonático, uma vez que o maior índice de vazios e a elevação da absorção favorecem o ingresso de agentes agressivos e podem acelerar mecanismos de degradação, como penetração de cloretos, carbonatação, ataque ácido, lixiviação, dentre outros. O processo de carbonatação, por exemplo, pode ser favorecido pela combinação entre rede porosa e condições intermediárias de umidade (PARROTT, 1987).

As alterações microestruturais provocadas pela presença do resíduo se refletem na resistência de aderência à tração, levando à redução nos valores devido ao aumento da porosidade. A menor coesão interna existente leva também a uma menor ancoragem mecânica. O efeito se torna mais evidente em teores mais altos de substituição; em teores menores, o comportamento se mantém próximo da referência, à semelhança do que ocorre nos ensaios citados anteriormente. Esse comportamento é coerente com a literatura, que indica a tendência de redução das resistências mecânicas com a incorporação de lodo carbonático, sendo a aderência diretamente influenciada pelos mecanismos de ancoragem na interface argamassa-substrato (CARASEK, 1996).

Considerações finais

O reaproveitamento de lodo proveniente das fábricas de papel e celulose como substituição parcial do cimento em argamassas se mostrou viável quando em baixos teores. Os resultados de absorção, índice de vazios e massa específica estão em concordância com as tendências reportadas na literatura.

A incorporação do resíduo em até 30% possui o potencial de aprimorar o empacotamento das partículas (efeito fíler), sendo possível obter valores de absorção por capilaridade inferiores ao traço de referência.

A resistência de aderência à tração se comporta de maneira semelhante, com bons resultados em teores menores de incorporação. Acima desse valor, há comprometimento das propriedades relacionadas à durabilidade e aderência, devido ao aumento de sua porosidade. Um material mais poroso facilita o transporte de agentes deletérios para o interior de sua microestrutura, podendo levá-lo a se deteriorar precocemente.

A argamassa resultante deste estudo é indicada para uso em ambientes não expostos a agentes agressivos, preferencialmente ambientes internos. Além disso, a incorporação do lodo carbonático contribui para a valorização de resíduos industriais e para a redução do consumo de cimento, estando alinhada aos princípios da economia circular e à busca por materiais de construção mais sustentáveis.

Para estudos futuros, recomenda-se avaliação do efeito de diferentes condições de cura, combinação do lodo carbonático com outros materiais e investigação do teor ótimo de incorporação.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela agência brasileira de pesquisa: CAPES - Código Financeiro 001, CNPq - proc. 402704/2023-1 e 309102/2023-5. Os autores também agradecem à equipe do Laboratório de Materiais da Faculdade de Tecnologia da Unicamp, situada em Limeira-SP/Brasil.

Referências Bibliográficas

AGUIAR, F. L. T. Avaliação do sistema de aderência entre argamassas colantes no assentamento de piso sobre piso. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. 2020.

ALVES, P. A. Análise da resistência de aderência à tração em argamassas de revestimento: uma revisão da literatura. Cajazeiras: Instituto Federal da Paraíba, 2019.

ASLANI, F.; DEHESTANI, M. Probabilistic impacts of corrosion on structural failure and performance limits of reinforced concrete beams. Construction and Building Materials, v. 265, 120316, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120316

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M. T.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; PEDROTI, L. G. Recycling paper industry effluent sludge for use in cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.011

AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M. T.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; PEDROTI, L. G. Technological and environmental comparison of the processing of primary sludge waste from paper industry for mortar. *Journal of Cleaner Production,* v. 249, p. 119336, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119336

BECKER, A. R. Análise dos desempenhos e da durabilidade das argamassas com substituição do cimento Portland por lodo carbonático. Limeira: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. 2026.

BECKER, A. R. Estudo dos desempenhos físicos, mecânicos, da microestrutura de argamassas produzidas com substituição parcial do agregado miúdo por argila expandida. Limeira: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. 2021.

BECKER, A. R.; ALEIXO, A. S.; BETTINI, J.; LINTZ, R. C. C.; GACHET, L. A. (2025a). Impactos da substituição parcial do cimento por lodo carbonático na produção de compósitos cimentícios. In: ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO (DEGRADA), 6., 2025, Aveiro, Portugal. Anais. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2025.

BECKER, A. R.; ALEIXO, A. S.; LINTZ, R. C. C.; GACHET, L. A. (2025b). Uso do material residual da produção de papel como substituto parcial do cimento Portland na produção de argamassas. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE BETÕES ESPECIAIS, 2025.

BEDIAKO, M.; VALENTINI, L. Strength, carbon emissions, and sorptivity behavior of cement paste and mortar containing thermally activated clay. *Journal of Building Engineering*, v. 89, 109278, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109278

BENAMAR, S.; HOUMADI, Y.; SIAD, H.; CHERIF, R.; AÏT-MOKHTAR, A.; LACHEMI, M. Microstructure and durability of low-clinker carbonated mortars containing metakaolin and brick powder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 14, p. 710–733, 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/21650373.2025.2453556

BENINI, G. L.; FRÖHLICH, J.; BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.; MIRANDA, L. A. S.; MODOLO, R. C. E. Avaliação do potencial de valoração da lama de carbonato de cálcio como coproduto em diferentes setores. *O Papel*, v. 80, n. 10, p. 90–97, 2019.

CAMPOS, M. O. Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. 2014.

CAPMAS, A. Prólogo: concreto e o desenvolvimento sustentável. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (org.). Durabilidade do concreto. São Paulo: IBRACON, 2014.

CARASEK, H. Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2010.

CARASEK, H. Aderência de argamassas a base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. DOI:10.11606/T.3.1996.tde-25042025-072708.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (org.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 2, p. 922–969.

CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto. São Paulo: Pini, 1997.

FAUBERT, P.; BARNABÉ, S.; BOUCHARD, S.; CÔTÉ, R.; VILLENEUVE, C. Pulp and paper mill sludge management practices: what are the challenges to assess the impacts on greenhouse gas emissions? *Resources, Conservation and Recycling*, v. 108, p. 107–133, 2016.

GHIRARDI, G. C.; ALMEIDA, E. S.; CARDOSO, L. S. P. Avaliação do uso de resíduos da indústria de celulose e papel como agregados em produtos de matriz cimentícia. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY (SIINTEC), 2018.

GOMES, A. Estudo do comportamento de argamassas com resíduos de borracha. Limeira: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. 2020.

GUNAWAN, C.; FUNG, L. K.; NUL HAKIM, L.; WAHYUDI, E.; PRAMANA, A.; ZALFIATRI, Y. Paper mill sludge as a substitute material in paving blocks for a sustainable waste management approach. *Journal of Engineering Science and Technology Management*, v. 5, n. 2, p. 212–220, 2025. DOI: https://doi.org/10.31004/jestm.v5i2.269

KIRTHIKA, S. K.; GOEL, G.; SCOTT, J.; GOEL, S. Challenges and opportunities in tackling paper mill sludge waste. *Next Sustainability*, v. 6, 100174, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2025.100174

MANAWADU, A.; QIAO, P.; WEN, H. Characterization of substrate-to-overlay interface bond in concrete repairs: a review. *Construction and Building Materials*, v. 373, 130828, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130828

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2014.

NUNES LOPES, C. M.; MENDES, V. F.; GARCIA, D. R.; MENDES, J. C. Residues in cement-based composites: occurrence mapping in Brazil. *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, e01763, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01763

PARROTT, L. J. A review of carbonation in reinforced concrete. *Wexham Springs: Cement and Concrete Association*, 1987.

PERIASAMY, V.; GOVINDAN, A. Performance ability study on sludge contained hollow concrete blocks. *Revista Matéria*, v. 30, 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2025-0206.

QIN, J.; CUI, C.; CUI, X.; HUSSAIN, A.; YANG, C.; YANG, S. Recycling of lime mud and fly ash for fabrication of anorthite ceramic at low sintering temperature. *Ceramics International*, v. 41, n. 4, p. 5648–5655, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.149

RAO MEDA, S.; SHARMA, S. K.; TYAGI, G. D. Utilization of waste sludge as a construction material: a review. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 4195–4202, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.762

RODRIGUES, L. R.; FRANCISCO, M. A. C. O.; SAGRILLO, V. P. D.; LOUZADA, D. M.; ETRINGER, J. M. S. Caracterização de resíduos sólidos da indústria de celulose tipo Kraft visando sua aplicação em materiais cerâmicos. In: 22º CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2016. Natal: CBECiMat, 2016. p. 750–760.

TAO, Y.; LESAGE, K.; TITTELBOOM, K. N.; YUAN, Y.; SCHUTTER, G. Influence of substrate surface roughness and moisture content on tensile adhesion performance of 3D printable concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 126, 104350, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104350

TURNER, T.; WHEELER, R.; OLIVER, I. W. Evaluating land application of pulp and paper mill sludge: a review. *Journal of Environmental Management*, v. 317, 115439, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115439

VAZ, F. H. B.; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. *Cerâmica*, v. 65, p. 303-318, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653742508

YUVARAJ, K.; RAJESH, M.; KUMAR, V.; SINGH, A. Influence of paper mill sludge ash on mechanical, microstructural and durability properties of metakaolin-based geocrete. *Scientific Reports*, v. 16, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-026-37581-0

ZENG, Q.; LI, Y.; ZHANG, H.; WANG, X. Microstructure, durability and performance evaluation of ultra-high performance concrete incorporating supplementary materials. *Materials*, v. 19, n. 3, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/ma19030154

ZEWDIE, T.; ABERA, A.; TESFAYE, B.; MEKONNEN, T. Utilization of waste paper pulp ash as partial cement replacement in mortar. *Discover Civil Engineering*, v. 26, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s44290-025-00383-w

ZHANG, Z.; ANGST, U.; TROIAN, V.; GUO, B.; ZENG, Q. Durability performance of concrete incorporating carbonated recycled coarse aggregates: a review. *npj Materials Sustainability*, v. 3, 27, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s44296-025-00071-x.

ECOLOGIA INDUSTRIAL NO SEMIÁRIDO: POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA URINA HUMANA COM USO DE CINZAS DE BIOMASSA NA AGRICULTURA FAMILIAR

1 Katarine Cerqueira Venas, 2 Clailton Bastos Souza Junior, 3 Eduardo Cohim

1 Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: katarinekat9@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: clailtonjunior07@gmail.com; 3 Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: edcohim@gmail.com

Palavras-chave: Recuperação de Fósforo; Urina Humana; Semiárido Brasileiro.

Resumo

O fósforo é um nutriente insubstituível para a produção agrícola, mas seu uso permanece associado a um metabolismo linear, no qual reservas minerais finitas são extraídas, transformadas em fertilizantes, consumidas no campo e parcialmente descartadas nas cidades por meio de esgotos e resíduos. Este artigo avalia, em caráter exploratório, o potencial de recuperação de fósforo da urina humana com uso de cinzas de biomassa como reagente local, direcionando a discussão para a agricultura familiar do semiárido brasileiro. A metodologia consistiu em revisão bibliográfica e documental, organização de dados secundários sobre fluxos domiciliares de fósforo, agricultura familiar, acesso a insumos, características dos solos e composição de cinzas, além da construção de cenários de cálculo para população ocupada, número de estabelecimentos e área agrícola. Considerou-se uma residência com três moradores como unidade de cálculo dos autores e geração anual de 429 g de P na urina, equivalente a 143 g $P.hab^{-1}.ano^{-1}$, a partir de coeficientes de excreção e fluxos domiciliares reportados na literatura. Projetado para 3.654.553 pessoas ocupadas em 1.446.842 estabelecimentos familiares do semiárido, esse fluxo alcança aproximadamente 522,6 Mg $P.ano^{-1}$, ou 1.197,5 Mg $P_2O_5.ano^{-1}$, com capacidade teórica de atender entre 29,9 e 59,9 mil hectares por ano, conforme doses exploratórias de 40 e 20 kg $P_2O_5.ha^{-1}.ano^{-1}$ adotadas no estudo. Para as cinzas, estimou-se, como cenário dos autores, disponibilidade de 28,9 a 72,3 mil toneladas anuais, contendo entre 86,8 e 3.183,1 Mg $P.ano^{-1}$, conforme faixas de teor de fósforo discutidas na literatura sobre cinzas de biomassa. Os resultados indicam que, embora parte da carência de fertilidade se manifeste no campo, os nutrientes se concentram majoritariamente nas cidades, onde reside a maior parcela da população do semiárido. Por isso, a recuperação urbana e o retorno controlado ao meio rural constituem eixo estratégico para aproximar ODS 6 e ODS 2.

Introdução

O fósforo (P) é elemento essencial à produção agrícola e não possui substituto funcional nos processos biológicos associados ao crescimento vegetal, à transferência de energia e à formação de estruturas reprodutivas. A produção de fertilizantes fosfatados depende majoritariamente da rocha fosfática, recurso mineral não renovável, geograficamente concentrado e sujeito a pressões econômicas, ambientais e geopolíticas. Essa condição torna a segurança de fósforo um componente estratégico da segurança alimentar, especialmente em países com elevada demanda agrícola e dependência de fertilizantes importados (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009; CORDELL; WHITE, 2011; CHILDERS et al., 2011; ELSER; BENNETT, 2011).

A pressão sobre o fósforo também é econômica. A demanda agrícola global cresceu consistentemente, enquanto os preços registraram picos que revelam a vulnerabilidade das cadeias de suprimento e baixa resiliência diante de choques geopolíticos, energéticos e logísticos (BROWNLIE, 2022; BROWNLIE et al., 2023). Como as reservas de rocha fosfática são finitas, a reciclagem de nutrientes passa a ser medida complementar de segurança alimentar e não apenas prática de mitigação ambiental (FAOSTAT, 2024; IFA, 2023). Além da finitude, a mineração e beneficiamento fosfático mobilizam energia, contaminantes e emissões de gases de efeito estufa, enquanto o uso agrícola ineficiente pode ocasionar eutrofização de corpos hídricos (RETA et al., 2018; AMANN et al., 2018). Nesse contexto, é essencial reintegrar esse nutriente ao ciclo para mitigar passivos ambientais e promover a resiliência da agricultura, transformando o saneamento em um elo estratégico de suprimento sustentável.



Figura 1: Representação esquemática do ciclo de valorização da urina humana e reaproveitamento do fósforo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

No Brasil, a questão é agravada pela dependência de cadeias externas de suprimento. Essa vulnerabilidade é evidenciada pela dependência nacional de fertilizantes fosfatados importados, que supera 80% do total consumido, expondo o país a

oscilações de preço e instabilidade do mercado global (SAE, 2020). A literatura sobre fluxos nacionais de fósforo demonstra que o país combina elevada demanda por fertilizantes, baixa eficiência de uso em parte dos sistemas produtivos e perdas expressivas em resíduos e efluentes urbanos (SIPERT; COHIM, 2020; WITHERS et al., 2018; PAVINATO et al., 2020). Assim, a recuperação de fósforo em sistemas de saneamento torna-se um componente de resiliência agrícola.

A perspectiva da ecologia industrial permite compreender esse desafio como um rompimento metabólico entre campo e cidade. Nutrientes retirados do solo pelos alimentos são concentrados no ambiente urbano e, após o consumo, descartados no esgoto. O saneamento convencional frequentemente mantém a perda desses recursos para corpos d água ou aterros (BRUNNER, 2010; BRUNNER; RECHBERGER, 2016). Entre as correntes do esgoto doméstico, a urina humana apresenta relevância singular: embora represente menos de 1% do volume total do esgoto, concentra cerca de 80 a 90% do nitrogênio, 50 a 65% do fósforo e 50 a 80% do potássio eliminados pela população. Essa concentração torna a separação na fonte uma estratégia de alta eficiência para recuperação de nutrientes, pois reduz o volume a ser manejado e evita a diluição do fósforo no esgoto misto (MAURER; PRONK; LARSEN, 2006; FRIEDLER; BUTLER; ALFIYA, 2013; ROSE et al., 2015; UDERT et al., 2015; SIMHA; GANESAPILLAI, 2017).

A recuperação do fósforo proveniente da urina ocorre por diversas rotas tecnológicas, como precipitação e alcalinização, mas muitos métodos dependem de reagentes comerciais, como $MgCl_2$, controle operacional e infraestrutura que podem limitar a adoção em contextos rurais de baixa renda. Nesse cenário, cinzas de biomassa surgem como reagentes locais de interesse, pois possuem alcalinidade e minerais (cálcio, magnésio, potássio e fósforo) que favorecem a precipitação de fosfatos, aproximando a tecnologia lógica de aproveitamento territorial de resíduos (PITMAN, 2006; VASSILEV et al., 2013; VASSILEV, 2022).

No semiárido brasileiro, essa integração assume importância particular, com uma numerosa agricultura familiar, exposta a limitações de acesso a adubos, corretivos e fertilizantes. Ao mesmo tempo, a região apresenta solos heterogêneos, muitas vezes com baixa matéria orgânica, restrições de fertilidade e elevada sensibilidade ao manejo inadequado. A eficiência dos fertilizantes solúveis nessas áreas é frequentemente limitada pela presença de óxidos de ferro e alumínio, que promovem uma elevada fixação de fósforo no solo. Portanto, a recuperação de fósforo deve ser inserida em políticas de convivência com o semiárido, baseando-se em análise de solo e caracterização do produto (ARAÚJO FILHO et al., 2022; SILVA et al., 2020; CRUZ et al., 2022).

Nesse cenário, este artigo tem como objetivo avaliar o potencial de recuperação de fósforo da urina humana com uso de cinzas de biomassa como reagente local para a agricultura familiar do semiárido brasileiro. O foco recai sobre a estimativa de fósforo recuperável, a população das famílias agricultoras, o número e a área dos estabelecimentos familiares, o acesso a insumos, a disponibilidade estimada de cinzas e o papel dessa rota na articulação entre o metabolismo campo-cidade e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Metodologia

A presente pesquisa possui caráter exploratório e quantitativo, fundamentada em uma abordagem de ecologia industrial para avaliar a relação entre fluxos de resíduos urbanos e rurais. O estudo foca na integração da urina humana e cinzas de biomassa como estratégia de recuperação de fósforo para a agricultura familiar no semiárido brasileiro. O viés metodológico fundamenta-se na análise dos fluxos domiciliares de fósforo utilizando parâmetros técnicos de excreção e indicadores populacionais para a construção de modelos preditivos. Essa estrutura permitiu quantificar o potencial de recuperação territorial a partir da segregação de nutrientes na fonte, transformando o metabolismo doméstico em um elo do suprimento agrícola. As premissas técnicas, coeficientes de excreção e variáveis utilizadas para a fundamentação desses fluxos estão sintetizados na Tabela 1, com premissas exploratórias de 20 a 50 kg de cinza e doses de 20 e 40 kg $P_2O_5.ha^{-1}.ano^{-1}$.

Indicador	Valor adotado	Consideração de cálculo	Uso no artigo
Fósforo urinário por residência	429 g $P.ano^{-1}$	Residência com três moradores	Base para cálculo per capita
Fósforo urinário per capita	143 g $P.hab^{-1}.ano^{-1}$	429 g P dividido por três moradores	Projeção para população ocupada
Fósforo no esgoto sanitário	933 g $P.ano^{-1}$	Residência com três moradores	Comparação com a perda total no saneamento
Fósforo em resíduos orgânicos	246 g $P.ano^{-1}$	Residência com três moradores	Fluxo complementar de circularidade
Estabelecimentos familiares	1.446.842 unidades	Agricultura familiar do semiárido	Base de demanda e geração de cinzas
Área da agricultura familiar	21.844.922 ha	Estabelecimentos familiares do semiárido	Base para potencial por área
Pessoas ocupadas	3.654.553 pessoas	Agricultura familiar do semiárido	Base populacional conservadora
Cinza por estabelecimento	20 a 50 $kg.ano^{-1}$	Cenário exploratório	Disponibilidade potencial do reagente
Teor de P na cinza	0,3% a 4,4%	Faixa exploratória de composição	Estimativa do P mineral associado

Tabela 01: Dados e premissas utilizados na avaliação exploratória do potencial de recuperação de fósforo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em Rose et al. (2015), Vinnerås et al. (2006), Wendland (2008), Silva et al. (2020), Pitman (2006), Vassilev et al. (2013) e Vassilev (2022).

A caracterização dos fluxos domiciliares considerou a literatura sobre composição de excretas, águas residuárias e resíduos orgânicos biodegradáveis, adotando-se como unidade de análise uma residência rural com três moradores. A escolha da urina como fração prioritária justifica-se por concentrar a maior parcela do fósforo excretado e possuir baixo risco de contaminação por patógenos, o que simplifica os processos de estabilização microbiológica e higienização para o reuso (XU et al., 2022).

Os dados territoriais sobre o semiárido brasileiro foram extraídos de sistematização de Silva et al. (2020). O universo amostral engloba 1.446.842 estabelecimentos familiares, abrangendo uma área total de 21.844.922 ha. Para o cálculo do potencial de geração de urina, utilizou-se o contingente de 3.654.553 pessoas ocupadas nesses estabelecimentos, apresentando uma base de cálculo e vinculando a estimativa de nutrientes diretamente à agricultura familiar.

Já o uso das cinzas de biomassa foi integrado ao modelo como um reagente local capaz de promover a estabilização química e o aporte mineral complementar para a reação. Considerou-se geração anual de 20 a 50 kg de cinza por estabelecimento familiar como premissa de cálculo dos autores, resultando em uma faixa regional calculada a partir do número total de estabelecimentos familiares informado por Silva et al. (2020). Para o fósforo contido nas cinzas, foram adotados teores de 0,3%, 1,7% e 4,4% de P, representando cenários inferior, intermediário e superior de composição com base em faixas reportadas para cinzas de biomassa (PITMAN, 2006; VASSILEV et al., 2013; VASSILEV, 2022).

A análise de solo foi considerada condição metodológica indispensável. Como o semiárido apresenta solos muito distintos quanto a textura, profundidade, pH, salinidade, teor de matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes, a aplicação de qualquer produto derivado de urina e cinza deve ser precedida por diagnóstico químico do solo e por caracterização do material produzido (ARAÚJO FILHO et al., 2022; SYERS; JOHNSTON; CURTIN, 2008). Essa consideração foi incorporada à discussão para evitar que a proposta seja tratada como aplicação padronizada de resíduo.

Por fim, os resultados foram discutidos à luz da ecologia industrial e dos ODS 2 e 6. A relação com o ODS 6 foi estabelecida pela capacidade de transformar o saneamento em sistema de recuperação de recursos, reduzindo o descarte de nutrientes em corpos hídricos. A relação com o ODS 2 foi estabelecida pelo potencial de gerar fertilizante local, fortalecer a agricultura familiar e reduzir dependência de insumos externos. A relação campo-cidade foi analisada como eixo territorial de circulação de nutrientes entre consumo urbano e produção rural.

Resultados e Discussão

Os resultados devem ser interpretados a partir da casa de farinha como unidade metabólica rural. Nesse espaço, a produção agrícola da mandioca se articula ao beneficiamento, ao consumo de lenha, à geração de resíduos sólidos e líquidos e à formação de cinzas no processo de torração. Assim, a casa de farinha deixa de ser compreendida apenas como unidade de produção de farinha e passa a ser analisada como ponto de concentração e recuperação de recursos no território da agricultura familiar.

Estudos sobre casas de farinha mostram que o beneficiamento da mandioca gera resíduos em quantidade expressiva, incluindo cascas com cepas, crueira, efluente do lavador-descascador, manipueira, material particulado e cinzas. Em uma unidade mecanizada na Paraíba, Araújo et al. (2014) estimaram 77,9 kg.t^{-1} de cascas com cepas, 15,9 kg.t^{-1} de crueira, 344,3 L.t^{-1} de efluente do lavador e 279,1 L.t^{-1} de manipueira. Embora as cinzas não tenham sido quantificadas nesse estudo, os autores destacam que, por serem ricas em minerais, podem ser utilizadas na adubação ou incorporadas aos demais resíduos do processo para formação de composto mais eficaz.

A centralidade da casa de farinha também se justifica pelo papel da lenha na cadeia da mandioca. A produção de farinha depende de energia térmica para escaldamento e torração, e a Embrapa adota, em suas estimativas, rendimento médio de 25% na conversão de raízes em farinha e consumo médio de 2,4 m³ st de lenha por tonelada de farinha produzida (ALVES; MODESTO JÚNIOR, 2017). Esse dado reforça que a cinza é um subproduto diretamente associado ao processamento da mandioca e, portanto, um recurso potencialmente disponível no próprio ambiente rural.

Embora a fração urinária permaneça como referência de comparação para a recuperação de fósforo no estudo, a discussão passa a destacar a casa de farinha como o ponto de articulação entre geração de cinzas, aproveitamento mineral e aplicação agrícola. A Tabela 02 apresenta o potencial estimado da fração urinária associada à população ocupada na agricultura familiar, demonstrando que fluxos de nutrientes recuperáveis podem atender usos seletivos, especialmente quando direcionados a pequenas áreas produtivas.

Indicador	Resultado estimado	Base de cálculo	Interpretação
Potencial regional de P urinário	522,6 Mg P.ano^{-1}	143 g P.hab^{-1}.ano^{-1} x 3.654.553 pessoas	Fluxo recuperável associado à população ocupada
Equivalente em P_2O_5	1.197,5 Mg P_2O_5.ano^{-1}	P_2O_5 = P/0,4364	Unidade usual de fertilizantes fosfatados
Área atendida com 20 kg P_2O_5.ha^{-1}	59,9 mil ha.ano^{-1}	1.197,5 Mg P_2O_5 dividido por 20 kg.ha^{-1}	0,27% da área da agricultura familiar
Área atendida com 40 kg P_2O_5.ha^{-1}	29,9 mil ha.ano^{-1}	1.197,5 Mg P_2O_5 dividido por 40 kg.ha^{-1}	0,14% da área da agricultura familiar
Unidades atendidas em 1 ha	29,9 a 59,9 mil estabelecimentos.ano^{-1}	Um hectare por estabelecimento	2,1% a 4,1% dos estabelecimentos familiares
Potencial médio por estabelecimento	361 g P.ano^{-1}	143 g P.hab^{-1}.ano^{-1} x 2,5 pessoas	Uso localizado e complementar

Tabela 02: Potencial de recuperação de fósforo urinário na agricultura familiar do semiárido.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em Rose et al. (2015), Vinnerås et al. (2006), Wendland (2008) e Silva et al. (2020).
Obs: Doses de 20 e 40 kg P_2O_5.ha^{-1}.ano^{-1} referem-se a cenários exploratórios.

A leitura dos dados da Tabela 02 evidencia que a recuperação de nutrientes possui maior coerência como solução territorial seletiva, e não como reposição universal de fertilizantes minerais. Ao assumir aplicação em 1 ha por unidade produtiva, o potencial urinário atenderia de 29,9 mil a 59,9 mil estabelecimentos por ano, equivalentes a cerca de 2,1% a 4,1% dos estabelecimentos familiares do semiárido. Essa escala reforça a importância de direcionar o uso para hortas, quintais produtivos, viveiros de mudas, áreas de autoconsumo e unidades demonstrativas, onde pequenas doses podem gerar maior retorno social (SILVA et al., 2020).

Nas casas de farinha, entretanto, a cinza de biomassa assume o papel central da rota. A primeira dimensão é mineral, pois a cinza pode conter fósforo, potássio, cálcio e magnésio. A segunda é química, pois sua alcalinidade pode contribuir para a correção parcial da acidez do solo e para a disponibilidade de nutrientes, desde que respeitados critérios técnicos de aplicação. A terceira é territorial, pois a cinza é gerada no próprio espaço rural, durante a queima da lenha utilizada na torração da farinha, aproximando geração, manejo e uso agrícola do recurso (PITMAN, 2006; VASSILEV et al., 2013; VASSILEV, 2022).

Considerando a casa de farinha como unidade geradora de cinzas e adotando-se 20 a 50 kg de cinza por estabelecimento familiar por ano como cenário exploratório dos autores, a disponibilidade regional estimada varia de 28,9 a 72,3 mil toneladas anuais, calculada a partir dos 1.446.842 estabelecimentos familiares do semiárido (SILVA et al., 2020). Com teor mínimo de 0,3% de P, essa massa conteria de 86,8 a 217,0 Mg P.ano^{-1}. No teor intermediário de 1,7%, conteria de 491,9 a 1.229,8 Mg P.ano^{-1}. No cenário superior de 4,4%, a faixa alcançaria de 1.273,2 a 3.183,1 Mg P.ano^{-1}. Os teores adotados devem ser interpretados como faixas exploratórias, dependentes da origem da biomassa, temperatura de combustão, solubilidade, granulometria e presença de contaminantes.

Cenário	Massa de cinza	Teor de P	P contido	Equivalente em P_2O_5
Inferior	28,9 mil t.ano^{-1}	0,3% de P	86,8 Mg P.ano^{-1}	198,9 Mg P_2O_5.ano^{-1}
Intermediário inferior	28,9 mil t.ano^{-1}	1,7% de P	491,9 Mg P.ano^{-1}	1.127,2 Mg P_2O_5.ano^{-1}
Intermediário superior	72,3 mil t.ano^{-1}	1,7% de P	1.229,8 Mg P.ano^{-1}	2.818,1 Mg P_2O_5.ano^{-1}
Superior	72,3 mil t.ano^{-1}	4,4% de P	3.183,1 Mg P.ano^{-1}	7.293,9 Mg P_2O_5.ano^{-1}

Tabela 03: Estimativa de cinzas disponíveis e de fósforo contido nas cinzas de biomassa.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em Silva et al. (2020), Pitman (2006), Vassilev et al. (2013) e Vassilev (2022).
Obs: Geração de 20 a 50 kg de cinza por estabelecimento corresponde a premissa exploratória dos autores.

A conversão do fósforo contido nas cinzas para P_2O_5 permite estimar a área que poderia ser potencialmente suprida pela recuperação desse recurso nas casas de farinha. Ao adotar doses exploratórias de 20 e 40 kg P_2O_5.ha^{-1}.ano^{-1}, observa-se que a área atendida varia conforme a massa de cinza disponível e o teor de fósforo considerado. No cenário inferior, o potencial atenderia aproximadamente 9,9 mil ha.ano^{-1} com dose de 20 kg P_2O_5.ha^{-1} e 5,0 mil ha.ano^{-1} com dose de 40 kg P_2O_5.ha^{-1}. No cenário superior, a área potencialmente suprida poderia chegar a 364,7 mil ha.ano^{-1} e 182,3 mil ha.ano^{-1}, respectivamente.

Cenário	Equivalente em P_2O_5	Área com 20 kg P_2O_5.ha^{-1}	Área com 40 kg P_2O_5.ha^{-1}	% da área familiar
Inferior	198,9 Mg P_2O_5.ano^{-1}	9,9 mil ha.ano^{-1}	5,0 mil ha.ano^{-1}	0,05% e 0,02%
Intermediário inferior	1.127,2 Mg P_2O_5.ano^{-1}	56,4 mil ha.ano^{-1}	28,2 mil ha.ano^{-1}	0,26% e 0,13%
Intermediário superior	2.818,1 Mg P_2O_5.ano^{-1}	140,9 mil ha.ano^{-1}	70,5 mil ha.ano^{-1}	0,65% e 0,32%
Superior	7.293,9 Mg P_2O_5.ano^{-1}	364,7 mil ha.ano^{-1}	182,3 mil ha.ano^{-1}	1,67% e 0,83%

Tabela 04: Área potencialmente suprida pela recuperação de fósforo das cinzas geradas em casas de farinha.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em Silva et al. (2020), Pitman (2006), Vassilev et al. (2013) e Vassilev (2022).
Obs: Doses de 20 e 40 kg P_2O_5.ha^{-1}.ano^{-1} referem-se a cenários exploratórios.

Esses valores indicam que a recuperação de fósforo das cinzas de casas de farinha não deve ser compreendida como solução homogênea para toda a área da agricultura familiar do semiárido. Em relação aos 21.844.922 ha ocupados pela agricultura familiar, a área potencialmente suprida varia de aproximadamente 0,02% a 1,67%, conforme o cenário e a dose adotada. Embora esse percentual seja limitado em escala regional, ele pode ser significativo quando direcionado a pequenas superfícies produtivas de maior retorno social, como hortas familiares, quintais produtivos, viveiros de mudas, cultivos alimentares de autoconsumo e áreas demonstrativas.

O uso da cinza gerada nas casas de farinha apresenta vantagem econômica potencial quando comparado à aquisição de insumos minerais externos, especialmente em sistemas de agricultura familiar de baixa renda. Como a cinza já é formada no processo de torração da farinha, sua recuperação pode reduzir custos de manejo de resíduos e gerar material com potencial de aplicação agrícola. Essa vantagem, contudo, depende de controle de origem e qualidade mínima. Cinzas provenientes de madeira tratada, resíduos pintados, plásticos, lixo doméstico ou combustíveis mistos não devem ser utilizadas, pois podem introduzir contaminantes no solo (PITMAN, 2006; VASSILEV et al., 2013).

Do ponto de vista agronômico, a eficiência das cinzas recuperadas nas casas de farinha deve ser analisada frente à dinâmica de disponibilidade de fósforo nos solos do semiárido. A presença de óxidos de ferro e alumínio pode imobilizar parte do fósforo aplicado, reduzindo sua disponibilidade para as plantas. Por outro lado, o fósforo presente nas cinzas pode estar associado a formas minerais de cálcio e magnésio, com comportamento distinto dos fertilizantes fosfatados altamente solúveis. Essa hipótese exige ensaios laboratoriais e de campo, envolvendo solubilidade, pH, salinidade, dose, granulometria, resposta das culturas e monitoramento do solo.

A relação territorial mais relevante, neste caso, é o circuito campo-casa de farinha-campo. A mandioca é produzida no meio rural, conduzida às casas de farinha, processada com uso de energia térmica proveniente da queima de biomassa e retorna

ao território na forma de alimento, renda e resíduos. Quando as cinzas são descartadas sem controle, parte do potencial mineral desse fluxo é perdida. Quando são recuperadas, caracterizadas e aplicadas com critério agronômico, podem contribuir para recompor parte da fertilidade retirada do solo pela produção agrícola.

Essa abordagem permite aproximar a recuperação de recursos nas casas de farinha dos ODS 2, 6 e 12. A conexão com o ODS 2 ocorre pela possibilidade de produzir um insumo mineral local, ainda que parcial, capaz de fortalecer sistemas alimentares da agricultura familiar. A relação com o ODS 6 aparece na redução de descartes sem controle e de riscos de contaminação ambiental. Já o ODS 12 é incorporado pela lógica de produção e consumo responsáveis, na qual resíduos do beneficiamento da mandioca deixam de ser tratados apenas como passivo e passam a ser avaliados como recursos produtivos (ONU, 2015; SILVA et al., 2020).

A principal limitação desta avaliação está na natureza exploratória dos cálculos. Foram usadas faixas e premissas para estimar disponibilidade de cinzas, teor de fósforo e área potencialmente suprida, mas a recuperação real dependerá da quantidade efetiva de cinza gerada em cada casa de farinha, do tipo de lenha utilizada, da temperatura e do estágio de queima, da presença de contaminantes, das perdas no armazenamento, das condições dos solos e da assistência técnica disponível. Por esse motivo, os resultados devem ser lidos como base de priorização para estudos de campo, e não como previsão direta de produção anual de fertilizante comercial.

Dessa forma, a recuperação de fósforo a partir das cinzas geradas em casas de farinha apresenta coerência técnica e territorial para a agricultura familiar do semiárido. Ainda que não seja capaz de suprir toda a área agrícola de forma homogênea, a rota demonstra potencial para atender áreas estratégicas, fortalecer quintais produtivos, hortas e cultivos de autoconsumo, reduzir parcialmente a dependência de fertilizantes externos e transformar resíduos do beneficiamento da mandioca em recursos produtivos.

Considerações Finais

A avaliação exploratória indica que a recuperação de fósforo da urina humana com uso de cinzas de biomassa apresenta potencial técnico e territorial para a agricultura familiar do semiárido brasileiro. A urina se destaca por concentrar fósforo em pequeno volume, enquanto a cinza pode atuar como reagente alcalinizante, fonte mineral complementar e agente de estabilização. A integração desses fluxos expressa uma estratégia de ecologia industrial, na qual resíduos urbanos e rurais passam a ser tratados como insumos para recomposição parcial da fertilidade agrícola.

Os cálculos apontam que a população ocupada na agricultura familiar poderia gerar aproximadamente 522,6 Mg P.ano^{-1} na urina, equivalentes a 1.197,5 Mg P_2O_5.ano^{-1}, a partir dos coeficientes de excreção adotados e da população ocupada informada para a agricultura familiar do semiárido (ROSE et al., 2015; VINNERÅS et al., 2006; WENDLAND, 2008; SILVA et al., 2020). Esse potencial poderia atender de 29,9 a 59,9 mil hectares por ano, ou de 2,1% a 4,1% dos estabelecimentos familiares caso a aplicação fosse concentrada em 1 ha por unidade, conforme doses exploratórias de 20 e 40 kg P_2O_5.ha^{-1}.ano^{-1} adotadas no estudo. As cinzas, por sua vez, poderiam representar de 28,9 a 72,3 mil toneladas anuais, contendo de 86,8 a 3.183,1 Mg P.ano^{-1}, em cenários calculados com base no número de estabelecimentos familiares e em faixas de composição de cinzas de biomassa (SILVA et al., 2020; PITMAN, 2006; VASSILEV et al., 2013; VASSILEV, 2022). Esses valores reforçam que a rota possui relevância estratégica, mas deve ser interpretada como solução complementar, seletiva e territorializada.

A principal condição para uso seguro é a análise integrada de solo, cinza e produto final. A aplicação sem diagnóstico pode gerar problemas de salinidade, alcalinização excessiva, desequilíbrio nutricional ou introdução de contaminantes. Assim, a proposta depende de caracterização química, controle sanitário, definição de doses, assistência técnica e monitoramento agronômico. Como perspectiva, recomenda-se realizar ensaios laboratoriais com cinzas representativas do semiárido, avaliar eficiência de precipitação, retenção de nitrogênio, estabilidade microbiológica, disponibilidade de fósforo e desempenho em culturas de interesse da agricultura familiar.

A rota analisada contribui para aproximar saneamento e produção de alimentos, articulando ODS 6 e ODS 2 (ONU, 2015). Em vez de tratar o esgoto apenas como passivo a ser afastado, propõe-se reconhecer a urina como mina urbana de nutrientes e a cinza como reagente de baixo custo. A análise campo-cidade reforça essa necessidade: no semiárido, a população urbana representa cerca de 62% dos habitantes e, por isso, concentra maior massa de nutrientes no esgoto do que o meio rural, justamente enquanto a agricultura familiar enfrenta limitações de acesso a insumos e fertilidade (INSA, 2024; SILVA et al., 2020). Essa mudança fortalece a relação campo-cidade e pode apoiar formas descentralizadas de produção de fertilizantes, com potencial de reduzir vulnerabilidades locais, ampliar a autonomia dos agricultores e promover uma gestão mais circular dos recursos no semiárido.

Referências Bibliográficas

ALVES, R. N. B.; MODESTO JÚNIOR, M. S. Demanda de lenha para torragem de farinha de mandioca nos biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. (Documentos, 428).

AMANN, A. et al. Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater. Resources, Conservation and Recycling, p. 127-139, 2018.

ARAÚJO, N. C. et al. Quantificação da geração de resíduos em uma casa de farinha no Estado da Paraíba. Revista Monografias Ambientais, v. 13, n. 5, p. 3793-3799, 2014. DOI: 10.5902/2236130814984.

ARAÚJO FILHO, J. C. et al. Solos do Semiárido: características e estoque de carbono. In: MEDEIROS, S. S. et al. Recursos naturais do Semiárido. Campina Grande: INSA, 2022.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE). Produção nacional de fertilizantes: estudo estratégico. Brasília: SAE, 2020.

BROWNLIE, W. J. Phosphate rock: resources, reserves and uses. In: Our Phosphorus Future. p. 23-76, 2022.

BROWNLIE, W. J. et al. Phosphorus price spikes: a wake-up call for phosphorus resilience. Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 7, 2023.

BRUNNER, P. H. Substance flow analysis as a decision support tool for phosphorus management. Journal of Industrial Ecology, v. 14, n. 6, p. 870-873, 2010.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Practical handbook of material flow analysis. Boca Raton: CRC Press, 2016.

CHILDERS, D. L. et al. Sustainability challenges of phosphorus and food: solutions from closing the human phosphorus cycle. BioScience, v. 61, n. 2, p. 117-124, 2011.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. Global Environmental Change, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009.

CORDELL, D.; WHITE, S. Peak phosphorus: clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. Sustainability, v. 3, n. 10, p. 2027-2049, 2011.

CRUZ, Y. R. et al. Phosphorus sorption potential of natural adsorbent materials from a Brazil semiarid region to control eutrophication. Acta Limnologica Brasiliensia, v. 34, e12, 2022.

ELSER, J.; BENNETT, E. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. Nature, v. 478, n. 7367, p. 29-31, 2011.

FAOSTAT. Fertilizers by nutrient. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/. Acesso em: 10 jun. 2025.

FRANÇOIS, M.; SILVA, E. H. B. C.; ORRICO, S. R. M.; SANTOS, M. A. F. Percepção do uso de urina entre agricultores familiares de Serrinha-BA. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA), v. 7, n. 2, p. 225-237, 2019.

FRIEDLER, E.; BUTLER, D.; ALFIYA, Y. Source separation and decentralization for wastewater management. Reino Unido: IWA Publishing, 2013.

IFA. Phosphate rock resources and reserves. Paris: International Fertilizer Association, 2023.

INSA. O Semiárido Brasileiro. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro. Acesso em: 26 abr. 2026.

MAURER, M.; PRONK, W.; LARSEN, T. A. Treatment processes for source-separated urine. Water Research, v. 40, n. 17, p. 3151-3166, 2006.

ONU. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Nova York: Organização das Nações Unidas, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 26 abr. 2026.

PAVINATO, P. S. et al. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. Scientific Reports, v. 10, n. 1, 2020.

PITMAN, R. M. Wood ash use in forestry: a review of the environmental impacts. Forestry, v. 79, n. 5, p. 563-588, 2006.

RETA, G. et al. Environmental impact of phosphate mining and beneficiation: review. International Journal of Hydrology, v. 2, n. 4, 2018.

ROSE, C. et al. The characterisation of faeces and urine: a review of the literature to inform advanced treatment technology. Environmental Science and Technology, 2015.

SILVA, R. M. A. et al. Características produtivas e socioambientais da agricultura familiar no Semiárido brasileiro: evidências a partir do Censo Agropecuário de 2017. Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 55, p. 314-338, 2020.

SIMHA, P.; GANESAPILLAI, M. Ecological sanitation and nutrient recovery from human urine: how far have we come? Sustainable Environment Research, v. 27, n. 3, p. 107-116, 2017.

SIPERT, S.; COHIM, E. B. A phosphorus flow analysis of Brazil. Environmental Engineering Science, v. 37, n. 2, p. 148-163, 2020.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

UDERT, K. M. et al. Technologies for the treatment of source-separated urine in the eThekwini Municipality. Water SA, v. 41, n. 2, p. 212-221, 2015.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1: phase-mineral and chemical composition and classification. Fuel, v. 105, p. 40-76, 2013.

VASSILEV, S. V. Biomass ash as a new potential resource of phosphorus. Review of the Bulgarian Geological Society, v. 83, n. 3, p. 171-174, 2022.

VINNERÅS, B. et al. The characteristics of household wastewater and biodegradable solid waste: a proposal for new Swedish design values. Urban Water Journal, v. 3, n. 1, p. 3-11, 2006.

WENDLAND, C. Anaerobic digestion of blackwater and kitchen refuse. Hamburg: Technischen Universität Hamburg, 2008.

WITHERS, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. Scientific Reports, v. 8, n. 1, 2018.

XU, K. et al. Pathogens inactivation in nutrient recovery from urine: A review. Frontiers in Environmental Science, v. 10, 1056019, 2022.

ZHANG, Y. et al. A critical review of methods for analyzing freshwater eutrophication. Water, v. 13, n. 2, 2021.

USO DE LODO DE ESGOTO COMO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E COMPARATIVA

1 Rita Carolina Spinola Macedo da Silva, 2 Hercules da Silva Carvalho, 3 Willian Rodrigues dos Santos, 4 Éder Pinho Magalhães, 5 Rosilda Mara Mussury, 6 Emerson Machado de Carvalho

1 Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), e-mail: rita.carolina@ymail.com; 2 Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), e-mail: hercules.carvalho@cja.ufsb.edu.br; 3 Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), e-mail: rdgsswill@gmail.com; 4:Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), e- mail: ederufsb@gmail.com; 5 Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), e-mail: maramussury@ufgd.edu.br; Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), e-mail: emerson.carvalho@ufsb.edu.br

Palavras-chave: Sewage sludge; Brick; Waste.

Resumo

A crescente geração de lodo de esgoto tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis para sua destinação, destacando-se sua aplicação na produção de tijolos para a construção civil. Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e ambiental desse uso por meio de uma revisão bibliográfica com análise bibliométrica. A pesquisa, conduzida nas bases Web of Science e Scopus, resultou na seleção de 19 artigos. A análise dos estudos evidenciou um aumento significativo das publicações em 2024, bem como a predominância da China tanto em número de trabalhos quanto em redes de colaboração científica. A partir da análise comparativa dos artigos, observou-se que diversos estudos apontam que o lodo de esgoto apresenta composição química semelhante às matérias-primas cerâmicas tradicionais, com presença recorrente de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3, favorecendo sua aplicação na produção de tijolos. Da mesma forma, diferentes pesquisas indicam viabilidade ambiental, com resultados de ensaios de lixiviação demonstrando a imobilização de contaminantes na matriz cerâmica. Também foram identificados, em múltiplos estudos, benefícios operacionais associados à incorporação do lodo, como a redução do consumo energético durante a queima e a diminuição do peso dos materiais produzidos.Em relação ao desempenho mecânico, a análise dos artigos revelou que os melhores resultados são frequentemente observados para teores de incorporação entre 5% e 20%, embora alguns estudos tenham reportado desempenho satisfatório com valores de até 40%. Por fim, verificou-se que a maior parte da literatura concentra-se em tijolos cerâmicos queimados, evidenciando uma lacuna quanto ao desenvolvimento de tecnologias sem queima, como tijolos geopoliméricos e de solo-cimento, indicando a necessidade de novas investigações nesta área.

Introdução

Grandes quantidades de resíduos são geradas diariamente por meio de uma infinidade de processos de fabricação em vários setores industriais, mineradores, sanitários, de construção e agrícolas (Moulato *et al*., 2023). O Instituto Trata Brasil (2024) estimou que cerca de 60% das moradias urbanas brasileiras estejam vinculadas à rede de esgoto sanitário, o que corresponde a aproximadamente 118 milhões de residências. Cerca de 40% deste esgoto gerado ainda não recebe qualquer tipo de tratamento antes de ser lançado nos corpos hídricos. Segundo Rorat *et al*. (2019), a falta de tratamento de efluentes constitui uma séria ameaça ao meio ambiente, ao clima e à saúde humana, mas também pode ser considerada um desperdício de recursos.

Grandes quantidades de resíduos são geradas diariamente por meio de uma infinidade de processos de fabricação. Restrições ao descarte de lodo de esgoto em terras agrícolas e não agrícolas, bem como ao descarte em aterros sanitários, tornam a questão da gestão do lodo de esgoto extremamente complexa tanto em nível global quanto nacional (Bittencourt *et al*., 2016; Bubalo *et al*., 2023; Moulato *et al*., 2023). Mesmo nas localidades em que há tratamento de efluentes, permanece o desafio relacionado ao gerenciamento do resíduo sólido gerado nesse processo, denominado lodo de esgoto. Também chamado de lodo ativado ou biossólido, este resíduo caracteriza-se como um material semissólido rico em matéria orgânica, nutrientes, sólidos inorgânicos e microrganismos, necessitando de processos de estabilização e higienização, como calagem e compostagem, para sua destinação segura (Rorat *et al*., 2019).

Apesar das diferentes possibilidades de aproveitamento, em muitos casos o lodo ainda é apenas armazenado temporariamente nas próprias estações de tratamento. O potencial de reutilização e reciclagem de lodo de esgoto depende da qualidade do material (Bubalo *et al*., 2023). De acordo com os autores, o esgoto varia, desde sua origem, o tipo de processo de tratamento, e os rejeitos tratados.

No Brasil, o reaproveitamento do lodo de esgoto tratado vem sendo progressivamente explorado, entre outros, como alternativa na construção civil (Gonçalves; Mol, 2021), sendo incorporada nos princípios da economia circular, promovendo a valorização de subprodutos e a reinserção de materiais residuais em cadeias produtivas (Chang *et al*., 2020). Entre as alternativas estudadas, destaca-se a utilização do lodo de esgoto na produção de tijolos, em razão da compatibilidade de sua composição química com matérias-primas tradicionalmente utilizadas na indústria cerâmica, bem como de sua capacidade de contribuir para propriedades como redução de densidade e consumo energético durante o processo produtivo. Diante disso, torna-se relevante investigar o potencial técnico e ambiental da aplicação do lodo de esgoto na fabricação de tijolos para a construção civil.

Material e Métodos

Tipo da pesquisa

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica, de tipo descritivo, com análise bibliométrica. O objetivo proposto é o de identificar padrões, tendências e interrelações das pesquisas realizadas sobre o do uso de lodo ativado proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) na produção de tijolos para a construção civil e produtos similares, aferindo, por meio da análise destes trabalhos, a viabilidade técnica do uso deste recurso.

Procedimentos metodológicos para a coleta de dados

Esta revisão foi conduzida e relatada de acordo com as diretrizes do PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) (Page *et al*., 2021). A estratégia de busca foi definida a partir de descritores controlados do Art & Architecture Thesaurus (AAT), complementados por termos livres amplamente utilizados na literatura, incluindo “brick”, “ceramic”, “wastewater sludge”, “sewage sludge”, “biosolids”, “construction” e “building material”, combinados por operadores booleanos (AND/OR).

As buscas foram realizadas nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, considerando artigos publicados nos idiomas inglês e português dos últimos cinco anos. Como critérios de inclusão foram selecionados os estudos que abordassem a utilização de lodo de ETE na produção de tijolos ou materiais similares aplicados à construção civil, sendo excluídos trabalhos duplicados, estudos sem relação direta com o tema e aqueles sem acesso ao texto completo. A seleção dos estudos foi realizada com o auxílio do software Rayyan (Ouzzani *et al*., 2016) e foi compreendida em quatro etapas: exclusão dos trabalhos duplicados, leitura dos títulos, análise dos resumos e leitura integral dos textos.

Processamento dos dados coletados

Ao final das leituras os artigos selecionados pelos critérios de inclusão e exclusão foram analisados qualitativamente utilizando o pacote Bibliometrix (Aria; Cuccurullo, 2017) no ambiente R, por meio do mapeamento e identificação de padrões, tendências, autores e instituições influentes, como demonstrado na (Figura 1.). Concomitantemente, os artigos foram comparados entre si em relação às suas principais conclusões, trazendo à luz considerações relevantes sobre a questão estudada.

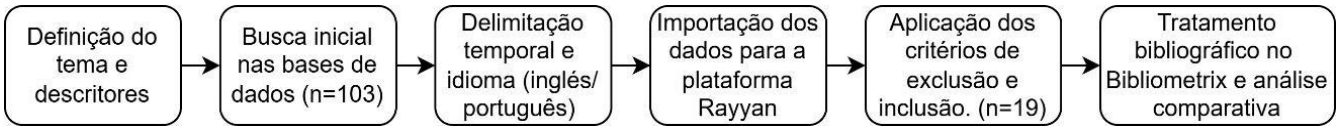


Figura 1: Fluxograma das etapas metodológicas
Fonte: Autores (2026)

Resultados e Discussão

Análise bibliográfica

A busca inicial nas bases de dados com a delimitação temporal e idiomática resultou em 103 artigos científicos. Após a remoção de duplicatas, a triagem por leitura de títulos, leitura dos resumos, e leitura completa dos artigos, foram selecionados 19 estudos para compor a revisão. Durante o período de cinco anos, sendo 2026 incompleto (2022 a 2026), a maior concentração de publicações foi observada para o ano de 2024 com 9 artigos, que apresentou aproximadamente o dobro de estudos em relação aos anos de 2023 e 2025 (4 artigos cada).

A rede de ocorrência de palavras-chave, apresentada na Figura 2, permitiu identificar quatro principais eixos temáticos na literatura: (i) desempenho técnico e propriedades mecânicas dos materiais, (ii) aplicação do lodo como material de construção, (iii) caracterização mineralógica e química dos materiais e (iv) valorização ambiental do resíduo. Nesta análise observa-se predominância de estudos voltados ao desempenho mecânico e aos parâmetros de processamento cerâmico, como temperatura de queima e resistência à compressão. Em contrapartida, os temas relacionados à economia circular e valorização ambiental apresentam menor centralidade, indicando que, embora reconhecido, esse aspecto ainda é menos explorado na literatura.

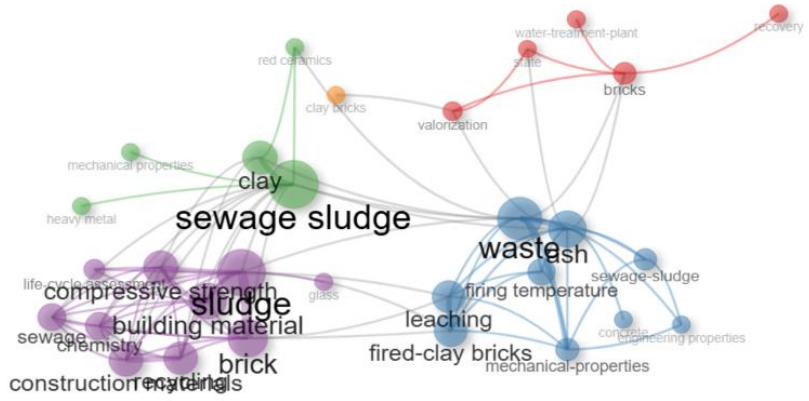
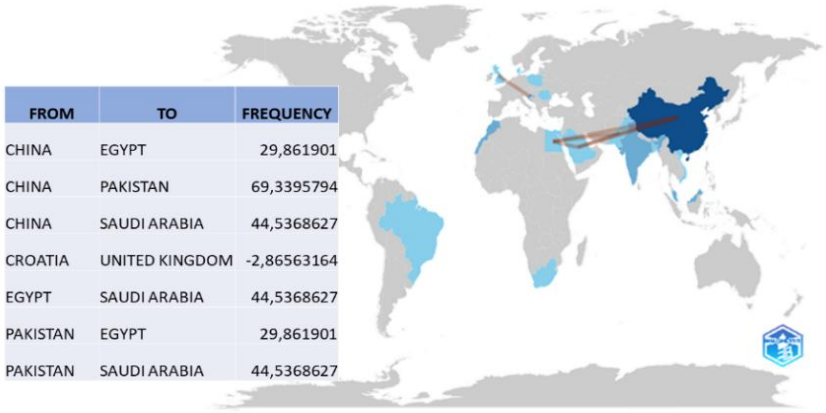


Figura 2: Rede de ocorrência de palavras
Fonte: Autores (2026)

Em relação à distribuição geográfica, os países com maior número de publicações foram: China (4), seguido da Índia (2), Malásia (2) e Croácia (2). Dentre os países mais citados destacam-se China (50), Croácia (25), Paquistão (24), Malásia (20), seguidos por países com menos de 10 citações, como Índia (9), Marrocos (7), Vietnã (6), Brasil (3), África do Sul (2) e Romênia (1). Segundo o estudo de Hyland (2023), uma das mudanças mais drásticas na publicação global na última década foi a ascensão da China, que supera os Estados Unidos e a União Europeia em pesquisa e publica mais artigos científicos a cada ano do que qualquer outra nação do mundo. O estudo explora a ascensão da produção acadêmica chinesa, sua influência na publicação global e nos acadêmicos chineses, e como o governo chinês está respondendo ao seu novo papel na publicação acadêmica global.

Na Figura 3, observa-se o mapa de colaboração entre países, o qual reforça a tendência previamente identificada, evidenciando a centralidade da China nas redes de colaboração internacional. Nota-se que sua influência supera a de países da União Europeia, destacando seu papel dominante na produção científica sobre o tema. Em contraste, verifica-se a ausência dos Estados Unidos, o que indica uma participação pouco expressiva nas redes de colaboração analisadas, apesar de seu histórico de protagonismo na produção científica global



FROM	TO	FREQUENCY
CHINA	EGYPT	29,861901
CHINA	PAKISTAN	69,3395794
CHINA	SAUDI ARABIA	44,5368627
CROATIA	UNITED KINGDOM	-2,86563164
EGYPT	SAUDI ARABIA	44,5368627
PAKISTAN	EGYPT	29,861901
PAKISTAN	SAUDI ARABIA	44,5368627

Figura 3:Mapa mostrando a colaboração entre países
Fonte: Autores (2026)

As revistas mais relevantes que abordaram o tema foram: Construction and Building Materials, Environmental Science and Pollution Research, Journal of Material Cycles and Waste Management e Sustainability com 2 publicações cada, seguidos por outras 12 revistas com 1 publicação apenas. Com pelo menos duas citações nos artigos aqui selecionados destacam-se os autores: Bubalo, A.; Kadir, A.; Shen, X.; Vouk, D.; Yu, L.; Zhang, Y. Já os artigos mais citados globalmente foram: Yu *et al*. (2024) (37 citações), Amin *et al*. (2022) (24 citações), Bubalo *et al*. (2023) (22 citações) e Detho *et al*. (2024) (22), e os demais apresentaram menos de 7 citações.

A análise de frequência de palavras evidencia que os estudos sobre utilização de lodo de esgoto na produção de tijolos concentram-se predominantemente em materiais cerâmicos queimados, com destaque para termos como *firing temperature*, *clay bricks* e *compressive strength* (Figura 4). Observa-se ainda forte ênfase na avaliação das propriedades mecânicas e no comportamento ambiental dos materiais, especialmente em relação à lixiviação de contaminantes. Por outro lado, a baixa ocorrência de termos associados a tecnologias sem queima indica uma lacuna na literatura, sugerindo a necessidade de maior aprofundamento em estudos voltados à produção de tijolos de solo-cimento ou outros sistemas alternativos.

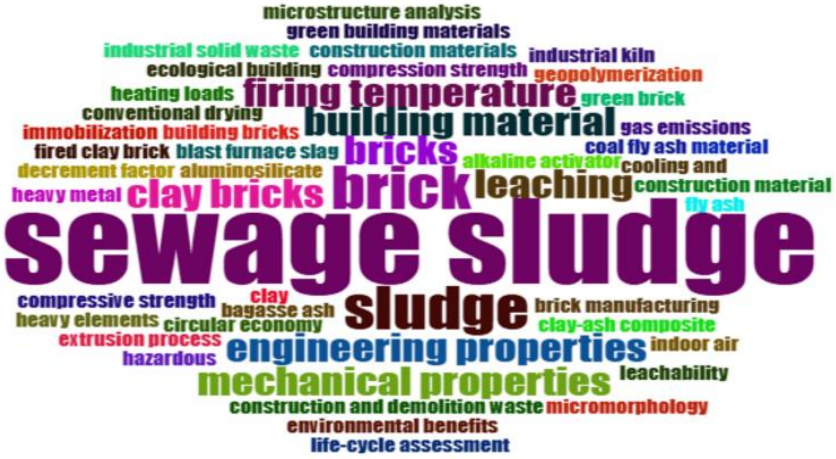


Figura 4: Nuvem da frequência de palavras
Fonte: Autores (2026)

Análise comparativa

A comparação dos dados apresentados nos estudos analisados permitiu inferir sobre a viabilidade do uso deste substrato para a produção dos tijolos para construção. Ao abordarem sobre as características mineralógicas do lodo utilizado, 100% dos artigos reportaram presença de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) nas amostras coletadas. Salim, Kadir e Noor (2023) afirmam que a predominância destes materiais indica uma alta similaridade do lodo de esgoto com matérias-primas tradicionalmente utilizadas na indústria cerâmica e de construção civil, indicando a viabilidade do uso de lodo como substituto na fabricação de tijolos cerâmicos e em outros materiais de construção.

A segurança ambiental do material foi avaliada por meio de ensaios de lixiviação, os quais indicaram que a incorporação de lodo na produção de tijolos apresenta resultados satisfatórios, com a maioria dos materiais atendendo aos limites estabelecidos para liberação de contaminantes. Esse comportamento, segundo Hashem *et al*. (2026), é atribuído principalmente ao processo de queima e à estabilização da matriz cerâmica, que promovem o encapsulamento e a imobilização de metais potencialmente tóxicos na estrutura do material. Dessa forma, os resultados sugerem que, quando submetido a processamento adequado, o uso de lodo na fabricação de tijolos não apresenta riscos ambientais significativos relacionados à lixiviação de contaminantes (Vaithiyasubramanian; Srinivasan; Kanagarajan, 2022).

Além de seguro ambientalmente, as pesquisas apontam para mais dois benefícios operacionais associados à incorporação de lodo na produção de tijolos cerâmicos. A redução do consumo energético durante a queima e a diminuição do peso do produto. Segundo Bubalo *et al*. (2023) a redução do consumo energético está intrinsecamente associada à liberação de calor pela matéria orgânica presente no resíduo, enquanto a combustão dessa fração orgânica durante a queima é responsável pela formação de poros na matriz cerâmica, resultando em tijolos mais leves e com potencial melhoria no isolamento térmico (Wang *et al*., 2024).

Ao comparar os estudos analisados, observa-se o emprego do resíduo em distintas formas, como lodo seco, lodo calcinado e cinzas de lodo. No entanto, a frequência de utilização do lodo seco/desidratado aplicado diretamente foi significativamente maior (63% dos artigos) quando comparada ao uso de formas previamente submetidas a altas temperaturas, como o lodo carbonizado ou na forma de cinzas (Tabela 1). Esse resultado indica uma tendência recente de preferência pelo uso direto do lodo seco, possivelmente associada à redução das etapas de processamento, à menor demanda energética e à maior viabilidade econômica do processo (Zhou *et al*., 2013).

A maior parte dos artigos analisados aponta melhor desempenho em baixas a médias taxas de incorporação de lodo, geralmente entre 5% e 20%. Entretanto, alguns estudos com formulações específicas demonstraram viabilidade técnica mesmo em teores mais elevados, alcançando incorporações de até 40% de lodo como no caso de Wiśniewski *et al.* (2024).

De maneira geral, o aumento do teor de lodo tende a elevar a porosidade e a absorção de água, ao mesmo tempo em que reduz a resistência mecânica do material. Contudo, esse efeito pode ser mitigado mediante estratégias como tratamento prévio do lodo, adição de resíduos complementares, controle das condições de queima ou utilização de rotas produtivas alternativas, como geopolímeros e tijolos ecológicos sem queima. Nessas condições, foram reportados valores de resistência à compressão de até 16 MPa, com 40% de lodo incorporado (Wang *et al*., 2024), evidenciando que, quando adequadamente processado, o lodo pode ser incorporado sem comprometer significativamente o desempenho mecânico dos tijolos.

Em relação ao tipo de tijolo empregado, observou-se que a grande maioria dos estudos analisados (84,2%) concentra-se na produção de tijolos cerâmicos submetidos à queima. Em contrapartida, identificou-se um número bastante reduzido de pesquisas voltadas a tecnologias alternativas, como tijolos não sinterizados, geopoliméricos e de solo-cimento, com apenas um estudo representando cada uma dessas abordagens. Apontando para uma lacuna significativa na literatura quanto ao desenvolvimento de materiais sem queima, apesar de resultados promissores já reportados. Dessa forma, destaca-se a necessidade de ampliação das investigações voltadas a esses sistemas alternativos, que podem representar soluções mais sustentáveis e energeticamente eficientes para o reaproveitamento do lodo de esgoto na construção civil.

Autores / Ano	Tijolo/Material	Tipo de lodo	Materiais adicionais	MP
Shi *et al.*, 2024	Tijolo não sinterizado	Lodo de esgoto seco	Cinza volante, fosfogesso, cal, areia	1%
Bubalo *et al.*, 2023	Tijolo cerâmico queimado	Cinza de lodo de esgoto	Argila	5%
Bubalo *et al.*, 2025 Detho *et al.*, 2024 Abdul Salim *et al.*, 2023 Zat *et al.*, 2023	Tijolo cerâmico queimado	Lodo de esgoto seco e seco por micro-ondas	Argila, água	5%
Wiśniewski *et al.*, 2024	tijolo cerâmico queimado	Cinza volante de lodo de esgoto	Argila	40%
Kalpana *et al.*, 2024	Tijolo queimado	Lodo municipal	Cinza de bagaço, cinza de casca de arroz, pó de plástico e argila	40%+ cinzas
Yu *et al.*, 2024	Tijolo cerâmico queimado	Lodo municipal	Escória de alto-forno 0–15%, caulim	40%
Wang *et al.*, 2024	Tijolo leve para subleito	Lodo de esgoto seco	Cinza volante de carvão, solução de metilcelulose	40%
Baloi *et al.*, 2025	Tijolo cerâmico queimado	Lodo seco de esgoto	Argila e cinza	15%
Moulato *et al.*, 2023	Tijolo cerâmico queimado	Lodo de esgoto	Argila	10%
Jobodwana e Sithole, 2025	Tijolo geopolimérico	Lodo calcinado	NaOH, Na_2SiO_3	
Yan *et al.*, 2024	Tijolo ecológico não queimado	Lodo de esgoto	Fosfogesso, cimento, agregado, superplastificante	10%
Nguyen *et al.*, 2024	Tijolo cerâmico queimado	Lodo de esgoto urbano	Casca de arroz e argila	Até 30%
Feldthus *et al.*, 2025	Tijolo cerâmico queimado	Cinza de lodo de esgoto	Argilas amarela e vermelha	30%
Hashem *et al.*, 2026	Tijolo cerâmico queimado	Lodo fecal carbonizado	Argila	16%
Vaithiyasubramanian *et al.*, 2022	Tijolo sem argila queimado	Lodo de esgoto tratado	Resíduos de construção e demolição, cinza volante, cimento	30%

Tabela 1:Análise comparativa das publicações selecionadas.
Fonte: Autores (2026)

Considerações Finais

Conclui-se que a presente revisão bibliográfica atingiu seu objetivo ao apresentar resultados consistentes quanto à viabilidade técnica e ambiental da utilização de lodo de esgoto na produção de tijolos, a partir da análise bibliométrica e qualitativa dos estudos selecionados. De modo geral, os trabalhos analisados indicaram a viabilidade do uso do lodo em diferentes formas de processamento, como lodo seco, calcinado ou na forma de cinzas, destacando benefícios operacionais associados à sua incorporação, tais como a redução do consumo energético durante a queima, a diminuição do peso do produto final e a ausência de riscos ambientais significativos relacionados à lixiviação de contaminantes.

Em relação ao desempenho dos materiais, os melhores resultados foram observados para teores de incorporação entre 5% e 20%. Entretanto, estudos que empregaram proporções mais elevadas, de até 30% e 40%, também apresentaram desempenho satisfatório, evidenciando a ausência de consenso na literatura quanto aos limites ideais de utilização do resíduo e a necessidade de pesquisas complementares que aprofundem os fatores responsáveis por essa variabilidade.

Por fim, verificou-se que a maior parte da literatura concentra-se na aplicação do lodo em tijolos cerâmicos submetidos à queima, sendo ainda limitada a quantidade de estudos voltados a tecnologias sem queima, como tijolos não sinterizados, geopoliméricos e de solo-cimento. Tal cenário evidencia uma lacuna científica relevante, apontando para a necessidade de ampliação das investigações nessa área, especialmente considerando seu potencial de redução do consumo energético e alinhamento com princípios da economia circular.

Referências Bibliográficas

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007. Disponível em: https://www.bibliometrix.org. Acesso em: 29 abr. 2026.

AMIN, Faisal et al. Potential use of wastewater treatment plant sludge in fabrication of burnt clay bricks. **Sustainability**, v. 14, n. 11, p. 6711, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su14116711. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6711. Acesso em: 30 abr. 2026

AZEVEDO, André *et al*. Opportunities and challenges in the anaerobic co-digestion of municipal sewage sludge and fruit and vegetable wastes: **A review. Energy Nexus**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 jun. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100202. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427123000323. Acesso em: 15 abr. 2026.

BALOI, Aurel Mihail; STREZA, Mihaela; BELEAN, Bogdan. Light microscopy image segmentation using active contours driven by local image information for environmentally friendly fired-clay bricks design and characterization. **Plos one**, v. 20, n. 8, p. e0328270, 2025. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0328270. Disponível em: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0328270. Acesso em: 30 abr. 2026.

BITTENCOURT, Simone *et al*. Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo de esgoto. Engenharia Sanitária e Ambiental. [S.l.]: **ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental** v. 21, n. 1, p. 43–53, jan./mar. 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100119334. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/qCpWmW56dks7p8wvf43pzNS/?lang=pt. Acesso em: 30 abr. 2026

BUBALO, Anđelina *et al*. Influence of combustion temperature on the performance of sewage sludge ash as a supplementary material in manufacturing bricks. **Construction and Building Materials**, v. 404, 10 nov. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133126. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182302843X?via%3Dihub. Acesso em: 12 abr. 2026.

BUBALO, Anđelina et al. Microwave drying of sewage sludge: A sustainable additive for improved clay brick manufacturing. **Journal of Environmental Management**, v. 385, p. 125557, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125557. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479725015336. Acesso em: 28 abr. 2026.

CHANG, Zhiyang *et al*. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, p. 104606, mar. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104606. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919305129?via%3Dihub. Acesso em: 14 abr. 2026.

DETHO, Amir; KADIR, Aeslina Abdul; AHMAD, Suhaili. Utilization of wastewater treatment sludge in the production of fired clay bricks: An approach towards sustainable development. **Results in Engineering**, v. 21, p. 101708, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101708. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023008356. Acesso em: 22 abr. 2026.

FELDTHUS, Frederikke B. *et al***.** Propriedades fundentes das cinzas de lodo de esgoto na fabricação de tijolos: efeito da extração de fósforo e da composição da argila para tijolos. **Case Studies in Construction Materials**, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05387. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509525011854?via%3Dihub. Acesso em: 10 abr. 2026.

GONÇALVES, Dayane Batista; MOL, Marcos Paulo Gomes. Destinação final de lodo de esgoto: proposição para auxílio em tomadas de decisão a partir de uma revisão de literatura. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica**, v. 14, n. 1, p. 90–106, 2021. DOI: https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.1.69959. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350740653_DESTINACAO_FINAL_DE_LODO_DE_ESGOTO_PROPOSICAO_PARA_AUXILIO_EM_TOMADAS_DE_DECISAO_A_PARTIR_DE_UMA_REVISAO_DE_LITERATURA. Acesso em: 13 abr. 2026.

HASHEM, Md. Abul *et al.* Characterization and stabilization of carbonized fecal sludge in brick production. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 21, p. 100992, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100992. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416625004036?via%3Dihub. Acesso em: 13 abr. 2026.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2024: Os 100 maiores municípios brasileiros**. São Paulo: [s.n.], 2024. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/ . Acesso em: 12 abr. 2026.

JOBODWANA, Lisakhanya; SITHOLE, Nastassia Thandiwe. From waste to resource: cleaner production of geopolymer bricks from sewage sludge via production parameter optimization. **Construction and Building Materials**, v. 489, p. 142341, 2025. DOI: . Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825024924?via%3Dihub. Acesso em: 12 abr. 2026.

KALPANA, M. *et al.* Analysing the effectiveness of municipal wastewater sludge, bagasse ash, rice husk ash and plastic waste

powder for manufacturing bricks. **AJWEP**, v. 21, n. 1, p. 71–79, 2024. DOI: https://doi.org/10.3233/AJW240010.
MOULATO, K.; AMMARI, M.; BEN ALLAL, L. Performance of sewage sludge reuse in the manufacturing of fired bricks. Global Journal of Environmental Science and Management, v. 9, n. 3, p. 477–496, 2023. Disponível em: https://accscience.com/journal/AJWEP/21/1/10.3233/AJW240010. Acesso em: 10 abr. 2026.

MOULATO, K.; AMMARI, M.; BEN ALLAL, L. Performance of sewage sludge reuse in the manufacturing of fired bricks. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 9, n. 3, p. 477-496, 2023. DOI: https://doi.org/10.22034/gjesm.2023.03.08. Disponível em: https://www.gjesm.net/article_701009_a7b0986d66530a1f82f2a3bec532ef5e.pdf. Acesso em: 15 abr. 2026.

NGUYEN, Hoa Nhan et al. Effective sludge management: Reuse of biowaste and sewer sediments for fired bricks. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 74, n. 7, p. 478-489, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2369294. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2024.2369294. Acesso em: 30 abr. 2026.

OUZZANI, Mourad *et al.* Rayyan: a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 5, n. 1, p. 210, 2016. DOI: https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27919275/. Acesso em: 29 abr. 2026.

RORAT, Agnieszka *et al*. Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management. Industrial and Municipal Sludge: Emerging Concerns and Scope for Resource Recovery. [S.l.]: Elsevier, 2019. p. 155–180. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00008-8. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/pii/B9780128159071000088?via%3Dihub. Acesso em: 16 abr. 2026.

SALIM, Nurul Salhana ABDUL; KADIR, Aeslina ABDUL; NOOR, Norazian MOHAMED. CONSERVATION OF NATURAL RESOURCES: UTILIZATION OF SEWAGE SLUDGE IN BRICK AND ITS IMPACT ON GAS EMISSIONS AND INDOOR AIR QUALITY. International Journal of Conservation Science, v. 14, n. 2, p. 649–662, 2023a. DOI: https://doi.org/10.36868/IJCS.2023.02.18. Acesso em: 12 abr. 2026.

SHI, Daquan et al. Utilization of industrial wastes in non-sintered bricks: microstructure and environmental impacts. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 38, p. 50709-50721, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-024-34559-1. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-34559-1?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 28 abr. 2026.

VAITHIYASUBRAMANIAN, Raguraman; SRINIVASAN, Deepasree; KANAGARAJAN, Arul Kumar. Study on preparation of brick blocks by using construction waste and sludge. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 48, p. 72528–72544, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-022-20968-7. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35608763/. Acesso em: 12 abr. 2026.

WANG, Hong *et al*. Mechanical and Microstructural Analysis of Lightweight Subgrade Bricks Synthesized from Mixtures of Coal Fly Ash and Sewage Sludge. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 52, n. 4, p. 2193–2205, 2024. DOI: https://doi.org/10.1520/JTE20230394. Disponível em: https://dl.astm.org/jte/article-abstract/52/4/2193/22814/Mechanical-and-Microstructural-Analysis-of?redirectedFrom=fulltext. Acesso em: 10 abr. 2026.

WIŚNIEWSKI, Krzysztof *et al.* Ecologically friendly building materials: a case study of clay–ash composites for the efficient management of fly ash from the thermal conversion of sewage sludge. **Sustainability**, v. 16, n. 9, p. 3735, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16093735. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/9/3735. Acesso: 15 abr. 2026.

YAN, Yonggeng et al. Green-brick preparation method for the resource utilization of sewage sludge and phosphogypsum with a low heavy-metal pollution risk. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 26, n. 4, p. 2175-2186, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10163-024-01958-y. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-024-01958-y. Acesso em: 30 abr. 2026.

YU, Laihao *et al.* Comprehensive utilization of blast furnace slag, municipal sludge and kaolin clay in building brick manufacture: crystalline transformation, morphology observation and property assessment. **Cement and Concrete Composites**, v. 145, p. 105337, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105337. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946523004110?via%3Dihub. Acesso em: 12 abr. 2026.

ZHOU, Jun *et al.* Direct utilization of sewage sludge to prepare split tiles. **Ceramics International**, v. 39, n. 8, p. 9179–9186, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.05.019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884213005300?via%3Dihub. Acesso em: 12 abr. 2026.

MATERIAIS ALTERNATIVOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE SISTEMÁTICA SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR E DO DESEMPENHO TECNOLÓGICO

1 Camila dos Santos Pantoja, 2 Igor de Jesus Lobato Pompeu Gammarano, 3 Hélio Raymundo Ferreira
1 Universidade do Estado do Pará - UEPA, e-mail: camila.pantoja@aluno.uepa.br; Universidade do Estado do Pará - UEPA, e-mail: igor.djlp.gammarano@uepa.br; 3 Universidade do Estado do Pará - UEPA, e-mail: helio.ferreira@uepa.br

Palavras-chave: Construção sustentável; Economia circular; Materiais alternativos.

Resumo

A construção civil tem papel relevante na geração de impactos ambientais, sobretudo pelo alto consumo de recursos naturais e pelas emissões de gases de efeito estufa associadas às suas atividades. Nesse cenário, os materiais alternativos vêm sendo cada vez mais discutidos como possibilidades para reduzir esses impactos e avançar em direção à economia circular. Ainda assim, percebe-se que esse potencial nem sempre se reflete em sua adoção efetiva no setor. Este estudo busca compreender como se configuram os padrões de adoção desses materiais na construção civil, considerando, de forma integrada, aspectos ambientais, técnicos e institucionais. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, orientada pelo protocolo PRISMA 2020, contemplando publicações entre 2000 e 2025 nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar. Ao final do processo, 42 estudos foram selecionados para compor a análise. Os resultados indicam uma concentração maior de estudos em materiais derivados de resíduos (≈52%), seguidos por materiais emergentes, como biomateriais e geopolímeros (≈33%), e, em menor número, polímeros reciclados (≈15%). De modo geral, materiais com maior maturidade tecnológica e maior inserção normativa tendem a ser mais utilizados, mesmo quando apresentam ganhos ambientais mais modestos. Por outro lado, soluções com maior potencial de descarbonização ainda permanecem restritas a nichos, em grande parte devido a incertezas técnicas, custos e ausência de normalização consolidada. Diante disso, os achados sugerem que a adoção desses materiais não ocorre de forma linear, sendo influenciada pela interação entre diferentes fatores. Como contribuição, o estudo propõe um framework multidimensional que auxilia na compreensão desse processo e pode apoiar análises e decisões voltadas à sustentabilidade na construção civil.

Introdução

A construção civil configura-se como um dos setores mais intensivos no consumo de recursos naturais e na geração de impactos ambientais em escala global, sendo responsável por aproximadamente 40% do consumo de matérias-primas e por parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa (UNEP, 2020). Esse padrão de impacto está intrinsecamente associado à persistência de um regime produtivo linear, baseado na lógica de extração, produção, uso e descarte, o qual intensifica pressões ambientais ao longo de todo o ciclo de vida das edificações (Agopyan & John, 2011; John, 2017).

Nesse contexto, a economia circular emerge não apenas como uma estratégia de mitigação ambiental, mas como uma proposta de reconfiguração sistêmica do regime sociotécnico da construção civil. Ao priorizar estratégias de redução, reutilização, reciclagem e regeneração de materiais, esse paradigma busca romper com a lógica linear dominante, promovendo maior eficiência no uso de recursos, redução de emissões e reestruturação das cadeias produtivas (Ghisellini *et al*., 2016; Timm *et al*., 2023).

Inseridos nesse processo, os materiais alternativos assumem papel estratégico como vetores materiais da circularidade, abrangendo soluções baseadas em resíduos industriais e de construção, recursos renováveis e tecnologias cimentícias de baixa emissão. Evidências recentes indicam que tais materiais apresentam elevado potencial de mitigação de impactos ambientais, sobretudo quando analisados sob a perspectiva de ciclo de vida (European Commission, 2022; Scrivener *et al*., 2023). No entanto, a análise da literatura revela que sua incorporação em escala permanece limitada por barreiras estruturais relacionadas à padronização, ao desempenho em longo prazo e à aceitação institucional.

Embora haja consenso quanto ao potencial ambiental desses materiais, a literatura apresenta abordagens analíticas distintas. Enquanto estudos de caráter mais sistêmico enfatizam a economia circular como um processo de reconfiguração estrutural (Ghisellini et al., 2016; Kirchherr *et al*., 2017), pesquisas mais recentes tendem a privilegiar métricas isoladas de desempenho ambiental (Akbarnezhad & Xiao, 2023). Essa divergência evidencia uma tensão ainda não resolvida entre abordagens sistêmicas e perspectivas tecnocêntricas, sugerindo que a adoção de materiais alternativos não pode ser compreendida exclusivamente a partir de critérios ambientais.

Por outro lado, verifica-se que a análise desses materiais permanece fragmentada, com predominância de estudos que tratam separadamente dimensões ambientais, técnicas ou econômicas. Essa fragmentação limita a compreensão dos trade-offs envolvidos e dificulta a identificação de padrões estruturais de adoção tecnológica, comprometendo o avanço de estratégias integradas de sustentabilidade no setor (Akbarnezhad & Xiao, 2023; Finamore & Oltean-Dumbrava, 2026).

Mesmo diante de avanços recentes, a literatura ainda carece de abordagens que integrem de forma consistente as dimensões institucionais que condicionam a adoção tecnológica. Observa-se que estudos focados em análise de ciclo de vida (Dixit *et al*., 2010) e desempenho técnico (Scrivener *et al*., 2018) raramente incorporam, de maneira articulada, os fatores

regulatórios e organizacionais que influenciam a difusão desses materiais. Essa lacuna dificulta a compreensão dos mecanismos que explicam por que soluções com elevado desempenho ambiental apresentam baixa inserção no setor.

Diante dessa lacuna, este estudo propõe um framework analítico multidimensional baseado na integração de três dimensões interdependentes: desempenho ambiental, desempenho técnico e maturidade tecnológico-institucional. Ao articular essas dimensões, o framework busca superar abordagens fragmentadas e oferecer uma leitura mais abrangente dos processos de adoção de materiais alternativos.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar, classificar e explicar os padrões de adoção de materiais alternativos na construção civil por meio de uma revisão sistemática da literatura, orientada por uma abordagem integrada de avaliação multidimensional. Parte-se da hipótese de que a adoção tecnológica resulta da interação entre desempenho, regulação e institucionalização, e não de atributos isolados.

Material e Métodos

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, conduzida por meio de revisão sistemática da literatura, estruturada conforme as diretrizes do protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page *et al*., 2021). A adoção desse protocolo assegura transparência, maior transparência e possibilidade de replicação às etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, conferindo robustez metodológica à investigação e alinhando-a às melhores práticas internacionais em revisões sistemáticas.

No que se refere às fontes de dados, a seleção das bases Scopus, Web of Science e ScienceDirect fundamenta-se em sua elevada cobertura de periódicos de alto impacto nas áreas de engenharia civil e sustentabilidade, conforme recomendado por revisões sistemáticas recentes. A inclusão do Google Scholar, embora reconhecida por sua menor curadoria, foi adotada estrategicamente para mitigar vieses de publicação e ampliar a sensibilidade da busca, especialmente em um campo emergente como o de materiais alternativos. Essa estratégia é consistente com recomendações metodológicas internacionais para revisões sistemáticas multidisciplinares, bem como com a literatura nacional que destaca a importância da diversidade de fontes na análise de materiais alternativos na construção civil.

Neste estudo, optou-se por estruturar a estratégia de busca desenvolvida com base em descritores recorrentes na literatura internacional, incluindo “alternative materials”, “recycled materials”, “low-carbon materials”, “sustainable construction”, “circular economy” e “building materials”, combinados por operadores booleanos (AND, OR) e aplicados aos campos de título, resumo e palavras-chave. De forma complementar, foram incorporados descritores equivalentes em língua portuguesa, como “materiais alternativos”, “materiais reciclados”, “materiais de baixo carbono”, “construção sustentável”, “economia circular” e “materiais de construção”, com o objetivo de ampliar a sensibilidade da busca e reduzir vieses linguísticos. A string de busca híbrida adotada foi estruturada conforme apresentado na Tabela 01.

Elemento	Descrição
Bases de dados	Scopus; Web of Science; ScienceDirect; Google Scholar (complementar)
Período da busca	Janeiro a março de 2026
Recorte temporal	2000–2025
Idiomas considerados	Inglês e português
Tipo de documento	Artigos científicos revisados por pares
Campos de busca	Título, resumo e palavras-chave
Descritores (inglês)	“alternative materials”; “recycled materials”; “low-carbon materials”; “sustainable construction”; “circular economy”; “building materials”
Descritores (português)	“materiais alternativos”; “materiais reciclados”; “materiais de baixo carbono”; “construção sustentável”; “economia circular”; “materiais de construção”
Operadores booleanos	AND; OR
String de busca (adaptada)	(“alternative materials” OR “recycled materials” OR “low-carbon materials” OR “materiais alternativos” OR “materiais reciclados”) AND (“construction” OR “building materials” OR “construção”) AND (“circular economy” OR “sustainability” OR “economia circular”)

Tabela 01: Estratégia de busca e parâmetros metodológicos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os critérios de elegibilidade foram definidos previamente para assegurar rigor científico e consistência analítica. Foram incluídos artigos publicados entre 2000 e 2025, revisados por pares, com acesso ao texto completo e alinhados ao escopo da pesquisa, especialmente no que se refere ao desempenho técnico, impactos ambientais e aplicações de materiais alternativos na construção civil. O recorte temporal foi definido com o objetivo de capturar tanto a evolução histórica quanto as tendências

recentes associadas à economia circular e à descarbonização no setor da construção civil. Foram excluídos estudos duplicados, publicações não revisadas por pares, trabalhos estritamente conceituais sem suporte empírico ou analítico, bem como estudos fora do escopo temático.

O processo de seleção foi conduzido com base nas diretrizes do protocolo PRISMA, contemplando as etapas de identificação dos estudos, remoção de duplicatas, triagem por título e resumo, avaliação de elegibilidade em texto completo e inclusão final no corpus analítico.

O processo de identificação resultou inicialmente em 1.283 registros. Após a remoção de duplicatas (315), permaneceram 968 registros, os quais foram submetidos à triagem por título e resumo. Nessa etapa, foram excluídos 842 estudos por não apresentarem aderência ao escopo da pesquisa.

Na sequência, 126 artigos foram selecionados para leitura em texto completo e avaliados quanto à elegibilidade. Desses, 84 estudos foram excluídos com base em critérios previamente definidos, resultando na inclusão final de 42 artigos, que compõem o corpus desta revisão.

A sistematização dessas etapas contribui para maior transparência do percurso metodológico adotado, além de possibilitar sua replicação em estudos futuros. O detalhamento do processo de seleção encontra-se sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 01.

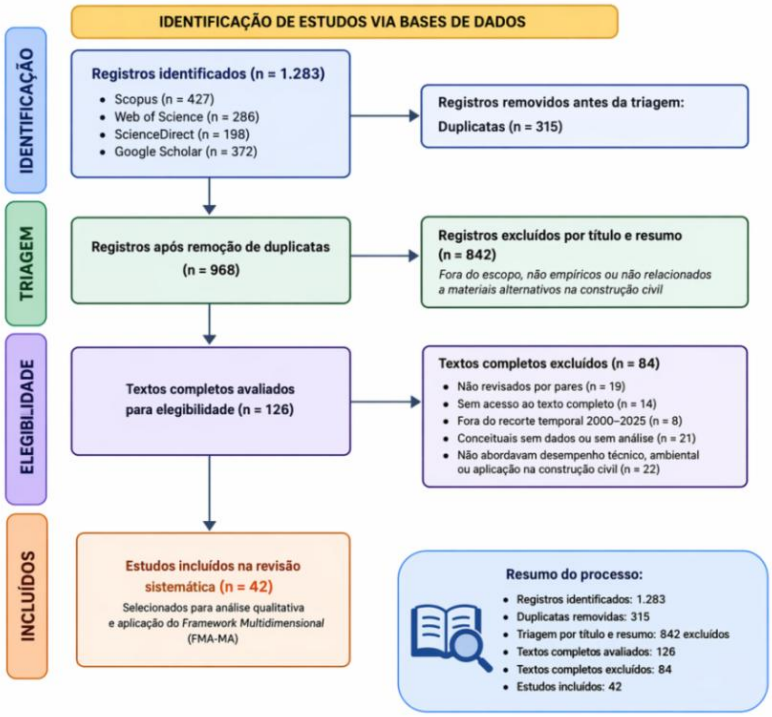


Figura 01: Fluxograma do processo de seleção dos estudos (PRISMA).
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em Page *et al.* (2021).

A extração de dados foi conduzida de forma estruturada, com base nas seguintes variáveis: tipo de material, aplicação na construção civil, desempenho técnico, desempenho ambiental, limitações operacionais e maturidade tecnológica. A análise foi realizada por meio de síntese qualitativa comparativa, permitindo identificar padrões, convergências, divergências e lacunas estruturais na literatura, sob a perspectiva da economia circular. Além disso, procedeu-se à leitura cruzada e à validação interpretativa dos estudos, com o objetivo de reduzir vieses analíticos e aumentar a consistência das inferências. A aplicação preliminar do framework aos materiais analisados é apresentada na Tabela 02.

ID	Categoria	Material	Ambiental	Técnico	Maturidade	Classificação
1	RCD	Concreto reciclado	Média	Média	Alta	Equilibrado
2	Industrial	Cinza volante	Média-Alta	Alta	Alta	Alto
3	Bio	Bambu	Alta	Média	Baixa	Potencial
4	Polimérico	Plástico reciclado	Média	Baixa	Média	Limitado
5	Inovador	Geopolímeros	Muito alta	Alta	Baixa	Disruptivo

Tabela 02: Aplicação do Framework Multidimensional (FMA-MA) aos materiais analisados.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Como contribuição metodológica central, este estudo propõe o Framework Multidimensional de Avaliação de Materiais Alternativos (FMA-MA), estruturado a partir da integração entre três dimensões interdependentes: desempenho ambiental, desempenho técnico e maturidade tecnológico-institucional. Ao contrário de abordagens predominantes na literatura, frequentemente centradas em avaliações unidimensionais, como análises de ciclo de vida isoladas (Dixit *et al*., 2010) ou desempenho mecânico (Scrivener *et al*., 2018), o FMA-MA articula simultaneamente dimensões técnicas, ambientais e institucionais em uma estrutura analítica unificada.

Essa integração permite superar uma limitação recorrente na literatura, que tende a dissociar o desempenho ambiental da viabilidade de adoção, ao desconsiderar os condicionantes institucionais e normativos que moldam a difusão tecnológica. Ao incorporar explicitamente a dimensão de maturidade tecnológico-institucional, o framework avança de uma lógica descritiva para uma abordagem explicativa, capaz de interpretar o descompasso entre potencial ambiental e adoção efetiva dos materiais.

Nesse sentido, o FMA-MA não se restringe à classificação de materiais, mas opera como um instrumento analítico para a identificação de padrões não lineares de transição tecnológica, incluindo dinâmicas de bloqueio (lock-in), regimes incrementais e trajetórias disruptivas. Tal abordagem permite compreender a adoção de materiais alternativos como um processo sociotécnico complexo, condicionado por interações entre desempenho, regulação e estrutura produtiva.

A estrutura conceitual do framework proposto é apresentada na Figura 02, a qual sintetiza as dimensões analíticas e suas inter-relações no processo de avaliação dos materiais alternativos.

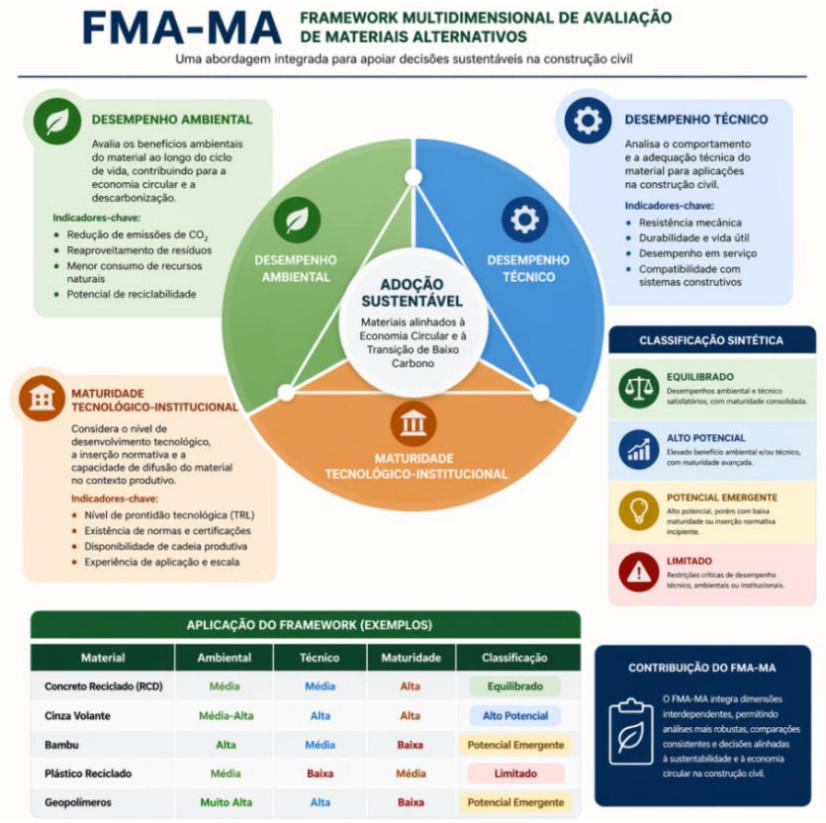


Figura 02: Framework Multidimensional de Avaliação de Materiais Alternativos (FMA-MA).
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A partir dessa estrutura, torna-se possível analisar os materiais alternativos de forma integrada, conforme apresentado nas seções seguintes.

Resultados e Discussão

A análise dos 42 estudos selecionados evidencia que, embora haja convergência quanto ao potencial dos materiais alternativos na redução de impactos ambientais, essa convergência não se traduz de forma homogênea em termos de adoção tecnológica e inserção no setor construtivo. Esse descompasso é recorrente na literatura, que aponta a difusão de inovações em materiais de construção como fortemente condicionada por fatores institucionais e econômicos, para além do desempenho ambiental isolado (Akbarnezhad & Xiao, 2023; Ghisellini *et al*., 2016).

Do total de estudos analisados, 22 (≈52%) concentram-se em materiais derivados de resíduos (RCD e subprodutos industriais), enquanto 14 (≈33%) abordam materiais emergentes (bio-baseados e geopolímeros) e apenas 6 (≈15%) tratam de polímeros reciclados e soluções híbridas. Essa distribuição não apenas revela um viés da literatura, mas também reflete a predominância de trajetórias tecnológicas já estabilizadas, conforme discutido na perspectiva multinível das transições sociotécnicas (Geels, 2002; Geels, 2011).

Essa heterogeneidade estrutural é sistematizada na Tabela 03, que evidencia assimetrias relevantes entre maturidade tecnológica, potencial ambiental e grau de institucionalização normativa.

Categoria	Subtipo	Maturidade tecnológica	Potencial ambiental	Inserção normativa	n	Interpretação sistêmica
RCD	Concreto/agregados reciclados	Alta	Média	Média-Alta	12	Circularidade consolidada (incremental)
Industriais	Cinzas, escórias	Alta	Média-Alta	Alta	10	Otimização de processos existentes
Bio-baseados	Bambu, fibras	Média	Alta	Baixa	8	Inovação emergente não institucionalizada
Polímeros reciclados	Plásticos reutilizados	Média	Média	Média-Baixa	6	Circularidade urbana secundária
Inovadores	Geopolímeros	Baixa-Média	Muito alta	Baixa	6	Disrupção tecnológica em fase inicial

Tabela 03: Estrutura da literatura e maturidade dos materiais alternativos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A leitura integrada dos dados revela uma clivagem clara entre dois grupos tecnológicos. De um lado, materiais derivados de resíduos de construção e demolição (RCD) e subprodutos industriais, que representam mais da metade dos estudos analisados (n=22), apresentam elevada maturidade tecnológica e maior inserção normativa, configurando soluções já incorporadas às práticas convencionais da indústria. Esses achados são consistentes com estudos que destacam o papel das adições minerais, como cinzas volantes e escórias, na redução de emissões de CO_2 sem comprometer o desempenho mecânico do concreto (Scrivener *et al*., 2018; Habert *et al*., 2020).

De outro lado, materiais bio-baseados e soluções cimentícias alternativas, que somam aproximadamente 33% da literatura analisada (n=14), emergem como vetores de maior potencial de descarbonização, mas permanecem limitados por baixa padronização técnica, reduzida confiabilidade de desempenho e insuficiente institucionalização normativa. Em particular, a maior parte dos estudos sobre biomateriais (6 de 8) aponta limitações relacionadas à durabilidade e à resistência a agentes biológicos, enquanto pesquisas sobre geopolímeros destacam barreiras associadas ao custo, à variabilidade de matérias-primas e à ausência de normalização consolidada (Scrivener *et al*., 2018; Finamore & Oltean-Dumbrava, 2026).

Cabe destacar, contudo, que nem todos os estudos convergem integralmente nesse diagnóstico. Alguns trabalhos indicam avanços recentes na padronização de materiais inovadores, especialmente em contextos específicos, o que sugere que a transição tecnológica pode estar em curso, ainda que de forma desigual. Ainda assim, o padrão predominante aponta para um descompasso entre inovação e difusão.

Essa tensão entre potencial e adoção é aprofundada na análise comparativa apresentada na Tabela 04, que sintetiza evidências empíricas recorrentes nos estudos analisados.

Material	Aplicação típica	Benefício ambiental	Desempenho técnico	Limitação crítica	Nível de adoção
Solo-cimento	Alvenaria	Baixa energia incorporada	Médio	Sensibilidade à umidade	Médio
CP III	Concreto estrutural	Redução de CO_2	Alto	Variabilidade de desempenho	Alto
Concreto reciclado	Pavimentação	Reuso de RCD	Médio	Heterogeneidade	Médio
Bambu	Estruturas leves	Renovabilidade	Médio	Biodegradação	Baixo
Madeira plástica	Mobiliário urbano	Reuso de plástico	Médio-Baixo	Baixa rigidez	Baixo
Geopolímeros	Estruturas avançadas	Alta descarbonização	Alto	Custo e escala	Baixo
EPS reciclado	Isolamento	Reuso de resíduos	Baixo-Médio	Inflamabilidade	Baixo

Tabela 04: Comparação técnico-ambiental dos materiais alternativos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os dados apresentados na Tabela 04 evidenciam que não existe relação linear entre desempenho ambiental e nível de adoção tecnológica, corroborando achados de revisões recentes sobre economia circular na construção (Ghisellini *et al*., 2016; Timm *et al*., 2023). Materiais com elevado potencial de redução de emissões, como geopolímeros e biomateriais, permanecem marginalizados devido a restrições econômicas, incertezas de desempenho em escala real e ausência de normalização técnica consolidada.

Em contraste, soluções intermediárias, como concretos com adições minerais e concretos reciclados, apresentam maior aceitação no mercado por equilibrarem desempenho técnico satisfatório e menor risco tecnológico. Esse padrão está alinhado com a literatura que destaca a importância da compatibilidade com sistemas produtivos existentes para a difusão de inovações no setor da construção (John, 2017; Scrivener *et al*., 2018).

Com base nesses resultados, a Tabela 05 organiza os materiais segundo uma lógica evolutiva, considerando diferentes regimes tecnológicos.

Nível	Características	Exemplos	Função no sistema construtivo	Impacto na sustentabilidade
Incremental	Melhoria de materiais existentes	RCD, CP com adições	Redução parcial de impactos	Baixo a moderado
Transicional	Reuso e reconfiguração parcial	Polímeros reciclados, concreto reciclado	Otimização de fluxos de resíduos	Moderado
Disruptivo	Substituição de paradigma	Geopolímeros, biomateriais	Reestruturação do sistema produtivo	Alto

Tabela 05: Evolução tecnológica dos materiais alternativos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Neste estudo, observa-se que a transição tecnológica na construção civil não ocorre de forma linear, mas sim por meio da coexistência de regimes tecnológicos incrementais, transicionais e disruptivos, em linha com a literatura de transições sociotécnicas (Geels, 2002; Geels, 2011). O regime incremental, atualmente dominante (≈52% dos estudos), reflete a lógica de melhoria marginal de materiais convencionais, enquanto o regime disruptivo permanece restrito a nichos tecnológicos com baixa capacidade de difusão.

Por outro lado, observa-se que a economia circular no setor é operacionalizada predominantemente sob uma lógica de fechamento de ciclos de resíduos, conforme já destacado por Ghisellini *et al*. (2016). Em aproximadamente 70% dos estudos analisados, a circularidade está associada a estratégias de reciclagem e reuso, sem promover uma reconfiguração estrutural das cadeias produtivas.

Cabe, no entanto, ponderar que essa predominância pode estar parcialmente associada ao próprio recorte metodológico dos estudos analisados, muitos dos quais se concentram em avaliações de ciclo de vida ou desempenho técnico isolado. Essa limitação sugere cautela na generalização dos resultados, ainda que o padrão observado seja consistente.

De forma integrada, os achados indicam que a sustentabilidade dos materiais alternativos depende da interação entre maturidade tecnológica, viabilidade econômica e institucionalização normativa. A ausência de alinhamento entre essas dimensões explica tanto a baixa escalabilidade das soluções mais inovadoras quanto a predominância de alternativas intermediárias no mercado.

Esse cenário reforça a necessidade de instrumentos regulatórios mais adaptativos, políticas públicas orientadas à inovação de baixo carbono e mecanismos econômicos capazes de reduzir o descompasso entre desenvolvimento tecnológico e adoção industrial.

Por fim, os resultados evidenciam que a avaliação de materiais alternativos deve transcender abordagens estritamente técnico-ambientais, incorporando dimensões institucionais, econômicas e regulatórias. Nesse sentido, o framework analítico proposto neste estudo se mostra adequado para capturar a complexidade sistêmica da transição tecnológica, oferecendo suporte à tomada de decisão mais robusta em contextos orientados à sustentabilidade e à economia circular.

Considerações Finais

Os resultados deste estudo indicam que a adoção de materiais alternativos na construção civil não é determinada pelo seu desempenho ambiental isolado, mas pela interação entre maturidade tecnológica, viabilidade econômica e institucionalização normativa. Nesse sentido, a transição observada no setor não configura um processo linear de substituição tecnológica, mas um processo seletivo, no qual soluções mais compatíveis com estruturas produtivas já consolidadas tendem a prevalecer, mesmo quando apresentam ganhos ambientais mais modestos.

A análise dos estudos revela que a adoção tecnológica permanece fortemente orientada por critérios de segurança, previsibilidade e alinhamento com práticas estabelecidas, o que limita a difusão de soluções com maior potencial transformador. Como consequência, materiais inovadores, embora ambientalmente superiores, permanecem restritos a nichos específicos, enquanto alternativas intermediárias, tecnicamente mais consolidadas, dominam o mercado. Esse padrão indica que a predominância de trajetórias incrementais não constitui uma limitação circunstancial, mas uma característica estrutural do setor construtivo. Mais do que uma limitação operacional, esse padrão reflete a própria lógica de funcionamento do setor.

Os dados analisados indicam um descompasso persistente entre a geração de inovação e a capacidade de absorção tecnológica do setor, associado a mecanismos de bloqueio (lock-in) que favorecem a manutenção de regimes tecnológicos estabelecidos. Esse descompasso ajuda a explicar por que materiais com elevado potencial de descarbonização, como biomateriais e sistemas cimentícios alternativos, enfrentam barreiras relacionadas à padronização, à confiabilidade de desempenho e à aceitação institucional.

No que se refere à economia circular, observa-se que, no contexto analisado, ela tem sido operacionalizada predominantemente por meio de estratégias incrementais de reaproveitamento de resíduos, sem promover, na maioria dos casos,

uma reconfiguração estrutural das cadeias produtivas. Assim, a transição identificada pode ser caracterizada como parcial e assimétrica, marcada por avanços pontuais, mas ainda distante de uma transformação sistêmica mais abrangente.

Este estudo contribui teoricamente ao demonstrar que a compreensão da adoção de materiais alternativos exige uma abordagem integrada, capaz de articular dimensões técnicas, ambientais e institucionais em uma perspectiva sociotécnica. Ao propor o Framework Multidimensional de Avaliação de Materiais Alternativos (FMA-MA), o trabalho contribui ao oferecer um instrumento analítico que não apenas classifica materiais, mas permite explicar os padrões de adoção tecnológica e seus condicionantes estruturais, superando, assim, abordagens fragmentadas predominantes na literatura.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se o avanço em três direções complementares. Primeiramente, a realização de estudos empíricos aplicados que testem o framework proposto em contextos reais de projeto e execução, permitindo avaliar sua capacidade explicativa em diferentes segmentos da construção civil. Em segundo lugar, recomenda-se o desenvolvimento de investigações quantitativas voltadas à mensuração das relações entre desempenho ambiental, maturidade tecnológica e nível de adoção, contribuindo para a operacionalização do modelo em análises comparativas. Por fim, destaca-se a importância de pesquisas centradas na dimensão institucional, com foco em políticas públicas, regulação e mecanismos de incentivo, de modo a compreender como reduzir o descompasso entre inovação tecnológica e difusão no setor, especialmente em contextos de transição para uma economia de baixo carbono.

Referências Bibliográficas

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blucher, 2011. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/81c3bbde-b3d6-4c76-bfc6-d350dbab74af/Vahan_2011_desafio%20da%20sustentabilidade.pdf. Acesso em: 09 fev. 2026.

AKBARNEZHAD, A.; XIAO, J. *Estimation and minimization of embodied carbon of buildings: a review*. ***Buildings***, v. 13, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-5309/7/1/5. Acesso em: 09 fev. 2026.

CIRCULAR ECONOMY IN CONSTRUCTION: findings from a literature review. **Heliyon**, v. 10, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024106780. Acesso em: 09 fev. 2026.

DIXIT, M. K. *et al*. **Identification of parameters for embodied energy measurement: a literature review**. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 8, p. 1238–1247, 2010.

DU PLESSIS, C. Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries. ***CIB Information Bulletin***, 2002. Disponível em: https://www.cibworld.nl/pages/begin/Agenda21Brochure.pdf. Acesso em: 06 mar. 2026.

ENHANCING BUILDING MATERIAL CIRCULARITY: a systematic review on prerequisites, obstacles and the critical role of data traceability. ***Journal of Building Engineering***, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S 2352710224027049. Acesso em: 09 fev. 2026.

FINAMORE, M.; OLTEAN-DUMBRAVA, C. Circularity in construction: a multicriteria review and synthesis of existing frameworks and policy instruments. ***Circular Economy and Sustainability***, 2026. Disponível em: https://link.springer.com. Acesso em: 06 mar. 2026.

GEISSDOERFER, M. *et al*. The circular economy – a new sustainability paradigm? ***Journal of Cleaner Production***, v. 143, p. 757–768, 2017.

GEELS, F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. **Research Policy**, v. 31, n. 8–9, p. 1257–1274, 2002. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048733302000628?via%3Dihub. Acesso em: 06 mar. 2026.

GEELS, F. W. The multi-level perspective on sustainability transitions: responses to seven criticisms. ***Environmental Innovation and Societal Transitions***, v. 1, n. 1, p. 24–40, 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210422411000050?via%3Dihub. Acesso em: 06 mar. 2026.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. ***Journal of Cleaner Production***, v. 114, p. 11–32, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615012287?via%3Dihub. Disponível em:

HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. ***Nature Reviews Earth & Environment***, v. 1, p. 559–573, 2020. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s43017-020-0093-3 . Acesso em: 06 mar. 2026.

HEBEL, D. E.; HEISEL, F.; SCHLESIER, K. **Building from waste: Recovered materials in architecture and construction.** Basel: Birkhäuser, 2014.

JOHN, V. M.. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo: EPUSP, 2017.

KABEER, K. I. S. A.; VARGHESE, P. C. **Sustainable construction materials and technologies**. *Procedia Engineering*, v. 180, p. 176–183, 2017.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. **Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221–232, 2017.

KUMAR, R.; KUMAR, S.; MEHROTRA, S. P. Towards sustainable construction: Review of bamboo as a structural material. *Construction and Building Materials*, v. 264, 120691, 2020. . Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820326969?via%3Dihub. Acesso em: 09 fev. 2026.

PAGE, Matthew J. *et al*. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, 2021. Disponível em: https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71. Acesso em: 06 mar. 2026.

SATTLER, Miguel Aloysio. **Edificações sustentáveis: conceitos e estratégias de projeto**. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry**. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, 2018.

TIMM, J. F. G.; MACIEL, V. G.; PASSUELLO, A. Towards sustainable construction: a systematic review of circular economy strategies and ecodesign in the built environment. **Buildings**, v. 13, n. 8, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-5309/13/8/2059. Acesso em: 09 fev. 2026.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **2020 global status report for buildings and construction**. Nairobi: UNEP, 2020. Disponível em: https://www.unep.org . Acesso em: 09 fev. 2026.

TRANSIÇÃO CIRCULAR NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

1 Izabelly Gonçalves da Silva, 2 André Cristiano Silva Melo, 3 Brenda de Farias Oliveira Cardoso, 4 Vitor William Batista Martins, 5 Antonio Erlindo Braga Jr.

1 Uepa, e-mail: izabelly.silva@aluno.uepa.br; 2 Uepa, e-mail: acsmelo@uepa.br; 3 Uepa, e-mail: brenda.oliveira@uepa.br; 4 Uepa, e-mail: vitor.martins@uepa.br; 5 Uepa, e-mail: erlindo@uepa.br

Palavras-chave: Economia Circular; Sustentabilidade; Gestão de Resíduos de Construção e Demolição.

Resumo

A indústria da construção civil desempenha papel estratégico no desenvolvimento econômico, mas também se destaca pelo elevado consumo de recursos naturais e pela elevada geração de resíduos de construção e demolição. Nesse contexto, a Economia Circular surge como uma alternativa ao modelo linear tradicional, propondo a redução, reutilização e reciclagem de materiais, além da promoção de maior eficiência no uso de recursos. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar o panorama da produção científica sobre a Economia Circular aplicada à construção civil por meio de uma abordagem bibliométrica associada a uma Revisão Sistemática da Literatura. A pesquisa foi conduzida com base no protocolo PRISMA, utilizando as bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, resultando em uma amostra final de 167 artigos. Os dados foram analisados com o auxílio dos softwares *Excel* e *VOSviewer*, permitindo a realização de análises de coocorrência de palavras-chave e coautoria. Os resultados indicam um crescimento das publicações nos últimos anos, com destaque para países como China, Austrália e Reino Unido. Observa-se também a concentração das pesquisas em periódicos voltados à sustentabilidade e gestão ambiental. A análise bibliométrica revelou que a literatura está centrada em abordagens operacionais, com foco na gestão de resíduos, mas também foram identificadas abordagens emergentes relacionadas à cadeia de suprimentos, logística reversa e ao uso de tecnologias como Building information modeling e inteligência artificial. Apesar desses avanços, verifica-se uma baixa integração entre as diferentes abordagens e limitada colaboração entre grupos de pesquisa. Conclui-se que o campo de estudo encontra-se em processo de consolidação, apresentando lacunas relacionadas à integração sistêmica e à aplicação prática dos princípios da Economia Circular na construção civil.

Introdução

A indústria da construção é um setor de relevância global, com impacto direto no desenvolvimento econômico e na expansão urbana (Lins *et al*., 2024; *Oxford Economics*, 2021). Ao mesmo tempo, caracteriza-se pelo elevado consumo de recursos naturais e pela significativa geração de resíduos, sendo frequentemente associada a pressões ambientais em diferentes contextos (Wit *et al.*, 2019; Crawford, 2022). Entre os principais desafios do setor, destacam-se os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), que representam uma parcela expressiva dos resíduos sólidos gerados mundialmente (Alencar *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2022). Além do volume gerado, a forma como esses resíduos são gerenciados ainda apresenta limitações em relação à destinação final, que em muitos casos ocorre de maneira inadequada, resultando em impactos ambientais e perda de valor econômico. Esse cenário está diretamente relacionado ao modelo linear de produção, baseado na lógica extrair-produzir-descartar, que tem sido apontado como insuficiente para lidar com os desafios atuais de sustentabilidade (Mahpour, 2018; Ossio *et al.*, 2023).

Em resposta a essas limitações, a Economia Circular (EC) tem sido discutida como uma alternativa capaz de promover o uso mais eficiente dos recursos (Ghisellini *et al*., 2018). A adoção da EC no setor da construção apresenta benefícios, como a redução da extração de recursos, a diminuição da geração de RCD, a mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e a promoção da inovação nos processos construtivos. Materiais tradicionalmente considerados resíduos podem ser reintroduzidos na cadeia produtiva por meio de processos, como reutilização, remanufatura e reciclagem, reduzindo custos e impactos ambientais (Rao *et al*., 2025). Além disso, o potencial de valorização desses materiais cria novas oportunidades de negócios e impulsiona a competitividade do setor, estimulando o desenvolvimento de mercados secundários de materiais e serviços especializados na gestão de RCD (Chen *et al*., 2019). O reaproveitamento de materiais pode resultar em benefícios econômicos, ao reduzir custos de aquisição e disposição, e em ganhos sociais, promovendo empregos em setores ligados à reciclagem e à logística reversa (Ghisellini *et al.*, 2018; Nadazdi *et al*., 2022). A adoção desses processos reforça a sustentabilidade do setor, integrando as dimensões ambiental, econômica e social.

Nos últimos anos, observa-se um crescente interesse por parte das empresas do setor da construção na adoção de práticas associadas à EC, impulsionado por fatores, como pressões regulatórias, demandas sociais por sustentabilidade e oportunidades de redução de custos e geração de valor (Hossain *et al.*, 2020; Bhavsar *et al.*, 2023). Muitas organizações têm buscado incorporar princípios circulares em suas operações, com a utilização de materiais reciclados, do desenvolvimento de projetos modulares que facilitam a desmontagem e reutilização, bem como da adoção de certificações ambientais que promovem práticas mais sustentáveis (Akbarieh *et al.*, 2020). Apesar desse avanço, a transformação ainda é incipiente e demanda maior sistematização, capacitação e suporte técnico para sua efetiva consolidação no setor (Ghisellini *et al.*, 2018).

Apesar dos benefícios potenciais e do crescente interesse no conceito de EC, a indústria da construção civil ainda se encontra nos estágios iniciais de adoção dessa abordagem, enfrentando desafios para compreender, integrar e implementar

plenamente seus princípios (Bilal *et al.*, 2020; Giorgi *et al.*, 2022; Ossio *et al.*, 2023; Hosseini *et al.*, 2023). As barreiras que dificultam a implementação da EC incluem a falta de conhecimento e informação, a ausência de incentivos adequados, a inexistência de mecanismos de mercado eficazes para facilitar a recuperação de materiais e os elevados custos iniciais para a adoção de práticas circulares (Liu *et al*. 2021; Torgautov *et al.*, 2021; Bhavsar *et al*., 2023; Fonseca *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, torna-se relevante compreender como a produção científica sobre EC na construção civil tem se estruturado ao longo do tempo. Assim, este estudo tem como objetivo analisar o panorama da literatura por meio de uma abordagem bibliométrica, buscando identificar os principais temas, tendências de pesquisa e lacunas existentes. Para isso, a questão que norteia esse estudo é: Como se caracteriza a literatura relacionada à economia circular na indústria da construção civil?

Este artigo está estruturado em seções. A primeira seção aborda a introdução, contextualizando o tema, justificando sua relevância e definindo o objetivo da pesquisa. Na segunda seção, são detalhados os métodos utilizados. Na terceira seção são apresentados e analisados os principais achados. Por fim, a quarta seção destaca as considerações finais, limitações da pesquisa e sugestões para estudos futuros.

Materiais e Métodos

Para atender ao objetivo da pesquisa, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), a fim de identificar, analisar e sintetizar o conhecimento existente que orientem à transição para a EC na indústria da construção civil, posteriormente, foi utilizado o software *VOSviewer* para realizar análises bibliométricas referentes a co-ocorrência de autores e palavras-chave.

A execução da RSL seguiu uma abordagem estruturada, conforme as práticas metodológicas indicadas por Moher *et al.* (2009) e Snyder (2019), adaptadas ao contexto e ao objetivo desta pesquisa. Nesse sentido, adotou-se o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que fornece um conjunto de diretrizes para a condução de RSL, garantindo rigor metodológico e transparência. O protocolo organizou o processo em quatro fases principais: (i) Identificação; (ii) Triagem; (iii) Elegibilidade; e (iv) Inclusão (Moher *et al.*, 2009).

A aplicação do PRISMA foi representada visualmente por meio de um fluxograma, detalhando todas as etapas de seleção e exclusão de estudos, o que reforça a transparência e a replicabilidade da pesquisa. Dessa forma, o processo da RSL foi desenvolvido em quatro etapas principais:

Na etapa 1, foi realizado o planejamento da revisão e a definição do escopo, na qual foram feitos testes para definir a *string* de busca que contivesse a combinação de palavras-chave mais aderente ao objeto de estudo. Para tal, inicialmente foram propostos termos de busca, considerando palavras-chave e outros termos relacionados à pesquisa. Estes termos foram agrupados e combinados, compondo uma *string* inicial que considerou o uso de operadores booleanos AND e OR. Os termos com significado semelhante foram agrupados usando o operador OR. Os grupos de termos foram combinados usando o operador AND. Em seguida, foi elaborado o protocolo de pesquisa (Quadro 1), contendo os dados necessários para a delimitação e prosseguimento da pesquisa.

String	*("circular economy")* AND *("construction waste" OR "demolition waste"* OR *"construction and demolition waste"* OR "C&DW" OR "CW" OR "DW" OR *"construction and demolition debris"* OR *"construction debris"* OR *"demolition debris"* OR *"construction and demolition refuse"* OR *"construction refuse"* OR *"demolition refuse")* AND *("framework"* OR *"conceptual framework"* OR *"conceptual model"* OR *"diagram"* OR *"conceptual diagram"* OR *"theoretical model"* OR *"theoretical framework")*
Bases de dados	*Scopus* e *Web of Science*
Idioma	Inglês
Ano	Sem restrição
Tipo de publicação	Artigos e Revisões
Critério de Inclusão	Artigos que abordem práticas que promovam a EC; Estudos que abordem os RCD da indústria da construção.
Critério de Exclusão	Artigos que não abordem práticas relacionadas à EC; Pesquisas que não sejam relacionadas aos RCD da indústria da construção; Estudos sem texto completo disponível; Literatura cinzenta.
Parâmetros	Título; Autor(es); Ano; País; Periódico; Palavras-chave.

Quadro 1: Protocolo de Pesquisa.
Fonte: Autores (2026).

Na etapa 2, foi realizada a aquisição dos artigos mediante aplicação da *string* de busca nas bases de pesquisa *Scopus* e *Web of Science (WoS)*, selecionadas por sua abrangência e credibilidade acadêmica internacional. Os artigos obtidos foram exportados para uma planilha Excel, para a posterior etapa de tratamento.

Na etapa 3, foi feito o tratamento dos dados exportados com base nos critérios definidos no protocolo. Inicialmente foi feita a exclusão dos artigos duplicados. Em seguida, foi realizada a exclusão da literatura cinzenta, dos artigos impossibilitados

de acesso e dos artigos que não atendiam aos critérios de inclusão ou atendiam aos critérios de exclusão, a partir da leitura de título, resumo e palavras-chave e, caso necessário, do texto na íntegra para as conclusões definitivas.

Na etapa 4, foi realizada a extração de dados mediante leitura integral dos artigos selecionados, segundo os parâmetros definidos no protocolo de pesquisa. Nessa etapa, foram sistematizados dados relevantes para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa.

A partir da definição da amostra final, foi realizada a análise bibliométrica para identificar a frequência de publicações ao longo dos anos, os países que estão realizando as publicações, os periódicos mais recorrentes, os métodos empregados nas pesquisas e os tipos de RCD que vêm sendo estudados.

Além disso, com o auxílio do software *VOSviewer* foram conduzidas as análises de Coocorrência de palavras-chave e Coautoria. Os mapas gerados pelo *VOSviewer* foram interpretados com base na formação de *clusters*, na proximidade entre os elementos e na intensidade das conexões, permitindo identificar padrões temáticos e relações estruturais na literatura.

Resultados e Discussão

O levantamento inicial resultou no total de 389 artigos, dos quais 190 obtidos na *Scopus* e 199 na WoS. Estes dados foram exportados para uma planilha Excel e foram submetidos a análises de duplicados, acesso de texto completo e critérios de inclusão e exclusão definidos no Protocolo de Pesquisa. Inicialmente foi feita a exclusão dos artigos duplicados, o que resultou em 117 artigos excluídos. Em seguida, os artigos foram submetidos a exclusão por tipo de pesquisa, buscando eliminar a literatura cinzenta, composta por *conference paper*, *conference review*, *book chapter* e *note*. Foram mantidos somente *research* e *review articles*, pois esses são submetidos a processos mais robustos de avaliação por pares (*peer review*). O resultado obtido nessa segunda exclusão foi de 44 artigos. Posteriormente, foram identificados os artigos que estavam impossibilitados de acesso, o que resultou em 18 excluídos. Os artigos remanescentes tiveram seus títulos e resumos lidos, considerando critérios de inclusão e exclusão, nessa etapa 40 artigos foram excluídos, restando 170 documentos para posterior análise. Em seguida, na etapa de elegibilidade, foi feita leitura de texto integral, ainda considerando critérios de inclusão e exclusão, seguida da extração de dados. Após a leitura completa dos 170 artigos, 3 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios estabelecidos. Dessa forma, 167 artigos foram classificados para este estudo. As etapas da RSL realizadas e seus resultados são apresentados na Figura 1.

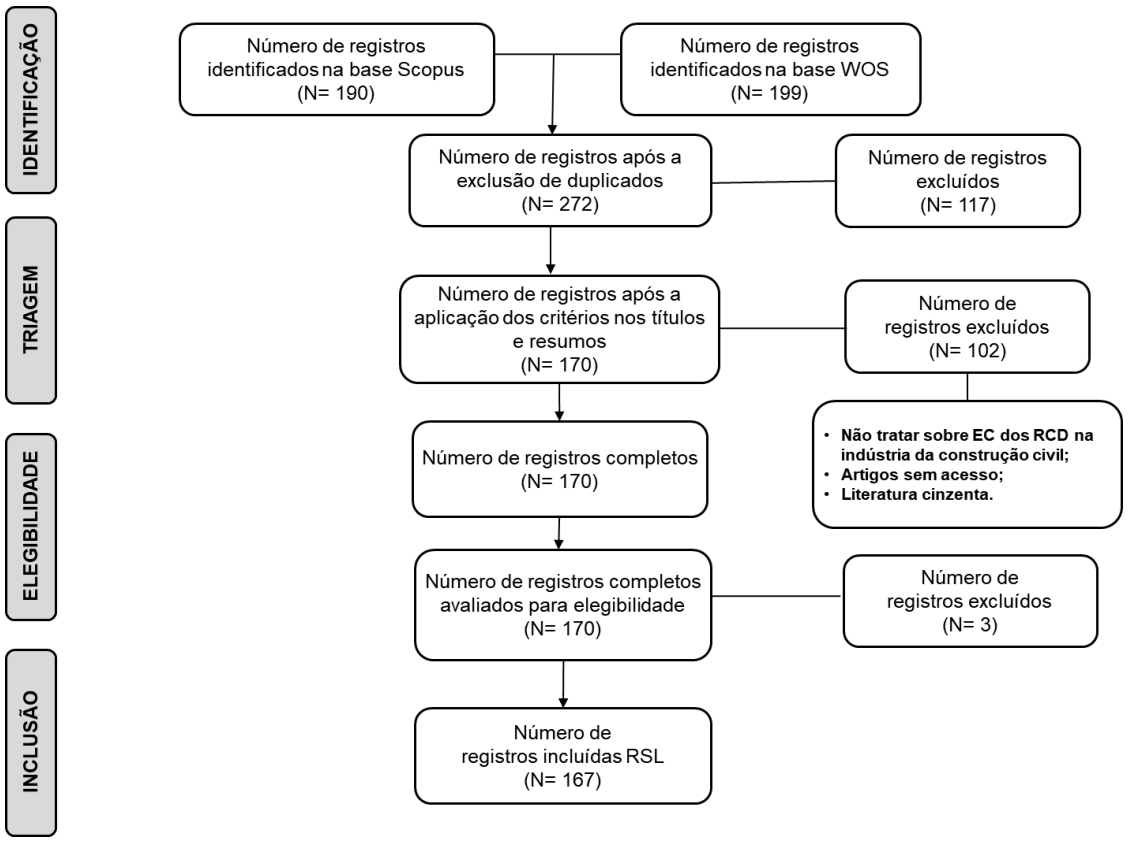


Figura 1: Fluxograma *PRISMA* da RSL.
Fonte: Moher *et al.* (2009).

A amostra final composta por 167 artigos permite observar a evolução e o contexto da produção científica sobre EC aplicada à construção civil de acordo com os parâmetros que foram extraídos.

Com o parâmetro extraído referente ao ano de publicação, foi possível avaliar a frequência de publicações ao longo dos anos, os resultados foram ordenados e foi gerada a Figura 2.

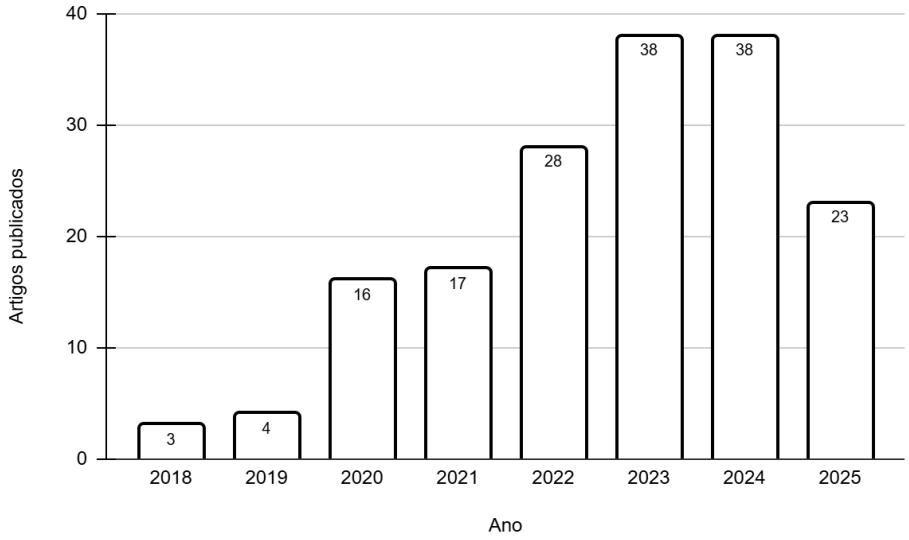


Figura 2: Evolução de publicação sobre EC na Indústria da Construção Civil por ano.
Fonte: Autores (2026).

Os dados reunidos na Figura 2 mostram que as publicações sobre o tema estiveram elevado crescimento nos últimos anos, o ano de 2025 não pode ser considerado como desvio decrescente do padrão, pois a busca de artigos na base de dados foi realizada em junho do ano de 2025, representando a quantidade de artigos que havia sido publicada somente até metade do ano. De maneira geral, esse aumento da quantidade de publicações aponta para a crescente relevância e consolidação de conceitos relacionados à EC no contexto da indústria da construção civil, evidenciando o interesse da comunidade científica em desenvolver soluções sustentáveis para o setor. Esse movimento reflete a intensificação das discussões acerca da redução de impactos ambientais, uso eficiente de recursos e gestão de resíduos, além de acompanhar demandas globais por práticas mais sustentáveis e alinhadas a políticas ambientais. Dessa forma, observa-se que a EC vem se firmando como um campo de pesquisa em expansão, com potencial de transformar os modelos tradicionais da construção civil em modelos mais sustentáveis.

Com o parâmetro extraído referente ao país, foram reunidos dados de quais países mais estão publicando artigos relacionados ao tema, os resultados foram organizados e representados na Figura 3.

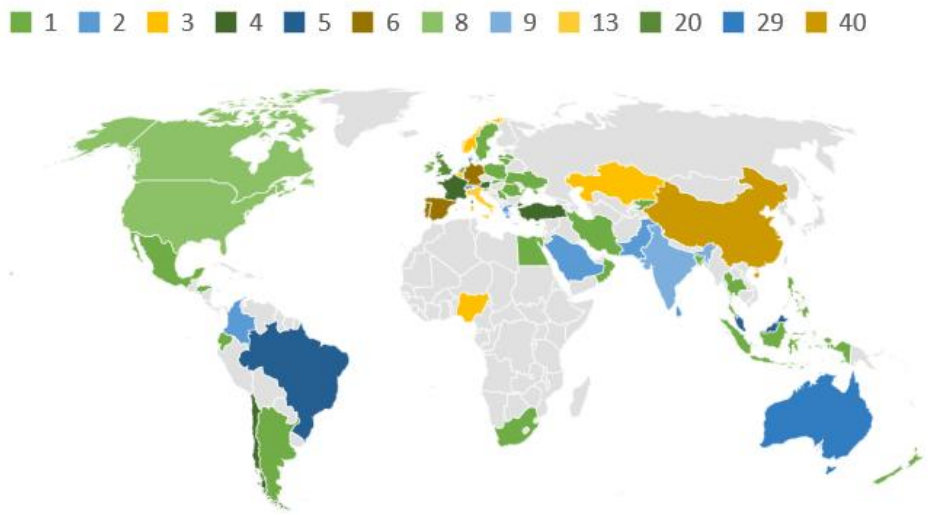


Figura 3: Número de artigos identificados na literatura sobre EC na Indústria da Construção Civil por país.
Fonte: Autores (2026).

Através da Figura 3, observa-se que a produção científica encontra-se amplamente distribuída entre diferentes países, evidenciando o caráter global das discussões sobre EC no setor da construção civil. No entanto, essa distribuição não ocorre de forma homogênea, sendo possível identificar uma concentração significativa de publicações em determinados países.

Destaca-se a liderança da China, com o maior número de artigos publicados, totalizando 40 estudos, seguida pela Austrália, com 29 publicações, e pelo Reino Unido, com 20. Esses países apresentam atuação ativa em pesquisas voltadas à

sustentabilidade e inovação no setor da construção civil, o que contribui para o avanço do surgimento de soluções viáveis de serem adotadas na prática.

Em seguida, países como Itália (13), Índia (9), Estados Unidos (8) e Canadá (8) também apresentam participação relevante, demonstrando o engajamento de economias desenvolvidas e emergentes na temática. Além disso, países europeus como Alemanha, Espanha e Portugal, com 6 publicações cada, reforçam o papel da Europa como um importante pólo de desenvolvimento de estudos sobre sustentabilidade e gestão de recursos na construção civil.

O Brasil aparece com 5 publicações, mostrando uma participação ainda moderada no cenário internacional, porém crescente, considerando o potencial do país em relação ao desenvolvimento sustentável.

Observa-se também a presença de diversos países com menor número de publicações (entre 1 e 4 artigos), incluindo nações da África, América Latina, Ásia e Europa. Essa dispersão indica que, embora o tema ainda esteja em consolidação em algumas regiões, há um interesse crescente e globalizado em oferecer a sua contribuição em diferentes perspectivas.

De maneira geral, os resultados mostram que a produção científica sobre EC na indústria da construção civil é liderada por países com maior investimento em pesquisa e desenvolvimento e por aqueles que possuem políticas ambientais mais consolidadas. Apesar disso, nota-se a expansão do tema em países emergentes, indicando uma tendência de ampliação e difusão desse campo de estudo em escala global.

O parâmetro extraído referente ao periódico teve como objetivo identificar a revista com maior número de publicações relacionadas à EC na indústria da construção civil, os dados obtidos foram reunidos na Figura 4.

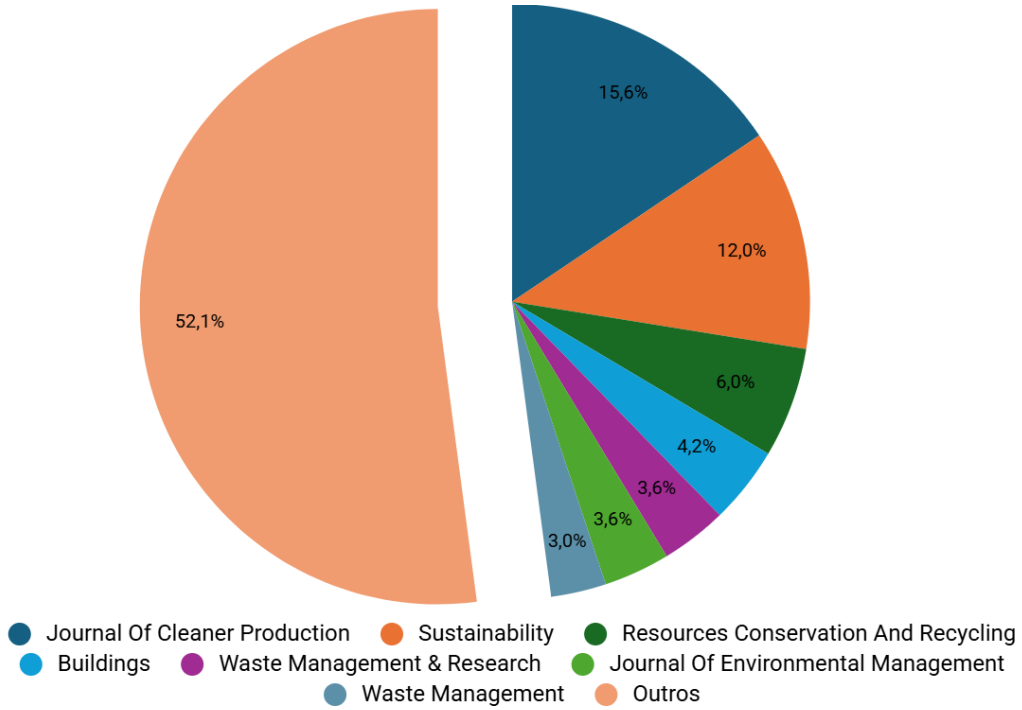


Figura 4: Número de artigos identificados na literatura sobre EC na Indústria da Construção Civil por periódico. Fonte: Autores (2026).

Na Figura 4 foram destacados os periódicos que apresentaram 5 publicações ou mais, totalizando 7 periódicos em evidência, os demais, que apresentaram 4 publicações ou menos, foram classificados na categoria "outros", composta por 55 periódicos. Com isso, pode-se perceber que há uma concentração das publicações em um número reduzido de periódicos, com destaque para os 7 periódicos evidenciados, que compõem quase a metade de todas as publicações relacionadas ao tema. Esses periódicos apresentam forte alinhamento com temas como sustentabilidade, gestão de resíduos e eficiência no uso de recursos, o que justifica sua relevância na área.

A categoria "outros", composta por 55 periódicos, exemplifica a dispersão das publicações em diferentes veículos científicos, cada um com baixa frequência individual de artigos. Esse resultado mostra que, embora existam periódicos consolidados que concentram maior volume de pesquisas, o tema também está sendo explorado em diversas áreas do conhecimento, incluindo engenharia, gestão ambiental, energia e planejamento urbano.

De maneira geral, os resultados demonstram que a produção científica sobre EC na construção civil está parcialmente concentrada em periódicos especializados em sustentabilidade e gestão ambiental, mas também apresenta caráter interdisciplinar, sendo difundida em uma ampla variedade de periódicos. Isso reforça a complexidade do tema e sua relevância para diferentes campos de pesquisa.

A análise de coocorrência de palavras-chave permitiu identificar a estrutura conceitual da literatura sobre a temática estudada, resultando na formação de *clusters* que representam diferentes linhas de pesquisa, como apresentado na Figura 5.

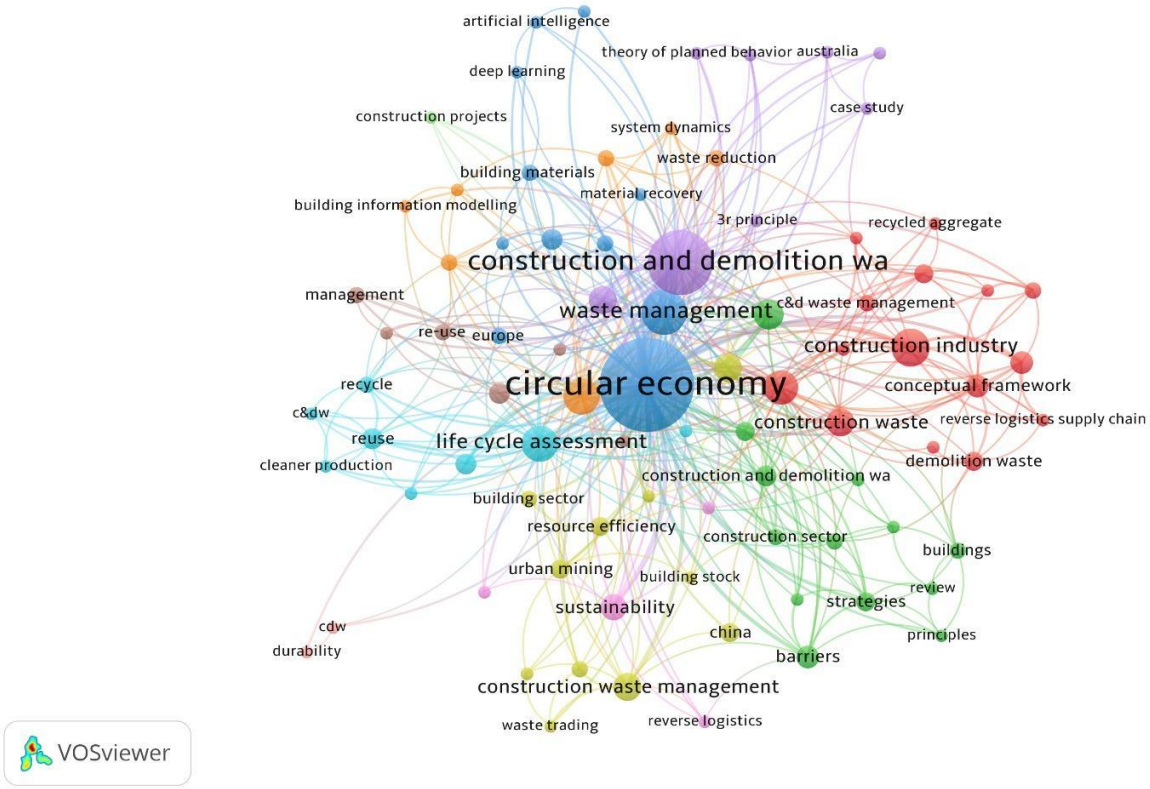


Figura 5: Rede de coocorrência de palavras-chave relacionada à Economia Circular na Indústria da Construção Civil
Fonte: Autores (2026).

Analisando a Figura 5, observa-se uma estrutura temática concentrada em torno do termo *Circular Economy*, que atua como núcleo articulador dos diferentes eixos de investigação. A proximidade e o número de conexões entre *construction and demolition waste*, *waste management* e *life cycle assessment* indicam que a operacionalização da EC na construção civil tem sido conduzida majoritariamente a partir de uma lógica de gestão de resíduos, associada à mensuração de impactos ao longo do ciclo de vida. Esse arranjo revela que o campo tem priorizado abordagens aplicadas e mensuráveis, com ênfase na eficiência material e na mitigação de impactos ambientais.

A partir da análise dos 167 artigos selecionados, foi possível observar que a literatura tem se concentrado, predominantemente, em estratégias relacionadas à gestão de resíduos, como a reciclagem e a reutilização, o que indica uma associação entre EC e práticas operacionais já consolidadas no setor (Ghisellini et al., 2018; Nadazdi et al., 2022). Esse resultado é reforçado pela análise de coocorrência de palavras-chave, na qual esses termos aparecem como elementos centrais na rede. Por outro lado, a presença de termos relacionados à cadeia de suprimentos e LR sugere um avanço da literatura em direção a abordagens mais integradas, ainda que essas discussões não se apresentem com o mesmo nível de consolidação. Da mesma forma, a identificação de tecnologias como BIM e IA indica o surgimento de novas possibilidades de pesquisa, como no apoio à gestão de informações e à tomada de decisão (Hossain et al., 2020).

A partir da análise dos agrupamentos, é possível identificar pelo menos três dimensões principais: (i) *Cluster* operacional, (ii) *Cluste*r sistêmico e (iii) *Cluster* emergente.

O *cluster* operacional está relacionado à gestão de resíduos, esse cluster é formado por termos como *recycling*, *reuse*, *waste reduction* e *construction waste management*. Esse conjunto reflete a abordagem mais consolidada da literatura, centrada na aplicação dos princípios dos 3Rs (reduzir, reutilizar e reciclar). Os estudos associados a esse cluster tendem a focar em soluções técnicas para reaproveitamento de materiais e redução do volume de resíduos. Esse cluster mostra que a EC, no contexto da construção, ainda é frequentemente tratada como uma extensão das práticas de gestão de resíduos, e não como uma mudança sistêmica no modelo produtivo.

O *cluster* sistêmico relaciona-se com a cadeia de suprimentos e logística, envolvendo termos como *reverse logistics*, *supply chain* e *waste trading*. Esses termos indicam uma ampliação da análise para uma perspectiva mais integrada, na qual os fluxos de materiais passam a ser considerados ao longo de toda a cadeia produtiva. Esse cluster representa um avanço conceitual, ao deslocar o foco da gestão local de resíduos para a organização sistêmica dos fluxos. No entanto, sua menor densidade em relação ao cluster operacional sugere que essa abordagem ainda está sendo consolidada na literatura.

O *cluster* emergente é referente a tecnologias e avaliação, com a presença de termos como *building information modelling* (BIM), *artificial intelligence*, *deep learning*, *life cycle assessment* e *resource efficiency*. Apesar desses termos

aparecerem com menor frequência, sua conexão com os demais indica uma tendência emergente na literatura, relacionada ao uso de tecnologias digitais e ferramentas analíticas no apoio à EC. Esse *cluster* sugere uma mudança de direção no campo, com incorporação de ferramentas que permitem maior controle, rastreabilidade e otimização dos processos.

A análise da rede como um todo mostra que há concentração em práticas já consolidadas, as abordagens sistêmicas ainda são secundárias e as tecnologias emergentes aparecem como elementos de conexão entre diferentes temas. A estrutura da rede indica um campo em transição, no qual abordagens tradicionais coexistem com novas perspectivas ainda em desenvolvimento.

A análise de coautoria permitiu visualizar como a produção científica está organizada em termos de colaboração entre pesquisadores, representado na Figura 6.

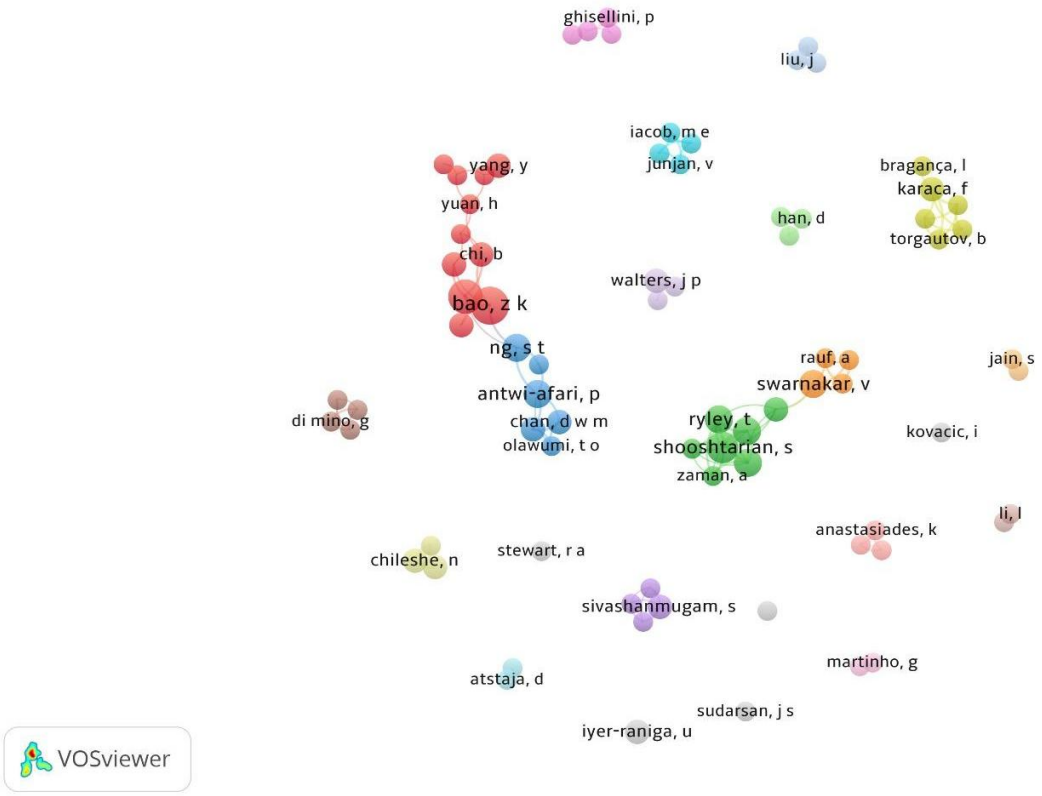


Figura 6: Rede de coautoria entre autores relacionada à Economia Circular na Indústria da Construção Civil
Fonte: Autores (2026).

A rede de coautoria apresentada exemplifica um campo científico ainda fragmentado, cuja dinâmica de colaboração se organiza em núcleos relativamente isolados. A centralidade observada em determinados autores indica não apenas maior produtividade, mas um papel estrutural na articulação do conhecimento, funcionando como intermediários entre subgrupos que, de outra forma, permaneceriam desconectados. Esse padrão sugere uma dependência de poucos atores para a circulação de ideias, o que pode limitar a diversidade de perspectivas e retardar a difusão de abordagens inovadoras no campo temático. A configuração dos *clusters* revela a formação de comunidades científicas com forte coesão interna e baixa interação externa, essa modularidade indica que os fluxos de conhecimento tendem a ocorrer predominantemente dentro dos próprios grupos, reforçando abordagens teóricas e metodológicas já consolidadas em cada núcleo. Tal característica pode estar associada a barreiras institucionais, geográficas e até mesmo epistemológicas, que dificultam a integração entre diferentes agendas de pesquisa. Em campos científicos mais consolidados, espera-se uma malha mais densa, com múltiplos caminhos de interação entre pesquisadores, no caso em análise, a escassez de ligações entre *clusters* sugere que o conhecimento ainda circula de forma restrita, o que pode comprometer a consolidação de paradigmas comuns e a evolução teórica do tema. Outro aspecto é a distribuição espacial implícita na formação dos grupos, que aponta para uma produção científica influenciada por contextos regionais, isso tende a direcionar o foco das pesquisas para realidades locais, o que, embora contribua para a profundidade contextual, pode dificultar a construção de soluções generalizáveis. Diante desse panorama, a estrutura da rede indica um campo em estágio de amadurecimento, no qual a ampliação da colaboração científica se apresenta como um elemento necessário para o avanço do conhecimento. O fortalecimento de conexões entre *clusters*, a diversificação das parcerias e a redução da dependência de autores altamente centrais tendem a contribuir para uma produção mais integrada, favorecendo à consolidação da EC na indústria da construção civil como um domínio científico mais coeso e estruturado.

A integração entre os resultados da RSL e das análises bibliométricas permite uma compreensão mais ampla do campo de estudo. Enquanto a RSL evidencia o predomínio de estudos voltados à gestão de resíduos, a análise de coocorrência confirma

essa tendência ao mostrar a centralidade de termos associados à reciclagem e reutilização. Ao mesmo tempo, a presença de *clusters* relacionados à cadeia de suprimentos e tecnologias indica que a literatura começa a incorporar novas abordagens.

No entanto, essas diferentes linhas de pesquisa ainda não estão plenamente integradas, o que pode explicar a dificuldade de aplicação prática das estratégias de EC no setor. Os resultados indicam que o campo apresenta avanços importantes, mas ainda carece de integração entre abordagens operacionais, sistêmicas e tecnológicas, o que representa uma das principais lacunas da literatura.

Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo analisar o panorama da produção científica sobre EC na indústria da construção civil, com foco nos RCD, por meio de uma abordagem bibliométrica baseada em uma RSL.

Os resultados sugerem que o campo de estudo se encontra em processo de consolidação, caracterizado pela coexistência de abordagens tradicionais, voltadas à gestão de resíduos, e perspectivas emergentes, associadas à integração de processos e ao uso de tecnologias. Nesse contexto, observa-se que a EC vem sendo gradualmente incorporada às discussões relacionadas à sustentabilidade na construção civil, ampliando o debate para além da destinação de resíduos e envolvendo aspectos relacionados à eficiência de recursos, rastreabilidade de materiais e integração entre os diferentes agentes da cadeia produtiva.

Como contribuição, o estudo permite compreender como a produção científica sobre EC na construção civil vem se estruturando, além de identificar tendências, lacunas e direcionamentos de pesquisa relacionados ao tema. Para pesquisas futuras, sugere-se o aprofundamento qualitativo dos estudos identificados nesta revisão, a partir da leitura integral dos artigos e do mapeamento de estratégias e aplicações práticas relacionadas à EC na construção civil.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia (PPGTEC) pelo suporte acadêmico e institucional ao desenvolvimento desta pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de pesquisa.

Referências Bibliográficas

AKBARIEH, A.; JAYASINGHE, L. B.; WALDMANN, D.; TEFERLE, F. N. BIM-based end-of-lifecycle decision making and digital deconstruction: literature review. Sustainability (Switzerland), v. 12, n. 7, p. 2670, 2020. DOI: 10.3390/su12072670.

ALENCAR, M.; LIMA, C.; MENDONÇA, R. A Contribution of Design to the Waste Problem Generated by the Construction Industry. Convergences - Journal of Research and Arts Education, v. 16, n. 32, p. 15–23, 2023. DOI: 10.53681/c1514225187514391s.32.199.

BHAVSAR, V.; SRIDHARAN, S. R.; SUDARSAN, J. S. Barriers to circular economy practices during construction and demolition waste management in an emerging economy. Resources, Conservation and Recycling Advances, v. 20, art. 200198, dez. 2023. DOI: 10.1016/j.rcradv.2023.200198.

BILAL, M.; KHAN, K. I. A.; THAHEEM, M. J.; NASIR, A. R. Current state and barriers to the circular economy in the building sector: towards a mitigation framework. Journal of Cleaner Production, v. 276, p. 123250, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123250.

CHEN, W.; JIN, R.; XU, Y.; WANATOWSKI, D.; LI, B.; YAN, L.; PAN, Z.; YANG, Y. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: a review of the scientific literature. Construction and Building Materials, v. 218, p. 483–496, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.130.

CRAWFORD, R. H. Greenhouse Gas Emissions of Global Construction Industries. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1218, n. 1, p. 012047, 2022. DOI: 10.1088/1757-899x/1218/1/012047.

FONSECA, F. C.; CÁRCEL-CARRASCO, J.; PRECIADO, A.; MARTÍNEZ-CORRAL, A.; MONTOYA, A. S. Comparative analysis of the European regulatory framework for C&D waste management. Advances in Civil Engineering, v. 2023, art. 6421442, 2023. DOI: 10.1155/2023/6421442.

GHISELLINI, P.; JI, X.; LIU, G.; ULGIATI, S. Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: a review. Journal of Cleaner Production, v. 195, p. 418–434, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.084.

GIORGI, S.; LAVAGNA, M.; WANG, K.; OSMANI, M.; LIU, G.; CAMPIOLI, A. Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices. Journal of Cleaner Production, v. 336, p. 130395, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130395.

HOSSAIN, M. U.; NG, S. T.; ANTWI-AFARI, P.; AMOR, B. Circular economy and the construction industry: existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 130, 109948, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109948.

HOSSEINI, Z.; LARATTE, B.; BLANCHET, P. Implementing circular economy in the construction sector: evaluating CE strategies by developing a framework. BioResources, v. 18, n. 3, p. 4699–4722, 2023. DOI: 10.15376/biores.18.3.4699-4722.

LINS, E. J. M.; PALHA, R. P.; SOBRAL, M. D. C. M.; ARAÚJO, A. G. D.; MARQUES, É. A. T. Application of Building Information Modelling in Construction and Demolition Waste Management: systematic review and future trends supported by a conceptual framework. Sustainability (Switzerland), v. 16, n. 21, art. 9425, nov. 2024. DOI: 10.3390/su16219425.

LIU, J.; WU, P.; JIANG, Y.; WANG, X. Explore potential barriers of applying circular economy in construction and demolition waste recycling. Journal of Cleaner Production, v. 326, art. 129400, 1 dez. 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129400.

MAHPOUR, A. Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. Resources, Conservation and Recycling, v. 134, p. 216–227, jul. 2018. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.01.026.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. PLoS Medicine, v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009. DOI: 10.1371/journal.pmed.1000097.

NADAZDI, A.; NAUNOVIC, Z.; IVANISEVIC, N. Circular economy in construction and demolition waste management in the Western Balkans: a sustainability assessment framework. Sustainability (Switzerland), v. 14, n. 2, 2022. DOI: 10.3390/su14020871.

OSSIO, F.; SALINAS, C.; HERNÁNDEZ, H. Circular economy in the built environment: a systematic literature review and definition of the circular construction concept. Journal of Cleaner Production, v. 414, art. 137738, 15 ago. 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137738.

OXFORD ECONOMICS. Future of construction: a global forecast for construction to 2030. Setembro de 2021. Disponível em: https://www.marsh.com/content/dam/marsh/Documents/PDF/it/it/The_Future_of_Construction_ExecSum_2021.pdf. Acesso em: jul. 2025.

RAO, P. A.; RAHMAN, M. M.; DURAMAN, S. B. Adopting circular economy in construction: a review. Frontiers in Built Environment, v. 11, art. 1519219, 2025. DOI: 10.3389/fbuil.2025.1519219.

TORGAUTOV, B.; ZHANABAYEV, A.; TLEUKEN, A.; TURKYILMAZ, A.; MUSTAFA, M.; KARACA, F. Circular economy: challenges and opportunities in the construction sector of Kazakhstan. Buildings, v. 11, n. 11, art. 501, nov. 2021. DOI: 10.3390/buildings11110501.

WIT, M.; VERSTRAETEN-JOCHEMSEN, J.; HOOGZAAD, J.; KUBBINGA, B. de. The Circularity Gap Report 2019. In: Closing the circularity gap in a 9% world. v. 2, 2019. Disponível em: https://sinapse.gife.org.br/download/the-circularity-gap-report-2019. Acesso em: jul. 2025.

YU, Y. F.; JUNJAN, V.; YAZAN, D. M.; IACOB, M. E. A systematic literature review on Circular Economy implementation in the construction industry: a policy-making perspective. Resources, Conservation and Recycling, v. 183, art. 106359, ago. 2022. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106359.

PLACAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO DE CONCRETO EMBORRACHADO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E CONTRIBUIÇÃO À ECONOMIA CIRCULAR

1 Maria Eduarda Vele Martins; 2 Ana Maria Gonçalves Duarte; 3 Diego José Araújo Viégas; 4 Valter Ferreira de Souza Neto; 5 Arthur Nóbrega de Souza; 6 Auanny Alícia Alves da Silva; 7 Brenda Maria Barreto de Souza; 8 Jaqueline Cássia de Amorim

1 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG, e-mail: duda.velez@hotmail.com; 2 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG, e-mail: ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br; 3 Universidade Federal de Pernambuco-UPE, e-mail: diegoaraujoviegas@hotmil.com; 4Universidade Federal de Campina Grande -UFCG ,e-mail: valterneto51@gmail.com; 5 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG ,e-mail:arthur.sousa@estudante.ufcg.edu.br; 6 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG ,e-mail:auannyaliciasilva@gmail.com; 7 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG ,e-mail:brenda.barreto@estudante.ufcg.edu.br; 8 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG, e-mail:jaquelynne.amorim@gmail.com

Palavras-chave: Resíduo de pneu; Construção sustentável; Gerenciamento de resíduos.

Resumo

A busca por sustentabilidade na construção civil tem impulsionado o reaproveitamento de resíduos sólidos como estratégia para reduzir impactos ambientais e otimizar o uso de recursos naturais. Este estudo se alinha aos princípios da economia circular ao transformar pneus inservíveis em matéria-prima, reinserindo esse material na cadeia produtiva. O trabalho avaliou o desempenho mecânico de placas tipo sanduíche produzidas com um núcleo de concreto contendo diferentes teores de borracha (5%, 10%, 20% e 30%) em substituição aos agregados tradicionais. Os ensaios de resistência à compressão, realizados após 28 dias de cura, indicaram que a resistência do material diminui conforme a quantidade de borracha aumenta. Os resultados variaram de 21,383 MPa (para o teor de 5%) a 9,269 MPa (para o teor de 30%). Embora o compósito não tenha atingido a resistência mínima de 35 MPa exigida para pavimentos intertravados de alto tráfego, o estudo demonstra a viabilidade do material para aplicações não estruturais. A relevância da pesquisa reside na possibilidade de criar componentes construtivos que aproveitem as propriedades naturais da borracha, como o isolamento térmico e acústico, promovendo uma construção mais eficiente. Conclui-se que o uso do concreto emborrachado fortalece a gestão de resíduos e oferece uma alternativa economicamente viável, transformando um passivo ambiental em um novo produto para o setor construtivo.

Introdução

O cenário contemporâneo da gestão de resíduos sólidos urbanos e industriais revela um desafio crítico e crescente referente ao descarte de polímeros elastoméricos. Dentre essa problemática, destaca-se o expressivo volume de borrachas de pneus provenientes da indústria automobilística. Segundo Scanavacca Júnior (2025), o Brasil descarta anualmente cerca de 100 milhões de unidades, um passivo ambiental que, devido à sua composição não biodegradável, pode persistir por séculos na biosfera. A contaminação decorrente do manejo inadequado impacta diretamente o solo, os recursos hídricos e a atmosfera, exigindo soluções que transcendam a mitigação e foquem na regeneração sistêmica.

Diante desse cenário dos sistemas de descarte, a economia circular propõe a reintegração desses resíduos em cadeias produtivas de alto desempenho. Simultaneamente, o setor construtivo atravessa um período de expansão contínua, responsável por movimentar um montante aproximado de R$ 325,1 bilhões de reais no ano de 2020 (IBGE, 2020). No entanto, essa expansão reacende discussões acerca das emissões de gases poluentes associadas à alta produção de concreto na indústria cimentícia, sendo ela responsável por 8% das emissões mundiais de CO_2 (Santos, 2023).

Nesse panorama, a convergência entre a engenharia civil e as práticas de sustentabilidade deixa de ser uma opção teórica para tornar-se uma necessidade técnica. O reaproveitamento de resíduos poliméricos, como o resíduo de borracha de pneu, apresenta-se não apenas como uma alternativa de mitigação de impactos ambientais, mas como um insumo de alto valor agregado para a incorporação em concretos convencionais. A incorporação desses resíduos à matriz, além de uma solução para a redução de descartes, promove uma transferência de propriedades mecânicas do polímero, como a alta elasticidade e resiliência, ao concreto.

Nesse viés, estudos de Nascimento (2020) e Lima (2020) corroboram que a modificação elastomérica proporciona incrementos substanciais no desempenho térmico e acústico das edificações, alinhando-se aos princípios de ecoeficiência. Além disso, a viabilidade econômica é potencializada pelo aumento do rendimento volumétrico do compósito e pela redução de custos operacionais e de extração de matéria-prima virgem (Silva, 2019).

Nesse contexto, o presente trabalho visa analisar o comportamento mecânico de uma placa sanduíche com núcleo de concreto emborrachado, avaliando a resistência à compressão em teores de 5%, 10%, 20% e 30%. A pesquisa justifica-se pelo potencial sustentável do produto e pela possibilidade de conferir propriedades específicas e otimizadas ao concreto convencional. Espera-se, com este estudo, consolidar evidências técnico-científicas que não apenas favoreçam a adoção de boas práticas no gerenciamento de resíduos sólidos, mas que também fomentem o desenvolvimento de uma construção civil mais resiliente, econômica e ambientalmente equilibrada.

Material e Métodos

Para a condução deste estudo experimental, foram selecionados materiais criteriosamente definidos. Como aglomerante, utilizou-se o cimento Portland CP V-ARI, adquirido no comércio local de Campina Grande – PB. Os agregados convencionais consistiram em areia média natural e brita granítica 0 (conhecida como "cascalhinho"), esta última apresentando diâmetro máximo de 9,5 mm. A hidratação da mistura foi realizada com água potável proveniente da rede pública de abastecimento (CAGEPA). Além desses, empregou-se o resíduo de borracha de pneus de caminhão inservíveis, de módulo de finura de 5,1 e diâmetro máximo (Dmáx) de 3,36 mm, destinado à adição nos núcleos dos painéis sanduíche (Figura 01).



Figura 01: Resíduo de borracha de pneu utilizado.
Fonte: Os autores (2026)

Para a moldagem dos corpos de prova, utilizou-se o traço de 1:1,5:1,5, em proporções volumétricas de cimento Portland, que corresponde ao aglomerante, de areia média (equivalente ao agregado miúdo) e de brita 0 (o agregado graúdo). Visando obter melhores resultados de resistência, os teores de borracha adotados não foram incorporados como substituição, mas sim como adição, com percentuais calculados em relação à massa total do concreto. Portanto, para a presente pesquisa, adotou-se teores de 5%, 10%, 20% e 30%, objetivando obter resultados significativos do comportamento mecânico em diferentes proporções.

O fator de água/cimento, por sua vez, precisou ser alterado para cada composição feita para manter a trabalhabilidade do compósito. Nesse sentido, as placas rígidas externas, compostas exclusivamente por concreto, fizeram uso de um fator de 0,45, enquanto os núcleos emborrachados utilizaram-se dos valores ilustrados na Tabela 1.

Nomenclatura	Teor de borracha	Fator água/cimento (a/c)
CREF	-	0,45
CBP5	5%	0,46
CBP10	10%	0,48
CBP20	20%	0,55
CBP30	30%	0,60

Tabela 01: Fator água/cimento associado ao teor de borracha.
Fonte: Os autores (2026).

Nesse sentido, os corpos de prova foram moldados em fôrmas prismáticas, de dimensões 10 cm x 20cm x 6 cm, conforme o ilustrado na Figura 02.

Para a moldagem, colocou-se a primeira face composta somente por concreto, seguido do núcleo emborrachado e, por fim, a última camada de concreto convencional, particionando-as em espessuras de 2 cm para totalizar a altura em 6 cm (Figura 03).



Figura 02: Corpos de prova moldados.
Fonte: Os autores (2026)

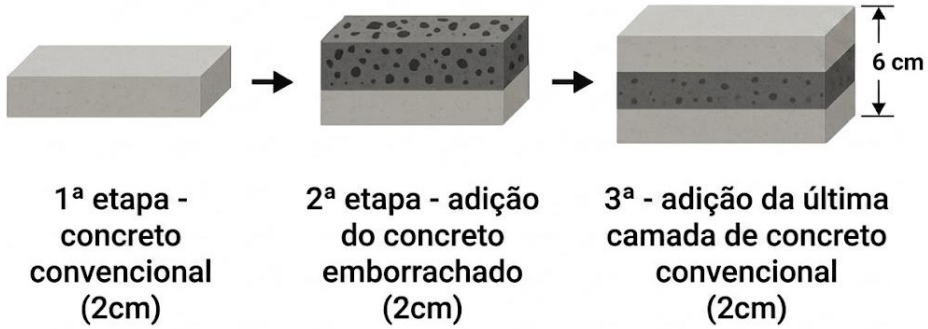


Figura 03: Método de produção das placas sanduíche.
Fonte: Os autores (2026)

Visando a adesão das camadas, porém evitando gerar a mistura do conjunto, descaracterizando a placa sanduíche, procurou-se determinar um tempo que atendesse tais solicitações. Portanto, realizaram-se intervalos de uma hora para cada etapa supracitada. Ademais, para a obtenção de resultados representativos, foram moldados 6 corpos de prova para cada teor. Optou-se pela cura imersa para os compósitos, mantendo-os em um tanque de água por 28 dias, período necessário para que o concreto atinja a resistência máxima.

Nesse viés, para verificar o comportamento mecânico dos corpos de prova, realizou-se o ensaio de resistência à compressão, que determina a tensão máxima suportada por um corpo de prova antes da ruptura. Desse modo, o procedimento consiste na aplicação de uma carga axial com taxa constante e controlada, executada em uma prensa Cyber-Tronic, modelo YIMC109, com capacidade de 150 toneladas. O experimento foi conduzido no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

É admitido, portanto, que as resistências à compressão obedeçam à distribuição normal, com o valor característico sendo estimado pela Equação 1.

$$f_{ck,est} = f_p - (t \cdot s) \quad (01)$$

Onde é f_p é a resistência média das peças, $f_{ck,est}$ é a resistência característica estimada onde à compressão, s é o desvio-padrão da amostra e t é o coeficiente de Student, em função do tamanho da amostra.

Resultados e Discussões

A partir do ensaio realizado, obtiveram-se os dados detalhados na Tabela 2. Nesse sentido, é possível elaborar uma análise comparativa entret os corpos de prova e a evolução de suas respectivas resistências. Supondo a utilização como peças intertravadas para pavimentação, observa-se que a resistência mínima de 35 MPa não foi atingida, conforme o estabelecido pela NBR 9781 (ABNT, 2013), o que pode ser justificado pelo volume de borracha triturada, pela falta ausência de interação química entre o polímero e a matriz cimentícia e pela falta de aderência exercida pela borracha.

Corpos de Prova	**Teores de Borracha**			
	5%	**10%**	**20%**	**30%**
1	19,054 MPa	18,500 MPa	12,421 MPa	8,045 MPa
2	19,195 MPa	20,000 MPa	15,937 MPa	9,457 MPa
3	12,985 MPa	19,050 MPa	15,643 MPa	9,598 MPa
4	20,042 MPa	17,421 MPa	13,856 MPa	8,751 MPa
5	28,934 MPa	17,796 MPa	14,114 MPa	9,315 MPa
6	28,087 MPa	19,337 MPa	12,856 MPa	10,445 MPa
Média	**21,383 MPa**	**18,684 MPa**	**14,138 MPa**	**9,269 MPa**
Desvio Padrão	**6,074**	**0,971**	**1,426**	**0,812**

Tabela 02: Resistência à compressão de placas sanduíche com núcleo emborrachado: média de 6 corpos de prova (MPa). Fonte: Os autores (2026)

Ademais, observa-se uma perda de resistência associada ao aumento do teor de borracha (Figura 8), demonstrando que porcentagens inferiores de borracha apresentam uma maior viabilidade prática quando comparados aos demais. Desse modo, o corpo de prova com 5% de borracha apresentou o melhor desempenho dentre os compósitos estudados.

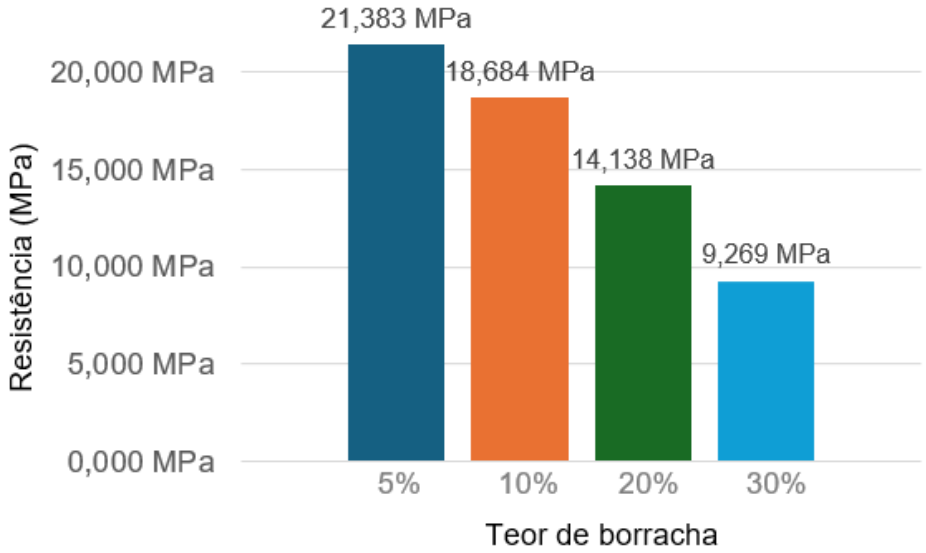


Figura 03: Comportamento da resistência à compressão simples na placa sanduíche. Fonte: Os autores (2026)

Os resultados obtidos corroboram com as observações de Silva et al. (2023), que relataram uma queda considerável na resistência à compressão à medida que o teor de borracha era elevado. Segundo a análise bibliográfica realizada por Lucena et al. (2020), esse comportamento é atribuído ao maior consumo de água necessário para manter a trabalhabilidade (abatimento) da mistura, somado ao aumento dos índices de vazios gerados pela presença dos agregados reciclados no interior da matriz cimentícia.

Embora a inserção de resíduos de borracha tenha ocasionado uma redução na resistência, o compósito resultante apresenta características que viabilizam sua aplicação em elementos não estruturais de alto desempenho funcional. Devido às suas propriedades de amortecimento, isolamento térmico e baixa densidade, o concreto emborrachado demonstra grande potencial para a fabricação de painéis de vedação, blocos de preenchimento e contrapisos acústicos. Além disso, a viabilidade econômica advinda do reaproveitamento do resíduo representa uma grande vantagem nas aplicações supracitadas.

Considerações Finais

O presente estudo cumpriu seu objetivo de analisar o comportamento mecânico de placas sanduíche compostas por núcleo de concreto emborrachado, permitindo uma compreensão clara da relação entre a sustentabilidade dos materiais e seu desempenho estrutural. A partir dos ensaios realizados, confirmou-se a hipótese de que a resistência à compressão é inversamente proporcional ao teor de resíduo de pneu incorporado. Os teores mais elevados (20% e 30%) apresentaram as quedas mais expressivas de resistência, corroborando a literatura técnica que atribui esse fenômeno ao aumento do índice de vazios e à menor aderência na zona de transição entre o polímero e a pasta de cimento.

Entretanto, a redução da resistência mecânica não inviabiliza o produto, mas sim redefine seu campo de aplicação. Os resultados demonstram que, para teores mais baixos, como 5% e 10%, o material mantém uma integridade que, aliada à configuração de placa sanduíche, oferece um equilíbrio promissor para o setor construtivo. A geometria do compósito — com faces rígidas protegendo o núcleo — mitiga a fragilidade mecânica da borracha, permitindo que o conjunto aproveite as propriedades benéficas do resíduo, como a redução da densidade e o potencial ganho em isolamento termoacústico.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a placa sanduíche com concreto emborrachado possui viabilidade técnica para aplicações não estruturais. Entre as utilizações sugeridas, destacam-se painéis de vedação interna, barreiras acústicas e elementos de isolamento térmico. Para esses casos, a funcionalidade e o conforto se mostram essenciais, áreas onde a borracha agrega valor técnico superior ao concreto convencional.

Por fim, este trabalho reforça a relevância da economia circular na construção civil. A utilização de pneus inservíveis como agregado contribui diretamente para a logística reversa desse passivo ambiental, diminuindo o descarte inadequado e a pressão sobre os recursos naturais. Como recomendações para estudos futuros, sugere-se a realização de ensaios de condutividade térmica e atenuação sonora, bem como a análise da durabilidade frente a agentes externos, a fim de consolidar a placa sanduíche como uma alternativa sustentável, segura e eficiente para o mercado.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo suporte institucional e pela infraestrutura acadêmica que possibilitaram a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013) NBR 9781**. Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT.

IBGE. **Ocupação cresce, mas salários caem na indústria da construção em 2020**. Agência de Notícias, Rio de Janeiro, 15 jun. 2022. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/34112-ocupacao-cresce-mas-salarios-caem-na-industria-da-construcao-em-2020. Acesso em: 3 mai. 2026.

LIMA, Francisco Cleuton da Cunha; SILVA, Wigor da Paz. **Investigação de contrapisos com borracha triturada como material agregado para isolamento de ruído de impacto**. 2020. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2020.

LUCENA, Rafael Freire de Araújo; ANGELINO, Cristiane Aparecida Costa; SILVA, Pedro Henrique França da; OLIVEIRA, Rosângela Guimarães de. **Concreto com adição de borracha de pneu**. Revista Mangaio Acadêmico, v. 5, n. 1, p. 43-57, jan./jun. 2020. Disponível em: https://estacio.periodicoscientificos.com.br/index.php/mangaio/article/download/1560/1279.Acesso em: 30 abr. 2026.

NASCIMENTO, Ubiraci Silva. **Borracha de pneus no isolamento térmico de paredes e tetos**: modelagem, validação e comparação com paredes convencionais. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

SANTOS, Mateus. Identification of environmental impacts caused by the cement industry in Brazil. **Natural Resources**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 44–55, 2023. DOI: 10.6008/CBPC2237-9290.2023.002.0006. Disponível em: https://sustenere.inf.br/index.php/naturalresources/article/view/8246. Acesso em: 3 mai. 2026.

SCANAVACCA JÚNIOR, Laerte. **Artigo - Reciclagem de pneus inservíveis: avanços, aplicações e perspectivas no Brasil.** Embrapa, 3 out. 2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/103505979/artigo---reciclagem-de-pneus-inserviveis-avancos-aplicacoes-e-perspectivas-no-brasil. Acesso em: 3 mai. 2026.

SILVA, Luzilene Souza; MOUTA, José de Ribamar; COSTA, Marília Cristina Barata da; GOMES, Laércio Gouvêa. **Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, n. 2, e-12361, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0676. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/NnFfC5Wz6P6X7V8XyQzR5nF/?lang=pt. Acesso em: 3 mai. 2026.

SILVA, Ligia Maria Mendes; VAZ, Vinicius Nazario; MOREIRA, Karla Cristina Bentes; BARBOSA, João Noleto. **Avaliação do uso de borracha de pneu como substituição parcial no concreto convencional**. JNT-Facit Business and Technology Journal, [S. l.], v. 2, ed. 42, p. 750-762, 2023. Disponível em: http://revistas.faculdadefacit.edu.br. Acesso em: 3 mai. 2026.

OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE BIOPROCESSOS: MELAÇO DE SOJA COMO SUBSTRATO PARA A PRODUÇÃO DE PROTEÍNA RECOMBINANTE (sfGFP)

1 Milena de Freitas Trindade Mota, 2 Luís Carvalho Pacheco, 3 Larissa Stefane Figueiredo, 4 César Piedrahita Aguirre, 5 Elaine Magalhães Cabral Albuquerque

1 Universidade Federal da Bahia-UFBA, e-mail: milenatrindade@ufba.br ; 2 Universidade Federal da Bahia- UFBA, e-mail: LGCPacheco@gmail.com ; 3 Universidade Federal da Bahia-, e-mail: larissatfg@gmail.com, 4 Universidade Federal da Bahia-, e-mail: cesar.aguirre@ufba.br; 5 Universidade Federal da Bahia-, e-mail: elainecmca@ufba.br

Palavras-chave: bioeconomia; upcycling; sustentabilidade

Resumo

A produção de proteínas recombinantes é um pilar da bioeconomia, porém, o uso de meios complexos comerciais e indutores químicos onerosos e tóxicos limita seu escalonamento e sustentabilidade. Como alternativa, este trabalho propõe a aplicação do conceito de "*upcycling"* ao melaço de soja, subproduto da agroindústria da soja, utilizado na produção de ração animal e altamente poluente quando descartado inadequadamente. O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade do subproduto, combinado à lactose como indutor, como substituto do IPTG, na expressão da proteína verde fluorescente *super-dobrável* (sfGFP) em *Escherichia coli* BL21(DE3). Empregou-se um Delineamento Composto Central (DCC) para avaliar as concentrações de melaço e de lactose. Os resultados evidenciaram que a janela de indução atua como o Parâmetro Crítico de Processo (CPP). Cultivos induzidos rigorosamente na DO_{600}=0,6 alcançaram as maiores concentrações de sfGFP, atingindo 362 µg/mL. Ao comparar com dados da literatura referentes à mesma linhagem e ao vetor, a expressão em meio LB com IPTG atingiu 188 µg/mL; os resultados indicam um potencial de incremento no rendimento produtivo, aproximadamente 94,6%. Conclui-se que o bioprocesso desenvolvido sugere robustez frente às variações de concentração do melaço de soja e maior eficiência em relação aos insumos convencionais , apontando como uma estratégia biotecnológica promissora para a economia circular.

Introdução

A produção de proteínas recombinantes consolidou-se como um pilar fundamental da bioeconomia global. Embora historicamente associada à indústria farmacêutica, a tecnologia do DNA recombinante é hoje indispensável para viabilizar aplicações industriais de larga escala. (Shanmugaraj; Bulaon ; Phoolcharoen, 2020;Moses Kelas et al., 2025) No entanto, o crescimento de microrganismos em processos fermentativos requer a formulação de meios de cultura complexos para fornecer as fontes adequadas de carbono, nitrogênio e micronutrientes. Sob a perspectiva econômica, os meios comerciais complexos, baseados em extrato de levedura, peptona e glicose pura, são onerosos e aumentam significativamente os custos de produção, dificultando, inclusive, as etapas de downstream, como a purificação das proteínas (Lorence; Balbas, 2004; Sabalza; Cardoso et al., 2020).

Uma estratégia emergente e sustentável para superar tais obstáculos é a integração da cadeia de bioprocessos com a agroindústria através do conceito de *upcycling*. Diferente da reciclagem convencional, o *upcycling* propõe a transformação de subprodutos de baixo valor e impacto ambiental negativo em materiais de qualidade superior e alto valor comercial, aplicáveis na produção de biocombustíveis, biomateriais e biocompostos (Sung, 2015; Almaraz-Sánchez et al., 2022). Nesse contexto, uma alternativa viável é o uso de subprodutos agroindustriais que não apenas propiciem alta produção de biomassa, mas também reduzam os custos de produção em faixas estimadas de 62% a 86%, impulsionando a bioeconomia e a economia circular (Galante et al., 2023; Acosta-Piantini et al., 2023).

O Brasil, consolidado como o maior produtor e exportador mundial de soja, ocupa uma posição privilegiada para a adoção dessas estratégias biotecnológicas. O processamento industrial dessa commodity gera volumes massivos de coprodutos, entre os quais o melaço de soja se destaca. Este resíduo é um líquido marrom e viscoso gerado na etapa de produção de proteína concentrada de soja (SPC) por extração alcoólica (Cattelan; Dall'agnol, 2018; Toloi et al., 2021; "Dados econômicos - Portal Embrapa- Soja em números (safra 2024/25)", [2025]). Apesar de sua composição variável, o melaço apresenta cerca de 57% de seu peso seco em carboidratos (monossacarídeos, dissacarídeos e oligossacarídeos), além de lipídios, minerais, proteínas e fitoquímicos (saponinas e isoflavonas) (Gambarato et al., 2025). Atualmente, devido à sua altíssima carga orgânica, o descarte em aterros ou o uso rudimentar como adubo líquido ocasiona severos problemas ambientais, como a contaminação de águas e solos. A valorização desse melaço como substrato, combinada à substituição do indutor sintético IPTG por lactose, insere o processo no contexto da sustentabilidade ecológica e econômica (Cheng et al., 2017; Soccol; Pandey; Larroche, 2013; Rodrigues et al., 2020).

Para atestar o potencial desse sistema de *upcycling*, faz-se necessário o uso de uma molécula repórter que indique tanto a viabilidade da expressão quanto a estabilidade estrutural da proteína produzida em um meio não convencional. Para tal, utilizou-se, neste trabalho, como repórter a proteína verde fluorescente super-dobrável (sfGFP), que é robusta à desnaturação e constitui um indicador preciso da fração solúvel produzida (Zimmer, 2002). Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito das concentrações de melaço de soja como substrato e de lactose como indutor, na expressão da proteína sfGFP.

Materiais e métodos

Microrganismo

O estudo utilizou a linhagem recombinante *Escherichia coli* BL21(DE3) como hospedeiro de expressão. A cepa foi previamente transformada com o plasmídeo pOPT 1.0, um vetor desenvolvido e cedido pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Alergia e Acarologia-LAA (Instituto de Ciências da Saúde da UFBA). O constructo genético abriga o gene codificador da proteína sfGFP e o gene de resistência ao antibiótico ampicilina como marcador de seleção. Os bancos de células foram preservados em criotubos contendo meio de cultura suplementado com 30% (v/v) de glicerol e armazenados em ultrafreezer a -80°C. Nos cultivos, garantiu-se a pressão seletiva com ampicilina (100 µg/mL).

Preparo do pré- inóculo e condições de cultivo

O pré-inóculo foi conduzido em frasco erlenmeyer de 100 mL, contendo 10 mL de meio Luria Bertani (LB) e 100 µL da cultura estoque. O sistema foi incubado em shaker rotativo a 220 rpm e 37°C por 16 horas, até atingir uma densidade óptica (DO_{600}) na faixa de 1,7 a 2,5. Posteriormente, inóculos independentes, 10 mL de meio LB e ampicilina, receberam volumes de pré-inóculo (400 a 800 µL) padronizados para iniciar os ensaios com DO_{600}=0,1. A incubação prosseguiu nas mesmas condições (220 rpm e 37°C), com um período de expressão fixado em 20 horas após o momento de indução.

Delineamento Composto Central (DCC)

Após análises preliminares que demonstraram que o melaço de soja e a lactose eram capazes de induzir a expressão de sfGFP em patamares próximos aos obtidos em meios comerciais com IPTG, estruturou-se uma metodologia de Planejamento Fatorial (Design of Experiments - DOE). Utilizou-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2^2, com 4 pontos fatoriais, 3 pontos axiais e triplicata no ponto central, totalizando 11 ensaios. As variáveis independentes estudadas foram as concentrações de lactose e de melaço de soja, codificadas conforme as tabelas 1 e 2, para determinar as concentrações ideais de lactose e de melaço de soja que aumentassem a expressão da sfGFP. A análise estatística e a matriz experimental foram configuradas no software online Protimiza Experimental Design.

Tabela 1: Níveis e fatores empregados no Delineamento Composto Central (DCC).

Ensaio	Concentração de lactose (g/L)	Concentração de melaço de soja (g/L)
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1,41	0
6	1,41	0
7	0	-1,41
8	0	1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Tabela 2: Valores (g/L) das variáveis dependentes analisadas no planejamento fatorial

	Nível		
Variável	**-1**	**0**	**1**
Concentração de lactose (g/L)	5,73	7,50	9,27
Concentração de melaço de soja (g/L)	11,45	15,00	18,55

Para viabilizar a execução laboratorial, os 11 experimentos foram divididos em três blocos operacionais, garantindo-se que cada bloco contivesse um ponto central para o balanceamento estatístico: Bloco 1 (ensaios 1, 5, 9), bloco 2 (ensaios 2, 3, 6, 10) e bloco 3 (ensaios 4, 7, 8, 11).

Resultados e discussões

Impacto do momento de indução

A execução da primeira fase do delineamento experimental revelou um comportamento inesperado na cinética bacteriana. Variações instrumentais não controladas no monitoramento da DO forçaram a indução dos três blocos em momentos metabólicos distintos: o bloco 1 foi induzido em DO_{600}=0,6; o bloco 2 em DO_{600} =0,4; e o bloco 3 em DO_{600}=0,9, divergindo da metodologia original que previa padronização exclusiva em 0,6. Os resultados de produção da proteína sfGFP (Tabela 3) indicaram que o bloco 1 apresentou as maiores concentrações de sfGFP (352 a 362 µg/mL), seguido pelo bloco 2 (234 a 248 µg/mL) e, por último, pelo bloco 3 (109 a 134 µg/mL).

A análise aprofundada desses dados preliminares apontou que as oscilações na DO mascararam completamente os efeitos das concentrações do melaço de soja e da lactose propostas no delineamento. Observou-se que dentro de um mesmo bloco, ou seja, na mesma DO de indução, a concentração de proteína manteve-se constante, mesmo com variações extremas nas concentrações (g/L) de lactose e melaço de soja adicionados. Devido à instabilidade instrumental, a análise estatística de variância (ANOVA) e o cálculo da superfície de resposta não foram realizados, uma vez que a magnitude da variabilidade introduzida pela DO violou os pressupostos do DCC, criando um "efeito de bloco" que inviabilizou o ajuste matemático.

Tabela 3: Resultados experimentais da Fase 1, evidenciando as flutuações de DO entre os blocos e o impacto na variável resposta (concentração de sfGFP).

Bloco	Ensaios	Lactose (g/L)	ıço de soja (g/L)	OD de indução	ıtração de GFP (ug/mL)
1	1	5,73	11,45	**OD600=0,6**	**352**
	5	5	15		**362**
	9	7,5	15		**356**
2	2	9,27	11,45	**OD600= 0,4**	**242**
	3	5,73	18,55		**236**
	6	10	15		**248**
	10	7,5	15		**234**
3	4	9,27	18,55	**OD600= 0,9**	**134**
	7	7,5	9,98		**126**
	8	7,5	20		**120**
	11	7,5	15		**109**

.

Otimização Metabólica

Para isolar a variável e atestar a veracidade metabólica do achado, conduziu-se uma Fase 2 de testes, na qual os blocos 2 e 3 foram repetidos (Tabela 4). A análise conjunta revalidou que o tempo da indução é o Parâmetro Crítico de Processo (CPP) definitivo do sistema. O ensaio induzido rigorosamente a 0,6 manteve produções acima de 340 µg/mL, superando em mais de duas vezes a produção tardia (0,9).

Tabela 4: Dados obtidos na revaliação dos blocos 2 e 3

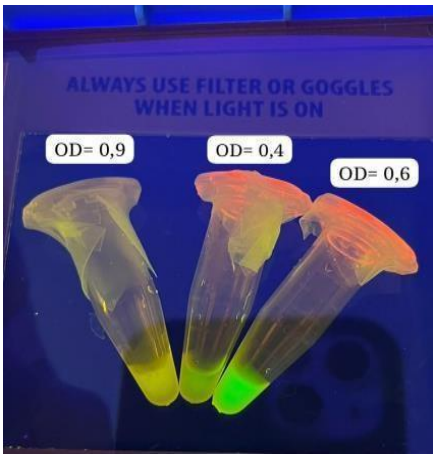
Bloco	Ensaios	Lactose (g/L)	ıço de soja (g/L)	OD de indução	oncentração de GFP (ug/mL)
2	2	9,27	11,45	**OD600= 0,4**	**232**
	3	5,73	18,55		**235**
	6	10	15		**230**
	10	7,5	15		**222**

3	4	9,27	18,55		**354**
	7	7,5	9,98	**OD600= 0,6**	**344**
	8	7,5	20		**356**
	11	7,5	15		**354**

Este resultado encontra amplo amparo na fisiologia microbiana, alinhando-se a dados da literatura que destacam o início e o meio da fase exponencial como os pontos de equilíbrio metabólico ideais para a captação de nutrientes e a síntese proteica via aparato ribossomal celular. Em contrapartida, a severa queda observada nas amostras de indução tardia reflete limitações fisiológicas graves e o aumento drástico da atividade proteolítica associada à proximidade da fase estacionária, degradando a proteína recombinante antes de sua acumulação.(Ou et al., 2004; Rosano; Morales; Ceccarelli, 2019;)

Corroborando visualmente o impacto crítico deste momento, a avaliação da fluorescência visual das amostras purificadas, figura 1, confirmou os achados quantitativos. A amostra derivada da indução ótima (DO 0,6) demonstrou uma fluorescência verde brilhante intensa, característica de uma molécula sfGFP íntegra e corretamente dobrada em sua conformação funcional (Pédelacq et al., 2005). Por sua vez, as induções prematuras e tardia exibiram fluorescências opacas e menos intensas.

Figura 1: Comparação visual das amostras de sfGFP purificadas, obtidas de culturas induzidas em diferentes densidades ópticas (OD), fase 1.



Fonte: O autor (2025)

Ademais, a relevância deste resultado é acentuada quando confrontada com os parâmetros de referência estabelecidos durante a caracterização inicial do vetor pOPT 1.0. Estudos de validação conduzidos pelo grupo de pesquisa responsável pela construção e inserção do plasmídeo em *Escherichia coli* reportaram, sob condições padrão, meio LB comercial e indução por IPTG sintético por 20 horas, uma concentração máxima de 188 µg/mL (Santos,2022).

Logo, ao empregar o sistema de *upcycling* com melaço de soja e lactose sob indução otimizada (DO_{600} = 0,6), atingiu-se a marca de 362 µg/mL. Esse incremento sugere que o melaço de soja atua como um suplemento multifuncional de baixo custo, aliviando gargalos nutricionais do meio LB e melhorando a saúde metabólica geral da cultura

Otimização com o uso do melaço de soja

O desempenho superior do bioprocesso baseado em melaço de soja sugere que a complexidade nutricional do resíduo atua de forma sinérgica para mitigar limitações metabólicas inerentes ao meio comercial. Enquanto o meio LB é classicamente limitado em termos de carboidratos fermentescíveis e micronutrientes específicos, a suplementação com melaço provavelmente proveu um suporte nutricional mais robusto para a linhagem *E. coli* BL21(DE3) (Rakita et al., 2021 ;Gambarato et al., 2025)

A presença de íons metálicos essenciais no subproduto, como magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^{+}) e ferro (Fe), aliada a vitaminas do complexo B, atua diretamente na otimização da maquinaria celular. O íon Mg^{2+}, em particular, desempenha papel fundamental como cofator para a estabilidade e funcionalidade dos ribossomos, sendo determinante para a eficiência da tradução e, consequentemente, para a síntese de proteínas recombinantes em larga escala (Guth-Metzler et al., 2020; Yu et al., 2023).

Dessa forma, o melaço de soja não atuou apenas como fonte de carbono, mas como um suplemento multifuncional que aliviou gargalos nutricionais do meio LB, melhorando a saúde metabólica geral da cultura. Esse ambiente nutricionalmente denso suportou o alto custo energético da expressão da sfGFP, resultando em concentrações que superam os padrões da literatura e reforçam a viabilidade do *upcycling* de resíduos para a produção biotecnológica de alto rendimento.

Embora do ponto de vista da modelagem experimental a predominância do "efeito de bloco" seja vista como uma falha, na ótica da biotecnologia sustentável e industrialização, esta foi a descoberta mais valiosa do estudo. A ausência de significância

estatística das concentrações de indutor e suplemento dentro de um mesmo bloco revelou uma impressionante robustez do sistema biológico em relação à formulação do meio.

Resíduos agroindustriais, como o melaço de soja, possuem composição química instável ao longo do ano safra, o que frequentemente inviabiliza sua aplicação em bioprocessos que demandam meios altamente controlados e quimicamente definidos. A constatação de que variações na carga orgânica de melaço, dentro das faixas testadas, não reduzem a produtividade de sfGFP, desde que o operador garanta o monitoramento celular para indução em DO_{600}= 0,6, indica a flexibilidade da formulação . Esta resiliência viabiliza o upcycling prático do resíduo, promovendo a efetiva inserção da cadeia da soja na economia circular, reduzindo os custos dos insumos biotecnológicos e os danos ambientais do seu descarte in natura.

Considerações finais

O presente estudo evidencia o potencial do melaço de soja, combinado à lactose, como uma alternativa sustentável e de alto rendimento para a produção da proteína sfGFP em *Escherichia coli*. A estratégia de *upcycling* validada demonstrou a capacidade de superar substancialmente o protocolo tradicional, meio comercial LB com IPTG, sugerindo um incremento de quase 95% na concentração final da proteína.

A pesquisa identificou que o fator limitante para o sucesso do bioprocesso recai sobre o controle rigoroso da janela de indução celular (DO_{600}=0,6), e não sobre flutuações milimétricas na proporção do melaço de soja. Os resultados indicam que o sistema apresenta resiliência frente à variabilidade do substrato,uma característica indispensável para contornar a inerente variabilidade química dos resíduos agroindustriais. Conclui-se, portanto, que a valorização deste coproduto fomenta uma biotecnologia mais limpa, mitigando os severos passivos ambientais associados ao descarte do melaço e garantindo uma viabilidade produtiva que atende aos princípios da bioeconomia e da economia circular.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento concedido a esta pesquisa e à empresa SJ Selecta S.A. pela gentil doação da amostra de melaço de soja.

Referências

ACOSTA-PIANTINI, E. *et al.* Preparation of hydrolyzed sugarcane molasses as a low-cost medium for the mass production of probiotic *Lactobacillus paracasei* ssp. *paracasei* F19. *Separations*, v. 10, n. 1, p. 33, 2023.

ALMARAZ-SÁNCHEZ, I. *et al.* Processing agroindustry by-products for obtaining value-added products and reducing environmental impact. *Journal of Chemistry*, p. 1–13, 2022.

CARDOSO, V. M. *et al.* Cost analysis based on bioreactor cultivation conditions: production of a soluble recombinant protein using *Escherichia coli* BL21(DE3). *Biotechnology Reports*, v. 26, p. e00441, 2020.

CATTELAN, A. J.; DALL'AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. *OCL*, v. 25, n. 1, p. D102, 2018.

CHENG, C. *et al.* Polymalic acid fermentation by *Aureobasidium pullulans* for malic acid production from soybean hull and soy molasses: fermentation kinetics and economic analysis. *Bioresource Technology*, v. 223, p. 166–174, 2017.

DADOS econômicos – Portal Embrapa. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 16 dez. 2025.

GALANTE, N. *et al.* Alternative culture medium design for biomass production of autochthonous meat starter *Latilactobacillus sakei* sp. *sakei* ACU-2. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, 2023.

GAMBARATO, B. C. *et al.* Soy molasses: a sustainable resource for industrial biotechnology. *Sustainability*, v. 17, n. 12, p. 5667, 2025.

GUTH-METZLER, R. *et al.* Cutting in-line with iron: ribosomal function and non-oxidative RNA cleavage. *Nucleic Acids Research*, v. 48, n. 15, p. 8663–8674, 2020.

LORENCE, A.; BALBAS, P. *Recombinant gene expression: reviews and protocols*. Totowa: Humana Press, 2004.

MOSES KELAS, K. *et al.* Role of recombinant DNA technology in transforming human life: a review. *BIMA Journal of Science and Technology Gombe*, v. 9, n. 1A, p. 78–91, 2025.

OU, J. *et al.* Stationary phase protein overproduction is a fundamental capability of *Escherichia coli*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, v. 314, p. 174–180, 2004.

PÉDELACQ, J.-D. *et al.* Engineering and characterization of a superfolder green fluorescent protein. *Nature Biotechnology*, v. 24, n. 1, p. 79–88, 2005.

RAKITA, S. *et al.* Soybean molasses in animal nutrition. *Animals*, v. 11, n. 2, p. 514, 2021.

RODRIGUES, J. L. *et al.* Effects of elevated concentrations of soybean molasses on feedlot performance and meat quality of lambs. *Livestock Science*, v. 240, p. 104155, 2020.

ROSANO, G. L.; MORALES, E. S.; CECCARELLI, E. A. New tools for recombinant protein production in *Escherichia coli*: a 5-year update. *Protein Science*, v. 28, n. 8, p. 1412–1422, 2019.

SABALZA, M.; CHRISTOU, P.; CAPELL, T. Recombinant plant-derived pharmaceutical proteins: current technical and economic bottlenecks. *Biotechnology Letters*, v. 36, n. 12, p. 2367–2379, 2014.

SANTOS, S. P. O. Construção de novas moléculas recombinantes hipoalergênicas com potencial aplicação imunoterapêutica utilizando abordagens de biologia sintética. 2022. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

SHANMUGARAJ, B.; BULAON, C. J. I.; PHOOLCHAROEN, W. Plant molecular farming: a viable platform for recombinant biopharmaceutical production. *Plants*, v. 9, n. 7, p. 842, 2020.

SOCCOL, C. R.; PANDEY, A.; LARROCHE, C. *Fermentation processes engineering in the food industry*. Boca Raton: CRC Press, 2013.

SUNG, K. A review on upcycling: current body of literature, knowledge gaps and a way forward. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, v. 2, n. 4, 2015.

TOLOI, M. N. V. *et al.* Development indicators and soybean production in Brazil. *Agriculture*, v. 11, n. 11, p. 1164, 2021.

YU, T. *et al.* Structural insights into the distortion of the ribosomal small subunit at different magnesium concentrations. *Biomolecules*, v. 13, n. 3, p. 566, 2023.

ZIMMER, M. Green fluorescent protein (GFP): applications, structure, and related photophysical behavior. *Chemical Reviews*, v. 102, n. 3, p. 759–782, 2002.

ECONOMIA CIRCULAR NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: USO DA BORRACHA DE PNEU COMO MODIFICADOR DO LIGANTE ASFÁLTICO

1 Thiago Lucena Dias; 2 Lídia Pereira Amaro; 3 Arthur Nóbrega de Sousa; 4Ana Maria Gonçalves Duarte; 5 Diego José Araújo Viégas; 6 Loredanna Melyssa Costa Almeida; 7 Chrysttyan Thalles Ribeiro Félix; 8 Emmanuely Regina Araújo Diniz

1 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: thiago.lucena@estudante.ufcg.edu.br; 2 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: lidia.pereira@estudante.ufcg.edu.br; 3 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: arthurnobrega16@gmail.com; 4 Universidade Federal de Campina grande, e-mail: ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br; 5 Universidade de Pernambuco-UPE, e-mail: diegoaraujoviegas@hotmail.com;6 Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, e-mail: loredanna.costa@servidor.uepb.edu.br; 7Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:chrysttyan@gmail.com; 8 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: emmanuelyregina7@gmail.com

Palavras-chave: Estabilidade térmica; Recuperação elástica; Sustentabilidade.

Resumo

A borracha de pneus inservíveis como agente modificador de ligantes asfálticos apresenta-se como alternativa técnica e ambientalmente sustentável, diante da crescente demanda por pavimentos mais duráveis e da necessidade de destinação adequada a resíduos sólidos. A incorporação de borracha moída promove melhorias nas propriedades físicas e reológicas dos ligantes, como maior rigidez, resistência à deformação permanente e ao envelhecimento, embora implique desafios relacionados ao aumento da viscosidade, à trabalhabilidade e à estabilidade do material. Nesse contexto, o presente estudo avaliou a modificação do CAP 50/70 com 5% de borracha, comparando seu desempenho físico ao ligante convencional. Os resultados indicaram baixas variações de massa após o envelhecimento de curto prazo (RTFO), com ambos os ligantes atendendo aos limites preconizados por normativas vigentes, evidenciando estabilidade térmica. Observou-se redução da penetração após o envelhecimento, mais acentuada no ligante modificado, indicando maior rigidez, embora ambos tenham atendido aos critérios normativos de penetração retida. O ligante com borracha apresentou maior ponto de amolecimento antes e após o RTFO, além de menor suscetibilidade térmica, sugerindo melhor desempenho em altas temperaturas. Ademais, destacou-se o ganho expressivo de recuperação elástica no ligante modificado, em contraste com o comportamento puramente viscoso do ligante convencional. Em conjunto, os resultados confirmam que a adição de borracha melhora a consistência, estabilidade térmica e resposta elástica do ligante, reforçando seu potencial para aumentar a durabilidade dos pavimentos e contribuir para a sustentabilidade ambiental. A redução de missões de compostos voláteis durante a produção de misturas asfálticas; a otimização da durabilidade dos pavimentos, com a consequente redução de demanda por novos materiais, bem como a reutilização de resíduos de lenta degradabilidade constituem algumas das vantagens decorrentes da modificação de ligantes asfálticos com a inserção de borracha proveniente de pneus inservíveis, dada a viabilidade técnica obtida.

Introdução

A crescente utilização de borracha proveniente de pneus inservíveis na modificação de ligantes asfálticos insere-se em um contexto técnico e ambiental estratégico para a engenharia de pavimentos contemporânea. O aumento da demanda por infraestrutura rodoviária, aliado às limitações dos ligantes convencionais frente a cargas elevadas e variações climáticas, tem impulsionado o desenvolvimento de ligantes modificados com polímeros, dentre os quais se destaca a borracha moída de pneus (*crumb rubber*). Estudos recentes evidenciam que a modificação com borracha promove melhorias significativas nas propriedades físicas e reológicas dos ligantes, sobretudo no que tange à resistência à deformação permanente, fadiga e envelhecimento (Kumar *et al*., 2023).

Do ponto de vista ambiental, a reutilização de pneus inservíveis representa uma solução relevante para um problema global. A disposição inadequada desses resíduos, frequentemente em aterros clandestinos ou ambientes abertos, gera impactos significativos, como contaminação do solo e da água, proliferação de vetores e riscos de incêndios de difícil controle. Dados recentes indicam que milhões de toneladas de pneus são descartadas anualmente no mundo, sendo que uma parcela significativa ainda não recebe destinação ambientalmente adequada (Calabi-Floody *et al*., 2022). Nesse cenário, a incorporação da borracha em ligantes asfálticos emerge como uma alternativa de reciclagem de alto valor agregado, alinhada aos princípios da economia circular.

No que se refere às propriedades físicas, a adição de borracha tende a reduzir os valores de penetração e aumentar o ponto de amolecimento dos ligantes, indicando maior rigidez e estabilidade térmica. Esses efeitos são atribuídos à interação físico-química entre a matriz asfáltica e as partículas de borracha, que promovem a absorção de frações leves e o consequente aumento da viscosidade. Conforme observado por Yue *et al*. (2022), modificadores poliméricos, incluindo a borracha, podem formar estruturas internas que aumentam a rigidez e melhoram o desempenho mecânico do ligante, sobretudo em temperaturas elevadas.

Além disso, a presença da borracha contribui para o aumento da recuperação elástica, característica essencial para reduzir a deformação permanente em pavimentos submetidos a tráfego pesado. Esse comportamento está associado à natureza

elastomérica da borracha, que confere ao ligante maior capacidade de deformar e recuperar sua forma original após a aplicação de cargas. Estudos também indicam melhorias na resistência ao envelhecimento oxidativo, uma vez que a borracha pode atuar como barreira à difusão de oxigênio e retardar processos degradativos (Kumar *et al*., 2023; Xu *et al*., 2024; Zhao *et al*., 2024).

No entanto, a utilização da borracha em ligantes asfálticos não está isenta de desafios técnicos. Um dos principais entraves refere-se ao aumento da viscosidade do ligante modificado, o que pode comprometer sua trabalhabilidade durante as etapas de mistura, transporte e aplicação. Conforme destacado por Yue *et al*. (2022), ligantes altamente modificados podem apresentar dificuldades de bombeamento e homogeneização, exigindo temperaturas mais elevadas ou o uso de aditivos específicos, como agentes de mistura morna, para viabilizar sua aplicação em campo.

Outro desafio relevante diz respeito à estabilidade de armazenamento e à compatibilidade entre a borracha e o ligante asfáltico. A segregação de fases e a falta de homogeneidade podem comprometer o desempenho do material ao longo do tempo. Adicionalmente, a variabilidade das propriedades da borracha reciclada, em função da origem e do processo de moagem, pode influenciar significativamente os resultados obtidos, exigindo controle rigoroso de qualidade e padronização dos materiais utilizados. Apesar desses desafios, os benefícios associados à utilização de borracha de pneus inservíveis são expressivos. Além da melhoria no desempenho mecânico dos pavimentos, destaca-se a redução do consumo de recursos naturais, a diminuição de resíduos sólidos e a mitigação de impactos ambientais. Ademais, a maior durabilidade dos pavimentos pode resultar em menor necessidade de manutenção, reduzindo custos ao longo do ciclo de vida e emissões associadas às intervenções.

Desse modo, a presente pesquisa destinou-se ao estudo da modificação do ligante asfáltico CAP 50/70 mediante a incorporação de borracha de pneus inservíveis, no teor de 5,0%, a fim de investigar os efeitos da referida modificação nas propriedades físicas do ligante, comparando-as com os do ligante puro. Os ensaios físicos realizados em ambos os ligantes asfálticos foram penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica, executados tanto antes quanto após o procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO). Desse modo, buscou-se validar técnica e ambientalmente o emprego desse resíduo em atividades ligadas à atividade de pavimentação, corroborando os pressupostos da sustentabilidade no setor.

Materiais e Métodos

Os materiais empregados na pesquisa foram o ligante asfáltico convencional CAP 50/70 fornecido pela empresa CBAA Asfaltos LTDA, bem como a borracha triturada, fornecida por uma empresa de reciclagem e beneficiamento de pneus localizada no estado de São Paulo. O resíduo supracitado apresenta granulometria passante na peneira nº 40 (0,42 mm) e foi previamente submetido a um processo de separação magnética por meio de rolo magnético, realizado pela própria empresa fornecedora, a fim de remover partículas metálicas residuais. Foi realizada a caracterização física do ligante CAP 50/70, antes e após o envelhecimento de curto prazo segundo o procedimento *Rolling Thin Film Oven* (RTFO), a qual compreendeu os ensaios de ponto de amolecimento, penetração e recuperação elástica, a fim de determinar o desempenho em altas temperaturas, a consistência a temperaturas intermediárias, bem como a capacidade de deformação reversível, respectivamente. As normativas que preconizam os ensaios supracitados estão elencadas na Tabela 01.

Ensaio	Norma/Procedimento
Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola	ASTM D36/D36M – 14: 2020
Determinação da penetração 0,1 mm	ASTM D5/D5M: 2020
Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro	DNIT 130/2010 - ME
Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional - RTFOT	NBR 15235/2009

Tabela 01: Ensaios e normas para caracterização física do ligante CAP 50/70 puro e modificado.
Fonte: Os autores (2026)

O teor de borracha utilizado nos testes de modificação do ligante foi de 5%, baseando-se nos estudos de Nunes (2017), contudo, procedendo-se a adaptações. Essa escolha teve como objetivo ampliar a análise para um nível inicial de modificação, permitindo avaliar os efeitos da incorporação de borracha em teores inferiores, frequentemente associados à melhor trabalhabilidade e menor incremento de rigidez. A Tabela 02 apresenta a proporção de materiais utilizados no processo de modificação do ligante, com suas respectivas nomenclaturas.

Amostra	CAP 50/70	Borracha
AV	100%	0%
AB 5	95%	5%

Tabela 02: Nomenclatura e proporção dos materiais utilizados na modificação.
Fonte: Os autores (2026)

O processo de modificação do ligante asfáltico foi realizado em laboratório por meio da incorporação gradual de borracha de pneus ao ligante base previamente aquecido à 150 °C. A modificação ocorreu sob temperatura controlada de 165 °C, utilizando-se um agitador mecânico FISATOM, modelo 72, operando com frequência entre 550 e 750 rpm, de modo a

assegurar adequada homogeneização e interação entre os constituintes. A borracha foi previamente fracionada em três porções iguais em massa, as quais foram adicionadas de forma gradual ao ligante aquecido (10 minutos para cada porção de borracha), permitindo uma incorporação progressiva e favorecendo a interação entre os constituintes. Após cada adição, manteve-se a agitação contínua por mais 30 minutos, permitindo o início dos processos de inchamento das partículas de borracha e de interação físico-química com as frações leves do ligante.

O tempo total de modificação foi de 1 h para cada amostra, contado a partir da adição da primeira fração de borracha, mantendo-se constantes as condições de temperatura e rotação ao longo de todo o processo. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de garantir a reprodutibilidade do ligante modificado, bem como a obtenção de um material com características homogêneas e estáveis, adequado às etapas subsequentes de caracterização física e reológica.

Após a etapa de modificação do ligante asfáltico, procedeu-se à caracterização física de cada amostra, com o objetivo de avaliar os efeitos da incorporação da borracha sobre suas propriedades. Para essa finalidade, foram realizados os mesmos ensaios de caracterização listados na Tabela 01, conduzidos de acordo com as respectivas normas técnicas vigentes.

Resultados e Discussões

A Figura 01 apresenta os resultados obtidos para as variações na perda de massa dos ligantes puro e modificado com a borracha de pneu, após ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFO). Além disso, são apresentados os limites normativos para ligantes convencionais, bem como para ligantes modificados por borracha, segundo a resolução ANP nº 897/2022.

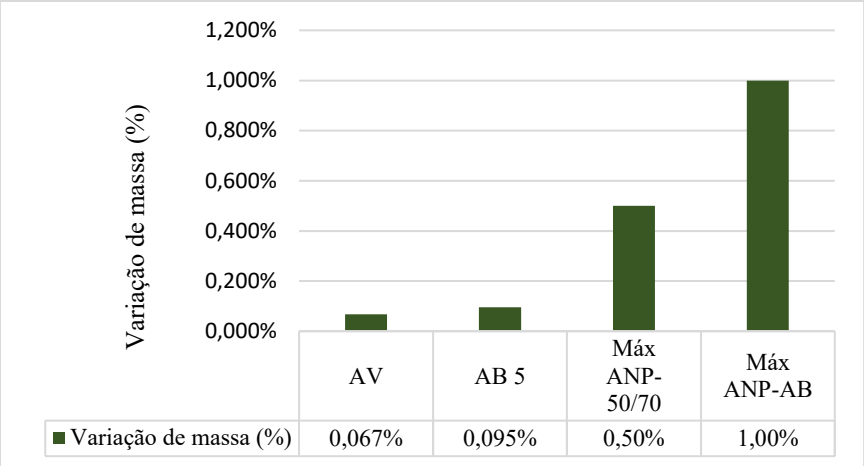


Figura 01: Variação de massa a partir do ensaio de RTFO.
Fonte: Os autores (2026)

Conforme os resultados obtidos, verifica-se que as variações de massa após o envelhecimento foram pouco relevantes para ambos os ligantes avaliados. O ligante asfáltico puro (AV) apresentou variação de 0,067%, enquanto o ligante asfalto-borracha registrou 0,095% (AB 5), mantendo uma variação ligeiramente superior. Em termos normativos, todos os resultados estão abaixo dos limites da Resolução ANP nº 897/2022, de 0,5% para o CAP 50/70, bem como de 1,0% para o ligante modificado com borracha, indicando conformidade e boa estabilidade quanto à variação de massa.

A Figura 02 apresenta os resultados referentes ao ensaio de penetração antes e após o procedimento RTFO.

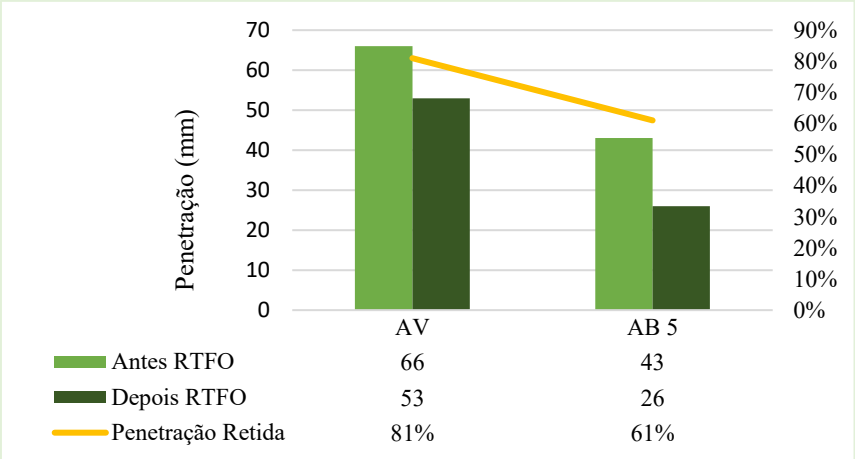


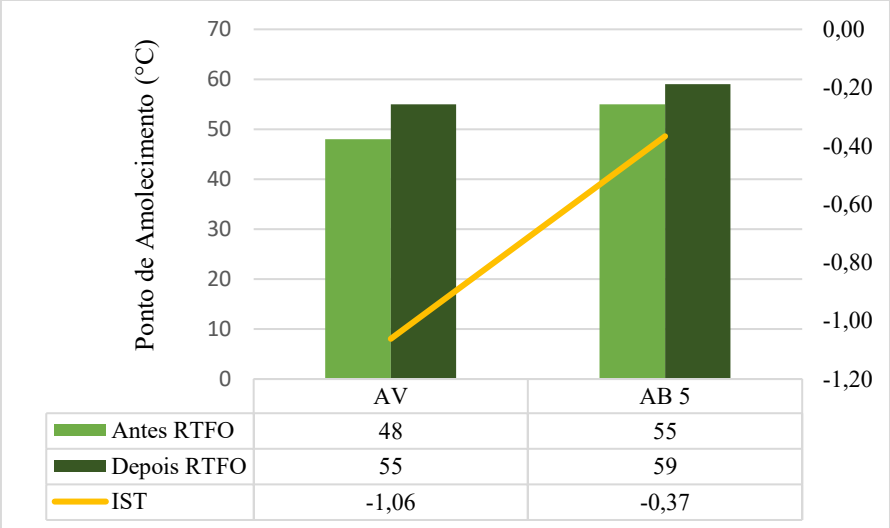
Figura 02: Ensaio de penetração.
Fonte: Os autores (2026)

Observou-se que o ligante de referência (AV) reduziu a penetração de 66 para 53 (0,1 mm), mantendo 81% da penetração inicial, o que confirma o endurecimento típico após o envelhecimento de curto prazo. Para o ligante modificado com borracha, os valores de penetração antes do RTFO já se apresentaram inferiores, ao passo que diminuíram ainda mais após o envelhecimento: para o ligante AB 5, reduziu de 43 para 26 (0,1 mm) (61% de penetração retida. Esses resultados indicam que a incorporação de borracha reduz a penetração (maior rigidez do ligante) e que o RTFO promove endurecimento adicional. Entretanto, a sensibilidade ao envelhecimento (avaliada pela penetração retida) varia com o acréscimo de borracha, com maior queda relativa no AB 5 e melhor retenção no AV. A redução de penetração com o aumento do teor de borracha pode ser associada ao efeito físico da fase borracha no ligante, que aumenta a resistência à penetração da agulha e eleva a consistência (Alsheyab *et al*., 2025; Sousa, 2026), o que tende a favorecer o desempenho frente à deformação permanente.

O resultado obtido para o ligante asfáltico virgem (AV) está em conformidade com os critérios da Resolução ANP nº 897/2022, que estabelece um intervalo de penetração entre 50 e 70 décimos de milímetro. Todavia, o ligante AB 5 apresentou valores de penetração inferiores ao intervalo especificado para esse tipo de cimento asfáltico, evidenciando o efeito endurecedor da adição de borracha, corroborando a tendência verificada por Al-Rubaie e Hasan (2021). Ainda assim, considerando os limites definidos pela mesma norma para o asfalto-borracha, cuja penetração deve situar-se entre 30 e 70 décimos de milímetro, observou-se que o ligante AB 5 se enquadrou nessa faixa, atendendo às especificações exigidas para essa tipologia de material.

A penetração retida expressa a capacidade do ligante de preservar sua consistência após o envelhecimento térmico (RTFO). Com base nos resultados da Figura 02, verificaram-se valores de penetração retida de 81% para o ligante virgem (AV) e 61% para AB 5. Logo, ambos os ligantes atenderam ao limite mínimo de 55% estabelecido pela resolução supracitada, indicando adequada resistência ao envelhecimento de curto prazo nas condições do ensaio. Além disso, observou-se que o ligante asfalto-borracha apresentou menores valores absolutos de penetração tanto antes quanto após o RTFO, em comparação ao ligante puro, o que evidência maior rigidez do ligante modificado. Este fato é coerente com o efeito da adição de borracha, dado que a incorporação de partículas sólidas na matriz asfáltica aumenta a resistência à penetração, elevando a rigidez do ligante. Consequentemente, o ligante modificado tende a apresentar maior consistência do que o ligante puro. Em conjunto, os resultados sugerem que a borracha contribui para um ligante mais rígido e com retenção satisfatória de propriedades após envelhecimento, o que pode ser favorável ao desempenho frente à deformação permanente (Sousa, 2026).

Os resultados relativos ao ensaio de ponto de amolecimento são apresentados na Figura 03.

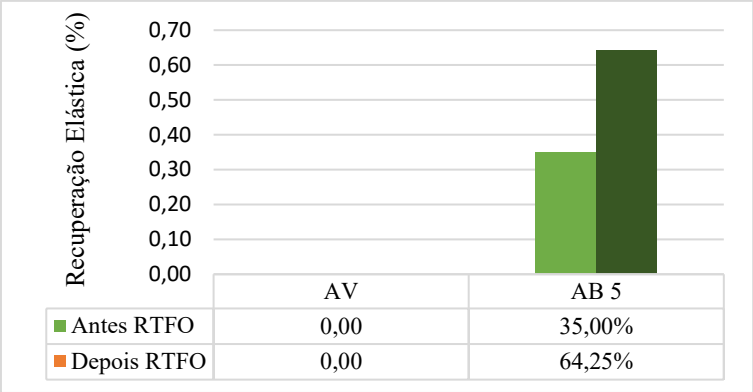


	AV	AB 5
Antes RTFO	48	55
Depois RTFO	55	59
IST	-1,06	-0,37

Figura 03: Ensaio de ponto de amolecimento.
Fonte: Os autores (2026)

Observou-se que ambos os ligantes apresentaram aumento do ponto de amolecimento após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), evidenciando o endurecimento associado à volatilização de frações leves e à oxidação. O ligante virgem (AV) elevou o ponto de amolecimento de 48°C para 55°C, ao passo que o ligante modificado também obteve um incremento de 55°C para 59°C. Além disso, notou-se que, mesmo antes do RTFO, o ligante AB 5 já apresentava ponto de amolecimento superior ao do ligante de referência, conferindo maior consistência e estabilidade térmica. Em termos de desempenho, esses resultados sugerem que a modificação com borracha amplia a resistência do ligante ao amolecimento em temperaturas elevadas, condição associada à melhor resposta frente à deformação permanente (Al-Rubaie; Hasan, 2021; Sousa, 2026). Esse comportamento também se reflete no Índice de Susceptibilidade Térmica (IST), calculado a partir dos resultados de penetração e ponto de amolecimento. Observou-se que ambos os ligantes apresentaram IST negativo (AV = −1,062; AB 5% = −0,367), indicando menor suscetibilidade térmica, característica desejável para ligantes e misturas asfálticas em serviço. Além disso, todos os valores encontram-se dentro da faixa de especificação indicada pela ANP para o CAP 50/70 (−1,5 a +0,7), confirmando conformidade quanto à sensibilidade à temperatura (Sousa, 2026).

A Figura 04 apresenta os resultados referentes ao ensaio de recuperação elástica para ambos os ligantes asfálticos em estudo.



	AV	AB 5
Antes RTFO	0,00	35,00%
Depois RTFO	0,00	64,25%

Figura 04: Ensaio de recuperação elástica.
Fonte: Os autores (2026)

Verificou-se que a recuperação elástica foi nula para o ligante puro (AV), tanto antes quanto após o RTFO (0,0%), confirmando o caráter predominantemente viscoso do CAP 50/70 (Ji *et al*., 2024). Em contrapartida, a incorporação de borracha conferiu resposta mais elástica ao ligante modificado AB 5, de modo que sua recuperação elástica aumentou de 35,0% (antes RTFO) para 55,0% (pós RTFO), evidenciando a contribuição dos componentes elastoméricos da borracha na capacidade de deformar e retornar após a descarga (Mensch *et al*., 2022; Sousa, 2026). Além disso, esse aumento sugere que a modificação permaneceu efetiva e que o endurecimento/oxidação do ligante de referência não eliminou o caráter elástico associado à fase borracha.

Estudos recentes reforçam a atuação da borracha como agente elastomérico capaz de melhorar a capacidade de recuperação do ligante sob carregamentos repetidos. Ji *et al*. (2024) observaram, por meio do ensaio MSCR, que ligantes modificados com borracha apresentaram valores de recuperação elástica consistentemente superiores aos ligantes puros, inclusive após envelhecimento de curto e longo prazo, evidenciando maior resistência à deformação permanente. De forma complementar, Asadi *et al*. (2024) também indicam que o aumento da recuperação elástica está diretamente relacionado à estrutura polimérica da borracha e à sua capacidade de absorver frações leves, bem como liberar componentes que reforçam a matriz asfáltica, contribuindo para a obtenção de uma maior resiliência.

Dado o exposto, a modificação de ligantes asfálticos a partir da incorporação da borracha oriunda de pneus inservíveis configura-se como uma prática técnica e ambientalmente viável. A redução das emissões de compostos voláteis durante as etapas de produção e aplicação, associada à maior estabilidade térmica do material modificado exemplificam os ganhos sustentáveis decorrentes desse emprego. Além disso, a otimização de propriedades mecânicas, tais como o acréscimo de rigidez em altas temperaturas, bem como o comportamento elástico, contribui para o aumento da durabilidade dos pavimentos, reduzindo a necessidade de manutenções periódicas, bem como o consumo de matérias-primas virgens e energia ao longo do ciclo de vida viário. Outro aspecto notável se refere à mitigação dos impactos associados ao descarte inapropriado de pneus inservíveis, uma vez que sua incorporação ao ligante asfáltico fomenta a reutilização de resíduos de difícil degradabilidade, alinhando-se às diretrizes de economia circular e gestão de resíduos sólidos, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305 (2021), bem como a Resolução CONAMA n° 307 (2002).

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que tanto o ligante asfáltico convencional quanto o modificado com borracha apresentaram comportamento satisfatório frente ao envelhecimento de curto prazo, conforme os critérios estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, justificando a referida modificação como viável tecnicamente. As baixas variações de massa observadas após o ensaio RTFO evidenciam boa estabilidade térmica e reduzida volatilização de componentes leves, indicando que ambos os materiais possuem adequada resistência às condições simuladas de usinagem. Ademais, o aumento do ponto de amolecimento e a manutenção de valores adequados de susceptibilidade térmica reforçam a capacidade dos ligantes em suportar variações de temperatura, aspecto essencial para o desempenho em campo.

No que tange às propriedades físicas, a incorporação de borracha de pneu promoveu alterações no comportamento do ligante, resultando em maior rigidez e incremento da elasticidade. A redução dos valores de penetração e o aumento expressivo da recuperação elástica no ligante AB 5 indicam uma resposta mais resiliente às deformações, o que tende a favorecer o desempenho frente à deformação permanente e à fadiga. Embora observada maior sensibilidade ao envelhecimento em termos de penetração retida, o ligante asfalto-borracha manteve-se dentro dos limites normativos, evidenciando que a modificação não compromete sua durabilidade em curto prazo, ao passo que agrega propriedades mecânicas desejáveis.

Sob o viés ambiental e sustentável, os resultados obtidos reforçam o potencial do uso de borracha de pneus inservíveis como modificador de ligantes asfálticos, contribuindo diretamente para a mitigação de impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos ao promover sua reinserção em cadeias produtivas de alto valor agregado, fomentando a economia circular e os benefícios socioeconômicos e ambientais dela decorrentes. Além disso, a melhoria no desempenho mecânico e na resistência à deformação pode implicar em maior vida útil dos pavimentos, reduzindo a necessidade de intervenções frequentes, bem como o consumo de recursos naturais e emissões associadas às atividades de manutenção. Assim, o emprego do asfalto-borracha se apresenta como uma solução tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para a engenharia de pavimentos.

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em especial ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada para a realização da presente pesquisa. Agradecem, ainda, às instituições e empresas fornecedoras dos insumos utilizados, em especial à CBAA Asfaltos LTDA, bem como à empresa doadora da borracha de pneus tratada, pela contribuição no desenvolvimento do estudo. É reconhecido de modo distinto o apoio dado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo incentivo ao desenvolvimento científico e à formação de recursos humanos.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução nº 897**, de 2022. Especificações de ligantes asfálticos. Rio de Janeiro, 2022.

ALSHEYAB, M. A. T.; KHEDAYWI, T; OGILIAT, O. Effect of Waste Tire Rubber on Properties of Asphalt Cement and Asphalt Concrete Mixtures: State of the Art**. International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 18, p. 516–527, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s42947-023-00361-4.

AL-RUBAIE, Ali H.; JONI, Hasan H. Assessment the performance of asphalt mixtures modified with waste tire rubber at high temperatures. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1895, n. 1, art. 012026, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012026.

ASADI, B.; HAJJ, R. Prediction of asphalt binder elastic recovery using tree-based ensemble bagging and boosting models. **Construction and Building Materials**, v. 410, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134154.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

CALABI-FLOODY, A.; MIGNOLET-GARRIDO, C.; VALDÉS-VIDAL, G. Evaluation of the effects of textile fibre derived from end-of-life tyres (TFELT) on the rheological behaviour of asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 360, 2022.

JI, Z. *et al*. Chemical and rheological evaluation of the ageing behavior of crumb rubber asphalt binders. **Polymers**, v. 16, n. 21, 2024. DOI: 10.3390/polym16213088.

KUMAR, A.; CHOUDHARY, R.; KUMAR, A. A study on aging characteristics of asphalt binders modified with waste EPDM rubber and tire pyrolysis oil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 12, 2023.

MENSCH, N. G. **Modelagem da deformação permanente de misturas asfálticas a partir de princípios viscoplásticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2022. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/271961.

NUNES, L. C. **Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com asfalto-borracha de 4ª geração**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/23583.

SOUSA, ARTHUR NÓBREGA DE. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas e descontínuas produzidas com asfalto-borracha**. 2026. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2026.

XU, P.; ZHANG, D.; LIU, Z.; et al. Diffusion mechanism explorations on sustainable warm mix asphalt and rejuvenated SBS-modified asphalt binder. **Construction and Building Materials**, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138183.

YUE, M. *et al*. A comprehensive analysis of fatigue and healing capacity of Sasobit polymer-modified asphalt from two perspectives: binder and FAM. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 3, 2023.

ZHAO, S.; YOU, Q.; JIAN, C.; et al. Improving storage stability and rheological performance of asphalt rubber modified with nanosilica and Sasobit. **Road Materials and Pavement Design**, 2024. DOI: 10.1080/14680629.2024.2383921.

ANÁLISE TÉCNICA E AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

1 Lidia Pereira Amaro; 2Arthur Nóbrega de Sousa; 3Thiago Lucena Dias; 4Ana Maria Gonçalves Duarte; 5Diego josé araújo Viégas; 6 João Pedro Silveira Salustiano; 7 Ana Beatriz Silva de Araújo; 8 Cayra Vitória de Brito Silva

1 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: lidia.pereira@estudante.ufcg.edu.br; 2 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:arthurnobrega16@gmail.com; 3 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: thiago.lucena@estudante.ufcg.edu.br; 4 Universidade Federal de Campina grande, e-mail: ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br; 5 Universidade de Pernambuco -UPE, e-mail: diegoaraujoviegas@hotmail.com; 6 Universidade Federal de Campina grande, e-mail: joao.silveira@estudante.ufcg.edu.br; 7 Universidade Estadual da Paraíba, e-mail: ana.silva.araujo@aluno.uepb.edu.br; 8 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:cayra.vitoria@estudante.ufcg.edu.br

Palavras-chave: Pneus inservíveis; Asfalto-borracha; Economia Circular

Resumo

O descarte inadequado de pneus inservíveis representa um sério problema ambiental, devido à sua elevada estabilidade físico-química, baixa degradabilidade e ao potencial de liberação de poluentes nocivos ao meio ambiente. Nesse contexto, o reaproveitamento da borracha de pneus na pavimentação asfáltica surge como uma alternativa sustentável, promovendo a valorização de resíduos e contribuindo para a economia circular. O presente trabalho teve como objetivo analisar técnica e ambientalmente a utilização do pó de borracha de pneu reciclado na modificação do ligante asfáltico para a produção de asfalto-borracha, por meio das técnicas de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e das análises termodiferencial e termogravimétrica (DTA/TGA). Os resultados de FTIR evidenciaram a presença de grupos funcionais característicos da estrutura elastomérica da borracha, como ligações C–H, O–H, C=O e C–O, indicando compatibilidade química com o cimento asfáltico de petróleo. A análise termogravimétrica demonstrou elevada estabilidade térmica até aproximadamente 250–300 °C, com a principal etapa de degradação ocorrendo entre 350 °C e 500 °C, além da presença de resíduo final associado ao negro de fumo e às cargas minerais. Portanto, a partir dessas análises, conclui-se que o material apresenta potencial técnico e ambiental para aplicação em misturas asfalto-borracha, contribuindo para a redução de passivos ambientais e para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na pavimentação asfáltica.

Introdução

Pneus usados, ou pneus inservíveis, constituem um importante desafio ambiental, uma vez que demandam longos períodos para se degradar naturalmente. Em razão de sua composição, que inclui borracha natural e sintética, negro de fumo, aço e aditivos químicos, apresentam elevada estabilidade físico-química e baixa degradabilidade. Dessa forma, podem persistir no ambiente por extensos períodos, além de liberar poluentes nocivos, como metais pesados, compostos orgânicos voláteis e material particulado (Dwivedi et al., 2020; Ahmed e Faizan, 2024). A produção de pneus cresceu substancialmente em decorrência do aumento da frota de veículos e do desenvolvimento industrial em escala global, o que intensifica a preocupação com o volume de resíduos destinados a aterros sanitários, bem como, com o descarte inadequado ou ilegal desses materiais (Ahmed e Faizan, 2024).

No Brasil, a Resolução nº 416/2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece que fabricantes e importadores são responsáveis pela coleta e pela destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis em todo o território nacional. De acordo com relatório do IBAMA (2025), o país atingiu 94,92% da meta de destinação desses resíduos no ano de 2024. Nesse contexto, o coprocessamento destaca-se como a principal tecnologia de reaproveitamento, correspondendo a 41%, seguido pela granulação (29,01%), laminação (26,68%) e pirólise (3,25%).

Em contrapartida ao coprocessamento, as demais tecnologias promovem a valorização do resíduo, resultando na produção de novos materiais e/ou produtos, contribuindo para diversas aplicações industriais e para o fortalecimento da economia circular. Destaca-se, nesse contexto, o asfalto-borracha, que representa um dos setores de maior aproveitamento de pneus usados reciclados (Poulose, 2025). O pó de borracha moída (PBM) pode ser incorporado ao cimento asfáltico de petróleo por via seca, com a adição do granulado como fração do agregado, ou por via úmida, caracterizada pela mistura em altas temperaturas com a modificação do ligante, originando misturas asfalto-borracha com maior elasticidade, menor suscetibilidade térmica e desempenho superior frente à deformação permanente e ao trincamento por fadiga (Jamieson et al., 2024; Zhao et al., 2023).

Essas melhorias resultam em pavimentos mais duráveis, reduzindo a dependência de materiais virgens, contribuindo para o desenvolvimento sustentável das cidades, aumentando a resiliência das rodovias e reduzindo os impactos ambientais associados à sua construção e manutenção (Asubadin-Espin et al., 2024). Além disso, misturas asfálticas produzidas com borracha de pneus inservíveis não apresentam risco significativo de lixiviação de metais tóxicos, conforme investigação realizada por Farina et al. (2024), cujos resultados indicaram que nenhuma concentração de metal excedeu os limites estabelecidos para água potável

Rodríguez-Alloza e Garraín (2026) analisaram o ciclo de vida de um pavimento asfáltico com a incorporação de borracha de pneu reciclada e de um aditivo em misturas mornas, em comparação com uma mistura quente com asfalto convencional. Foram consideradas as etapas de produção dos materiais, construção, manutenção e fim de vida útil, bem como diferentes cenários de durabilidade do pavimento. Os resultados demonstraram que o pavimento com mistura morna contendo borracha de pneu apresentou desempenho ambiental superior à alternativa convencional em todas as dezesseis categorias de impacto avaliadas. De acordo com os autores, essa superioridade está associada às menores temperaturas de produção, à incorporação de borracha reciclada, à redução das necessidades de manutenção e à distribuição dos impactos do ciclo de vida ao longo de uma vida útil mais prolongada.

Castañeda-Robles et al. (2024) afirmam que até 2020 já haviam sido pavimentados mais de 12,8 mil km de rodovias brasileiras contendo borracha de pneu, correspondendo a aproximadamente 12,8 milhões de pneus reaproveitados. Além de promover uma destinação sustentável para o pneu inservível, a tecnologia apresentou melhorias significativas no desempenho reológico e na durabilidade dos pavimentos. O processo úmido é o mais empregado na produção de asfalto-borracha. Nesse sistema, o pó de borracha é adicionado diretamente ao ligante betuminoso, antes da mistura com os agregados, promovendo uma modificação físico-química controlada (Giovani et al., 2021). É indicado para obras de alto desempenho, como rodovias de tráfego intenso, camadas de ligação, selagem de trincas e tratamentos superficiais (Liu et al., 2025). Além dos benefícios mecânicos, o método úmido permite o reaproveitamento de até 2000 pneus inservíveis por milha pavimentada, demonstrando seu potencial ambiental (Barreto et al., 2024). O ligante modificado com a borracha, pode ser utilizado em vários tipos de revestimento asfáltico, como no concreto asfáltico, em tratamentos superficiais, *Stone Matrix Asphalt* (SMA), camada porosa de atrito e para selagem de trincas e de juntas (Maia, 2023).

A borracha de pneu, utilizada na pavimentação pode ser adquirida comercialmente pronta para uso, já em granulometrias adequadas. Nesse processo, o resíduo passa por etapas de reciclagem e beneficiamento, sendo submetido à separação magnética, geralmente por meio de rolos magnéticos, para a remoção de partículas metálicas remanescentes. Embora o uso da borracha em pavimentação seja amplamente difundido, ainda há necessidade de melhor compreensão sobre o comportamento químico e térmico do resíduo reciclado disponível na indústria. Ahmed e Faizan (2024), explicam que por meio da utilização de diferentes técnicas de caracterização, é possível se obter uma compreensão mais abrangente das propriedades do pó da borracha, possibilitando desenvolver maneiras inovadoras de reciclar o resíduo. Informações sobre as propriedades físicas e químicas do pó de borracha, podem ser usadas para desenvolver métodos de processamento, projetar produtos e prever o desempenho.

A interação asfalto-borracha é influenciada por diversos fatores, como o tipo, tamanho e composição da borracha, sendo importante analisar a composição química da borracha bem como seu comportamento térmico, visto que as misturas asfálticas são suscetíveis a variações de temperatura, tanto na produção como no pavimento em uso. Diante disso este trabalho buscou analisar o pó de borracha de pneu reciclado, utilizado na modificação do ligante asfáltico, por meio da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise termodiferencial e termogravimétrica (DTA/TGA).

Materiais e Métodos

O material utilizado foi a borracha triturada, fornecida por uma empresa de reciclagem e beneficiamento de pneus, localizada no estado de São Paulo. O resíduo foi previamente submetido a um processo de separação magnética por meio de rolo magnético, realizado pela própria empresa fornecedora, com a finalidade de remover partículas metálicas remanescentes. O material fornecido apresenta granulometria passante na peneira nº 40 (0,42 mm). A Figura 01 ilustra a borracha utilizada na pesquisa.



Figura 01: Borracha triturada de pneus inservíveis passante na peneira nº 40.
Fonte: Autor (2026)

Para a caracterização da borracha, foi realizado o ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), empregado para identificar os principais grupos funcionais presentes no material, permitindo avaliar sua composição química e possíveis interações com outros constituintes do sistema. A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica analítica baseada na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}). Essa técnica permite analisar diferentes tipos de ligações e funções químicas nas moléculas contidas nas amostras, especialmente compostos orgânicos, apresentando picos relacionados a vibrações moleculares, como estiramentos e deformações.

A análise termodiferencial e termogravimétrica (DTA/TGA) foi utilizada para investigar a estabilidade térmica da borracha e seus estágios de degradação em função da temperatura. A DTA envolve o aquecimento simultâneo de uma amostra e de um material de referência inerte, registrando a diferença de temperatura entre ambos. Essa diferença permite identificar transições térmicas, como fusão, cristalização e reações químicas, que podem ser endotérmicas (absorção de calor) ou exotérmicas (liberação de calor). A TGA mede a variação de massa da amostra à medida que ela é aquecida sob condições controladas, permitindo registrar perdas ou ganhos de massa em função da temperatura e do tempo. Essa técnica é amplamente utilizada para avaliar estabilidade térmica, decomposição, oxidação e outras reações que resultam em alterações de massa. Quando utilizadas em conjunto, essas as técnicas fornecem uma caracterização térmica mais abrangente do material, permitindo melhor compreensão das propriedades intrinsecas e comportamento sob diferentes condições térmicas.

Resultados e Discussões

A Figura 02 apresenta o espectro de FTIR da borracha triturada utilizada na pesquisa. Observa-se a presença de bandas características compatíveis com a composição química típica de resíduos de pneus, evidenciando a presença de hidrocarbonetos, grupos oxigenados e compostos associados à estrutura polimérica da borracha.

Os principais sinais indicativos da composição da borracha estão concentrados em regiões de maior intensidade, especialmente aquelas associadas aos estiramentos (ou deformações axiais) de grupos alifáticos saturados. As bandas localizadas em 2908 cm^{-1} e 2842 cm^{-1} correspondem aos estiramentos assimétrico e simétrico de grupos metileno ($-CH_2$), sendo características de cadeias hidrocarbônicas presentes tanto na borracha natural quanto na sintética, além de outros compostos orgânicos de natureza alifática.

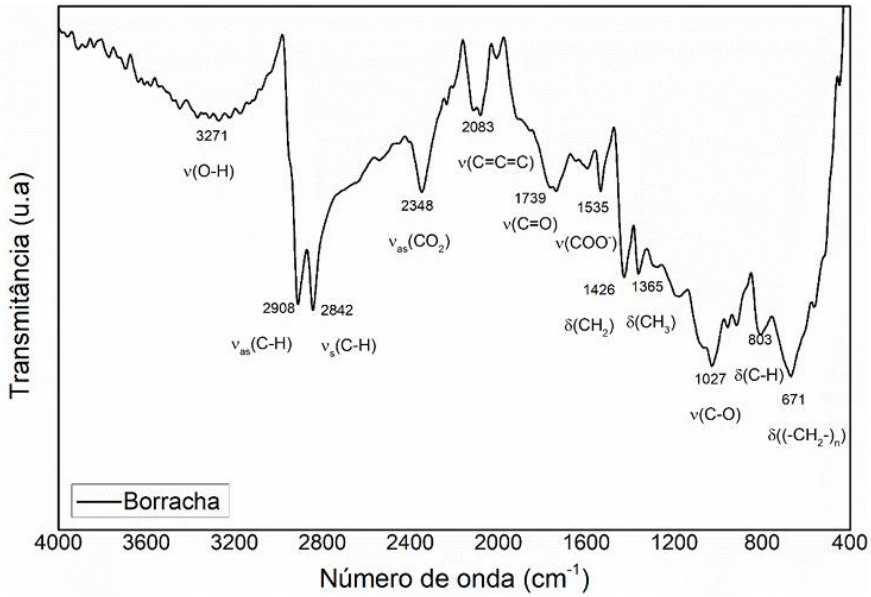


Figura 02: Espectro de FTIR para borracha
Fonte: Autor (2026)

Os picos observados em 2348 cm^{-1} e 2083 cm^{-1} estão relacionados, respectivamente, às vibrações de espécies como CO_2 e estruturas do tipo C=C=C (alenos), podendo estar associados à presença de aditivos, como negro de fumo, ou aos próprios polímeros elastoméricos constituintes da borracha. A presença de uma banda em torno de 1739 cm^{-1} indica grupos carbonila (C=O), típicos de ésteres ou ácidos carboxílicos, enquanto o pico em 1535 cm^{-1}, associado a grupos carboxilatos, pode estar relacionado à presença de aditivos como poliésteres e fibras incorporadas durante a fabricação dos pneus.

Os picos localizados entre 1000 e 1250 cm^{-1}, atribuídos a ligações C–O, também reforçam a presença dessas funções orgânicas, além de outras estruturas químicas que apresentam esse tipo de ligação. Destaca-se ainda a presença de uma banda de intensidade moderada entre 3100 e 3600 cm^{-1}, referente às ligações O–H, que pode indicar a presença de álcoois, ácidos carboxílicos ou processos de oxidação superficial do material, frequentemente associados ao envelhecimento ou ao beneficiamento da borracha reciclada. Os picos em 1426 cm^{-1} e 1365 cm^{-1}, referentes à deformação angular de grupos metileno ($-CH_2-$) e metila ($-CH_3$), respectivamente, corroboram os resultados observados nas bandas de estiramento axial em 2908 cm^{-1} e 2842 cm^{-1}. Por fim, os picos na região entre 900 e 800 cm^{-1} correspondem às vibrações de ligações C–H associadas a grupos insaturados, enquanto a banda em 671 cm^{-1} é atribuída ao movimento do tipo *rocking* de cadeias saturadas longas $-(CH_2)n-$, com $n \geq 4$, característico de estruturas poliméricas elastoméricas.

Resultados semelhantes foram encontrados por Ahmed e Faizan (2024), que observaram correspondência entre as bandas localizadas em 2908 cm^{-1} e 2842 cm^{-1} neste estudo e aquelas identificadas em 2921 cm^{-1} e 2864 cm^{-1} pelos autores, ambas atribuídas aos estiramentos simétrico e assimétrico de grupos metileno ($-CH_2$), característicos de cadeias hidrocarbônicas presentes na borracha natural e sintética. De forma semelhante, a presença da banda em 3271 cm^{-1}, associada às ligações O–H,

também foi observada pelos autores na faixa entre 3426 cm^{-1} e 3853 cm^{-1}, indicando grupos hidroxila relacionados à umidade adsorvida, processos oxidativos ou compostos aditivos. A banda em 1739 cm^{-1}, correspondente ao grupo carbonila (C=O), apresentou comportamento compatível com o pico observado em torno de 1900 cm^{-1}, sendo atribuída à presença de compostos oxigenados provenientes de aditivos e processos de envelhecimento da borracha. Além disso, a proximidade entre os picos de 1027 cm^{-1} e 1036 cm^{-1} reforça a presença de ligações C–O, associadas a funções oxigenadas e estruturas químicas presentes no material reciclado.

Essas semelhanças confirmam a composição típica da borracha de pneus inservíveis e validam a caracterização realizada, indicando potencial compatibilidade com o ligante asfáltico para aplicação em misturas asfalto-borracha. De modo geral, os resultados confirmam que a borracha analisada apresenta composição compatível com resíduos de pneus reciclados, contendo grupos funcionais que favorecem sua interação com o ligante asfáltico. A presença de cadeias hidrocarbônicas e grupos oxigenados pode contribuir para a adesão e compatibilidade com o cimento asfáltico de petróleo, favorecendo a modificação do ligante e o desempenho das misturas asfalto-borracha.

A Figura 03 apresenta os resultados das análises termogravimétrica (TGA) e termodiferencial (DTA) da borracha de pneu utilizada na pesquisa, permitindo avaliar sua estabilidade térmica e os principais estágios de degradação em função da temperatura.

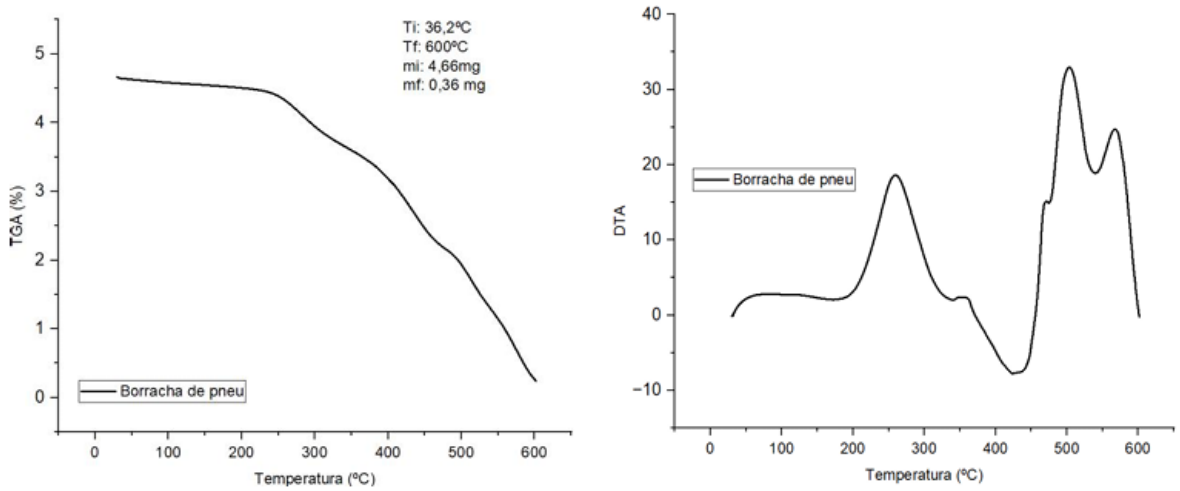


Figura 03: Termograma da borracha de pneu
Fonte: Autor (2026)

A curva de TGA evidencia que a borracha apresenta elevada estabilidade térmica nas temperaturas iniciais, com baixa variação de massa até aproximadamente 250 °C, indicando reduzida presença de umidade e compostos voláteis de baixa massa molecular. A partir de aproximadamente 300 °C, observa-se o início mais acentuado da perda de massa, associado à decomposição térmica dos constituintes orgânicos da borracha, especialmente das cadeias elastoméricas e aditivos presentes em sua formulação. Entre 350 °C e 500 °C ocorre a principal etapa de degradação, caracterizada pela decomposição da borracha natural e sintética, além da liberação de compostos voláteis provenientes de plastificantes, óleos e outros aditivos utilizados no processo de fabricação dos pneus.

A taxa de perda de massa foi de 92,3%, com a massa inicial da amostra foi de 4,66 mg e a massa final residual foi de 0,36 mg, indicando a permanência de uma fração residual associada, principalmente, ao negro de fumo, cargas minerais e outros componentes inorgânicos presentes na composição do pneu. Esse resíduo final é característico de materiais elastoméricos vulcanizados e confirma a complexidade composicional da borracha reciclada. A curva de DTA complementa essa análise ao evidenciar os eventos térmicos ocorridos durante o aquecimento. Observam-se picos endotérmicos e exotérmicos distribuídos ao longo da faixa de temperatura analisada, indicando transições térmicas e processos de decomposição química. O pico observado entre 200 °C e 300 °C pode estar relacionado à volatilização de compostos leves e ao início da degradação de aditivos, enquanto os eventos mais intensos entre 450 °C e 600 °C correspondem à degradação das estruturas poliméricas mais estáveis e à oxidação residual do material.

Ahmed e Faizan (2024) observaram comportamento térmico semelhante, com estabilidade térmica até aproximadamente 300 °C e principal degradação também concentrada entre 350 °C e 500 °C, associada à decomposição da borracha natural (40,2%) e sintética (33,4%), além da presença de resíduo final relacionado ao negro de fumo (16,4%) e cinzas (3,8%). A diferença entre a perda de massa observada neste estudo e a reportada pelos autores pode estar associada à variação na composição dos pneus utilizados, na proporção entre borracha natural e sintética, no teor de negro de fumo, na presença de cargas minerais e no grau de envelhecimento do resíduo reciclado.

De forma complementar, Ma et al. (2025) também verificaram elevada estabilidade térmica da borracha até aproximadamente 300 °C, com início da degradação em 335,89 °C para borracha com baixo grau de reticulação e em 342,85 °C para borracha com alto grau de reticulação, apresentando perdas de massa de 63,88% e 60,38%, respectivamente. Os autores

destacam que materiais com maior grau de reticulação apresentam maior estabilidade térmica devido à maior densidade de ligações cruzadas, que restringem a mobilidade das cadeias moleculares e exigem maior energia para a decomposição. A maior perda de massa observada neste trabalho pode indicar menor grau de reticulação ou menor teor de componentes inorgânicos, além da heterogeneidade característica da borracha reciclada utilizada comercialmente.

Considerações Finais

Os resultados obtidos por meio das análises de FTIR e DTA/TGA permitiram confirmar que a borracha de pneus reciclados utilizada neste estudo apresenta características químicas e térmicas compatíveis com sua aplicação como modificador do ligante asfáltico na produção de asfalto-borracha. O espectro de FTIR evidenciou a presença de grupos funcionais característicos, como ligações C–H, O–H, C=O e C–O, associados à estrutura elastomérica da borracha e a compostos oxigenados provenientes de aditivos e processos de oxidação, favorecendo a interação com o cimento asfáltico de petróleo.

A análise termogravimétrica demonstrou elevada estabilidade térmica até aproximadamente 250–300 °C, com a principal etapa de degradação ocorrendo entre 350 °C e 500 °C, faixa compatível com as temperaturas normalmente empregadas na produção de misturas asfálticas. A presença de resíduo final também confirmou a existência de negro de fumo e cargas minerais, componentes importantes para o desempenho mecânico do material. A comparação com estudos da literatura, reforçou a confiabilidade dos resultados obtidos, evidenciando comportamento semelhante quanto à composição química e ao processo de degradação térmica da borracha reciclada. As diferenças observadas foram atribuídas à variabilidade na composição dos pneus, ao grau de reticulação e às condições de beneficiamento do resíduo.

Do ponto de vista ambiental, o aproveitamento da borracha de pneus inservíveis na pavimentação asfáltica representa uma alternativa sustentável para a redução de passivos ambientais, promovendo a valorização de resíduos, a diminuição da disposição inadequada e a redução da demanda por materiais virgens. Dessa forma, o uso da borracha reciclada contribui para o fortalecimento da economia circular e para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na infraestrutura urbana e rodoviária.

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em especial ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada para a realização da presente pesquisa. Agradecem, ainda, às instituições e empresas fornecedoras dos insumos utilizados, em especial à CBAA Asfaltos LTDA, bem como à empresa doadora da borracha de pneus tratada, pela contribuição no desenvolvimento do estudo. É reconhecido de modo distinto o apoio dado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo incentivo ao desenvolvimento científico e à formação de recursos humanos.

Referências Bibliográficas

AHMED, K. Z.; FAIZAN, M. **Comprehensive characterization of waste tire rubber powder.** Journal of The Institution of Engineers (India): Series E, v. 105, n. 1, p. 11-20, 2024. Doi: 10.1007/s40034-023-00282-8

ASUBADIN-ESPIN, P.; DE-LA-CRUZ, R.; BUELE, J. **A Review of Technological Innovations in Rubber Recycling.** In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1434, p. 012007. IOP Publishing, 2024. Doi: 10.1088/1755-1315/1434/1/012007

BARRETO, J., FERNANDES, E. M., MOREIRA, R., PRATES, M., WAY, G., & SOUSA, J. B. **Sustainable Mixes with Reacted and Activated Rubber: Application on a Highly Cracked Pavement.** International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 455-467, 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA N° 416, de 30 de setembro de 2008.** Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. DOU n°188 de 2009.

CASTAÑEDA-ROBLES, I. E.; OLGUÍN-COCA, F. J.; GAONA-TIBURCIO, C. **Sustainable Technologies Applied to Asphalt Paving by Reusing Polymeric Waste.** Sustainable Spaces in Arid and Semiarid Zones of Mexico. Cham: Springer International Publishing, 2024. p. 111-126. Doi: 10.1007/978-3-031-53418-8_7

DWIVEDI, C.; MANJARE, S.; RAJAN, S. K. **Recycling of waste tire by pyrolysis to recover carbon black: Alternative & environment-friendly reinforcing filler for natural rubber compounds.** Composites Part B: Engineering, v. 200, p. 108346, 2020. Doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108346

FARINA, A.; RUFFINO, B.; KUTAY, E.; **Anctil, A. Leaching behavior of metals from asphalt mixtures modified with crumb rubber from scrap tires.** Waste Management, v. 179, p. 44-54, 2024. Doi: 10.1016/j.wasman.2024.03.003

GIOVANI, A. M.; SANDRA, O.; FRANCISCO, G.; PEDRO, C.F. **Sustainable Practices in Asphalt Pavements and their Possible Applications in the Brazilian Market.** International Journal of Development Research, v. 11, n. 02, p. 44850-44855, 2021. Doi: 10.37118/ijdr.21245.02.2021

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório pneumáticos: Resolução Conama nº 416/09.** Brasília: IBAMA, 2025.

JAMIESON, S.; WHITE, G.; V ERSTRATEN. L. **Principles for incorporating recycled materials into airport pavement construction for more sustainable airport pavements.** Sustainability, v. 16, n. 17, p. 7586, 2024. Doi: 10.3390/su16177586

LIU, C., WANG, H., LIU, S., YANG, D. E XIONG, Y. **Performance Evaluation of Asphalt-Pavement Crack-Repair Materials.** Materials, v. 18, n. 7, p. 1611, 2025. Doi: 10.3390/ma18071611

MA, Y.; YIN, T.; XIE, T.; CAI; B.; ZHAO, Q.; YU, H.GONG, X.; ZHANG, X.; XIANG, H. **Influence of rubber cross-linking degree on compatibility and performance of modified asphalt: Rheological characterization and molecular simulation.** Case Studies in Construction Materials, p. e05487, 2025. Doi: 10.1016/j.cscm.2025.e05487

MAIA, I. G. **Avaliação de ligantes e misturas asfálticas preparadas com péletes de asfalto-borracha.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2023.

POULOSE, N.. **Advancing sustainability through tire recycling innovations.** International Journal of Automotive Science And Technology, v. 9, n. 3, p. 325-342, 2025. Doi: 10.30939/ijastech..1655579

RODRÍGUEZ-ALLOZA, A. M.; GARRAÍN, D. **Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements Incorporating Recycled Tire Rubber and Warm Mix Additives.** Coatings, v. 16, n. 2, p. 229, 2026. Doi: 10.3390/coatings16020229

ZHAO, Z., WU, S., XIE, J., YANG, C., YANG, X., CHEN, S., & LIU, Q. **Recycle of waste tire rubber powder in a novel asphalt rubber pellets for asphalt performance enhancement.** Construction and Building Materials, v. 399, p. 132572, 2023. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132572.

ECONOMIA CIRCULAR NA PAVIMENTAÇÃO: APLICAÇÃO DE MISTURAS SOLO-RAP EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

1 Chrysttyan Thalles Ribeiro Félix, 2Ana Maria Gonçalves Duarte, 3 Diego José Araújo Viegas; 4 Gabriel Freire dos Santos; 5 Valter ferreira de Souza Neto; 6 Thamires Dantas Guerra; 7 Ana Letícia Feitosa de Macedo; 8 Auanny Alícia Alves da Silva

1 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: chrysttyan@gmail.com; 2 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br; 3 Universidadede Pernambuco – UPE, email: diegoaraujoviegas@hotmail.com;4 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:gabrielfreire56789@gmail.com; 5Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:valterneto51@gmail.com; 6 thamires_guerra@hotmail.com; 7 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:leticiamacedo.engcivil@gmail.com; 8 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:auannyaliciasilva@gmail.com

Palavras-chave: Solos lateríticos; Camada de base; Sustentabilidade.

Resumo

O crescimento da infraestrutura viária tem se intensificado no decorrer dos últimos anos, trazendo um maior consumo dos recursos naturais, e evidenciando, por sua vez, a necessidade de se procurar por soluções ambientalmente mais sustentáveis para as práticas da engenharia de pavimentos. Nesse contexto, este estudo visa avaliar o comportamento mecânico de misturas de solo laterítico combinado com material fresado (RAP) para serem aplicados em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Nesse contexto, esse estudo reuniu os ensaios de compactação, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência, para as misturas com 30%, 45% e 60% de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), estabilizadas com a presença de 2% de Cimento Portland IV-32. Os resultados indicaram que a utilização de RAP promove melhorias quanto ao desempenho mecânico das misturas, dando um destaque especial para mistura com 30% de RAP em relação ao RT, que trouxe uma grande melhoria quando comparado com o material de referência. Em paralelo, as misturas com teores mais elevados de RAP apresentaram maiores valores de módulo de resiliência quando comparados com a mistura com 0% de RAP, indicando maior rigidez e maior capacidade de recuperação elástica. Dito isto, em relação à perspectiva ambiental, a utilização do RAP vem a contribuir com as práticas da economia circular, contribuindo de maneira significativa para uma redução na necessidade de utilização de materiais naturais e minimizando o descarte inadequado de resíduos. Pode-se afirmar que as misturas solo-RAP demonstram elevado potencial técnico como ambientalmente sustentável para sua aplicação em estruturas de pavimentos flexíveis.

Introdução

No decorrer dos últimos anos a infraestrutura viária está em uma crescente contate, sendo amplamente impulsionada pelo elevado crescimento dos centros urbanos, aumento de fluxo nas rodovias como também no aumento de fluxo de cargas nos pavimentos, fazendo com que o consumo de recursos naturais para as construções das rodovias também seja intensificado. Assim, a procura de soluções sustentáveis tem se tornado fundamental para a engenharia de pavimentos, no qual se utiliza de numerosos recursos e materiais para as suas obras. Nesse contexto, Dagosin *et al.* (2026) afirma que o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) é um material bastante descartado em aterros, mas que que possui ainda uma alta capacidade de aplicação em obras viárias, seja na aplicação diretamente da mistura asfáltica, seja nas demais camadas estruturais do pavimento devido sua capacidade mecânica, parte pouco estudada atualmente.

A utilização de material fresado em misturas asfálticas, por exemplo, já é uma prática recorrente dentro dos estudos atuais. Sendo assim, Azarhoosh e Koohmishi (2026) afirma que a aplicação do RAP em misturas asfálticas novas trás uma contribuição direta para a redução de resíduos como também para o aumento da eficiência no uso dos materiais, podendo até considerar como uma das principais práticas da economia circular na engenharia de pavimentos. Em concordância com esse cenário, Pinheiro *et al.* (2022), afirma que a utilização do RAP como uma alternativa de restauração e construção de novas rodovias tem se mostrado como uma alternativa vantajosa quanto ao desempenho econômico e ambiental.

Nesse contexto, pode-se perceber que a utilização de misturas de Solo-RAP tem se destacado com uma alternativa bastante viável e ambientalmente adequada para a aplicação também em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Neste sentido, pode-se afirmar que a combinação de solos locais com o RAP traz a possibilidade de aproveitamento simultâneo de dois materiais, reduzindo a grande necessidade de insumos convencionais. Além da questão ambiental existente, pode-se verificar que a mistura de solo-RAP com materiais cimentantes pode promover melhorias significativas no que se refere ao desempenho mecânico, melhor estabilização, melhor resistência e durabilidade, tornando-o apto a suportar mais solicitações e tráfego.

Deste modo, o presente artigo tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de misturas de solo-RAP aplicadas em camadas estruturais de pavimento flexível, avaliando assim a sua viabilidade técnica e seu potencial como uma alternativa sustentável quanto aos materiais usualmente aplicados na engenharia rodoviária.

Materiais e Métodos

Materiais

Para a elaboração desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: solo e o RAP. No que tange em relação ao solo, foi feita a coleta do material na cidade de Cabo de Santo Agostinho no estado de Pernambuco. Para que a coleta fosse realizada, foi feita a limpeza do local e feita a extração de uma amostra indeformada do solo, preservando os seus constituintes minerais, mas não sua estrutura original, a qual foi alterada no processo de extração e com o alívio de tensões do solo. A amostra do solo laterítico utilizado na pesquisa foi selecionada com base em mapas pedológicos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A Figura 01 ilustra o solo utilizado na pesquisa.



Figura 01: Solo laterítico utilizado na pesquisa
Fonte: Farias (2023.)

Com relação ao *Reclaimed Asphalt Pavement* foi utilizado material oriundo de um serviço de fresagem da rodovia federal BR 230 localizada no estado da Paraíba, especificamente nos quilômetros 35,7 e 42. A figura 02 apresenta uma amostra desse material.



Figura 02: *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) utilizado na pesquisa.
Fonte: Macêdo (2022)

Métodos

Para a realização desta pesquisa utilizou-se a metodologia representada no fluxograma da Figura 03. Nesse contexto, pode-se afirmar que a pesquisa foi dividida em duas etapas, na qual a primeira contempla a coleta dos materiais, ensaios de caracterização, ensaios de compactação, e a dosagem dos corpos de prova. Salienta-se que todos os ensaios foram de acordo com as normas regulamentadoras vigentes.

No que se refere aos ensaios de caracterização dos materiais foram realizados os de granulometria (NBR 7181:2016), Limite de Liquidez (NBR 6459:2016), Limite de Plasticidade (NBR 7180:2016) e Determinação de Densidade Real (DNER ME 93:1994) para o solo laterítico. Para o cimento CP IV-32 foram realizados o de Massa Específica (NM 23:2001), Índice de finura por meio da peneira n° 200 (NBR 12826:2014), Área específica (NBR 18:2012), Tempo de início e fim de pega (NM 65:2003) e Resistência à compressão (NBR 7215:2019). E para o material fresado foi realizado o ensaio de granulometria.

A segunda etapa da pesquisa consiste na realização dos ensaios mecânicos, das quais se destacam: o ensaio de Tração por compressão diametral regido pela ABNT NBR 7222:2011 e o ensaio de Módulo de Resiliência regido pelas diretrizes do DNIT ME 134/2018.

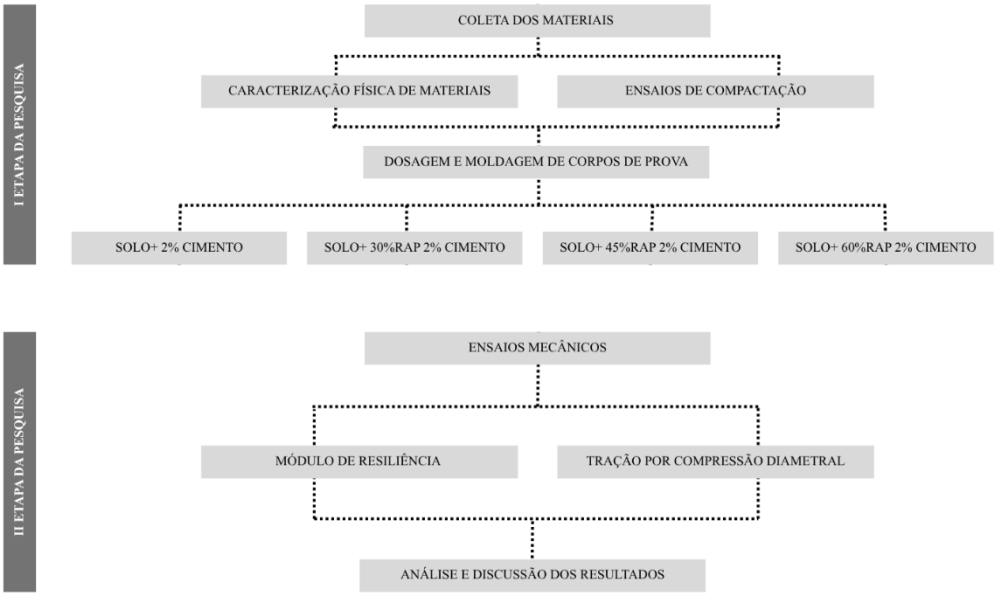


Figura 03: Fluxograma das etapas da pesquisa.
Fonte: Autores (2026)

Resultados e Discussão

Ensaio de compactação

Com base nos resultados obtidos para a caracterização dos materiais pode-se inferir que os resultados obtidos indicam que todos estão dentro dos padrões esperados e sugeridos pela norma, tornando viável a utilização desses materiais para o desenvolvimento desta pesquisa. Para o ensaio do ensaio de compactação foi adotado um valor fixo da presença do cimento CP IV-32 e aumentando a porcentagem da presença de material fresado. Nesse sentido, para que se fosse possível realizar os ensaios mecânicos se fez necessário plotar as curvas de compactação, o qual nos fornecesse os dados de massa específica ótima e umidade ótima para serem utilizados na compactação dos corpos de prova. A figura 04 ilustra os resultados obtidos para o ensaio de compactação.

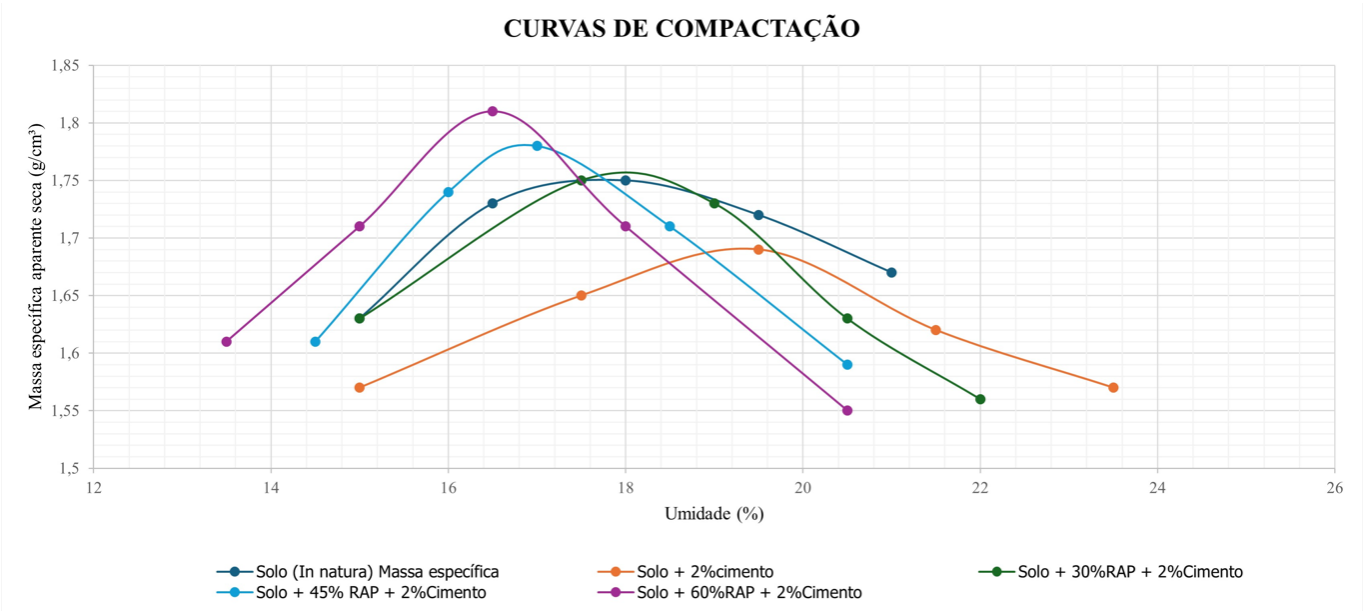


Figura 04: Curvas de compactação.
Fonte: Autores (2026)

Conforme resultados obtidos, verifica-se que a adição de cimento ao solo promoveu uma redução de massa específica seca máxima, concomitante a uma diminuição da umidade ótima. Além disso, observa-se que com a incorporação do material

fresado de forma gradativa, na presença constante no percentual de cimento, resultou em uma redução significativa da umidade ótima quando comparada com a mistura solo + cimento.

Esse comportamento diverge do observado por Du *et al.* (2025), que relataram um aumento da umidade ótima com a incorporação do material fresado, atribuindo a sua natureza hidrofóbica. Porém, essa divergência pode ser explicada através das características do material de base, que em solos lateríticos, a adição do RAP tende a diminuir a fração fina ativa e a afinidade com a água, resultando em uma menor demanda de água na mistura, efeito que pode ter sido potencializado com a presença do cimento.

Resistência à Tração por compressão diametral - RT

No que se refere a resistência à tração (Gráfico 02) foi possível observar que as misturas com contendo material fresado obtiveram uma resistência maior quando comparadas com a mistura de referência (0%RAP). Nesse sentido, pode-se afirmar que a mistura com 30%RAP foi a que teve um maior valor de resistência à tração quando comparada com a de referência (0%RAP), tendo um valor de RT de aproximadamente 30% maior. Além disso, pode-se observar que o comportamento foi semelhante ao encontrado por Lima, Baldovino e Izzo *et al.,* (2023) para a mistura de solo +60%RAP +5%Cimento, evidenciando que maiores teores de RAP combinados com maiores teores de cimento podem trazer uma melhor resistência à tração para solos de camada de base e sub-base.

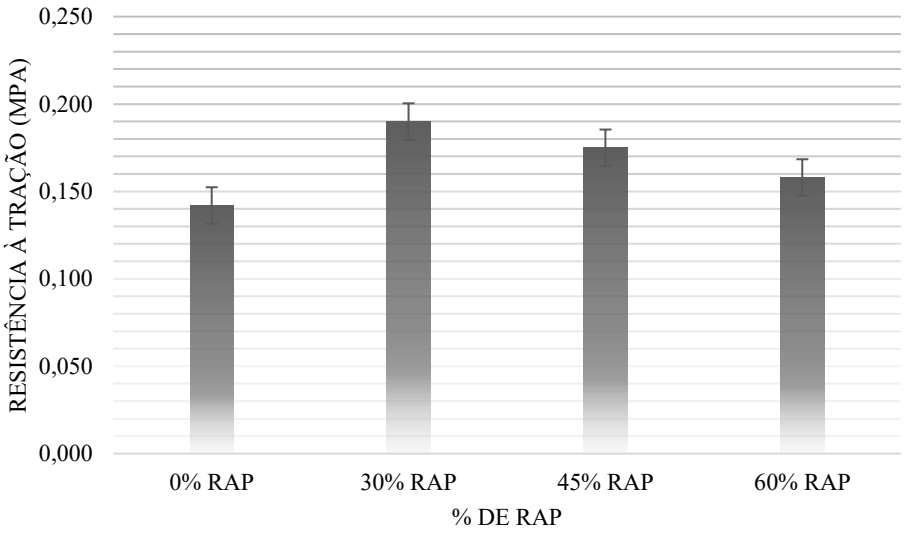


Gráfico 02: Resistência à Tração por Compressão Diametral.
Fonte: Autores (2026)

Nesse contexto, pode-se ainda afirmar que a utilização de RAP nas camadas de base visando promover a economia circular pode ser bem aceita pela comunidade da engenharia de pavimentos, haja vista que traz uma melhoria mecânica para essas estruturas, melhor estabilizando o solo, como também uma melhoria do ponto de vista ambiental, já que o material fresado que seria descartado e poluiria meio ambiente teria uma nova destinação dentro dos projetos de rodovias com pavimentos flexíveis.

Módulo de resiliência - MR

No que se refere o Módulo de resiliência (Gráfico 03) pode-se observar que todas as misturas obtiveram um valor de MR médio satisfatórios, e que as misturas com presença de material fresado obtiveram valores médios superiores a mistura sem a presença do material. A mistura com 30%RAP obtive um valor próximo a mistura de referência (0%RAP), enquanto as misturas com mais presença de RAP obtiveram valores bem superiores quando comparados com a de referência, trazendo uma atenção especial para a mistura com 60%RAP.

O solo com 60%RAP obteve um comportamento semelhante ao encontrado por Fajardo (2025) com a mistura de 50%SOLO + 50%RAP, indicando que a adição do material fresado proporciona um aumento a resistência, trazendo benefícios para a camada de base do pavimento flexível, como também dando um novo destino ao material que seria descartado no meio ambiente. Concomitemente, observou-se que a mistura com 30%RAP obteve um comportamento superior ao obtido para a mistura de 75%Solo + 25%RAP, encontrado por Fajardo (2025), indicando que a presença maior do material fresado pode trazer benefícios, como também que a presença do 2% do cimento afeta positivamente nesses resultados.

Além disso, pode-se dizer que a mistura de solo +2%cimento +60%RAP obteve um aumento de 32,20% quando comparado com a mistura com 0%RAP, e um aumento de 70% ao MR do solo laterítico sem adição de material fresado comparado aos valores encontrado por Fajardo (2025).

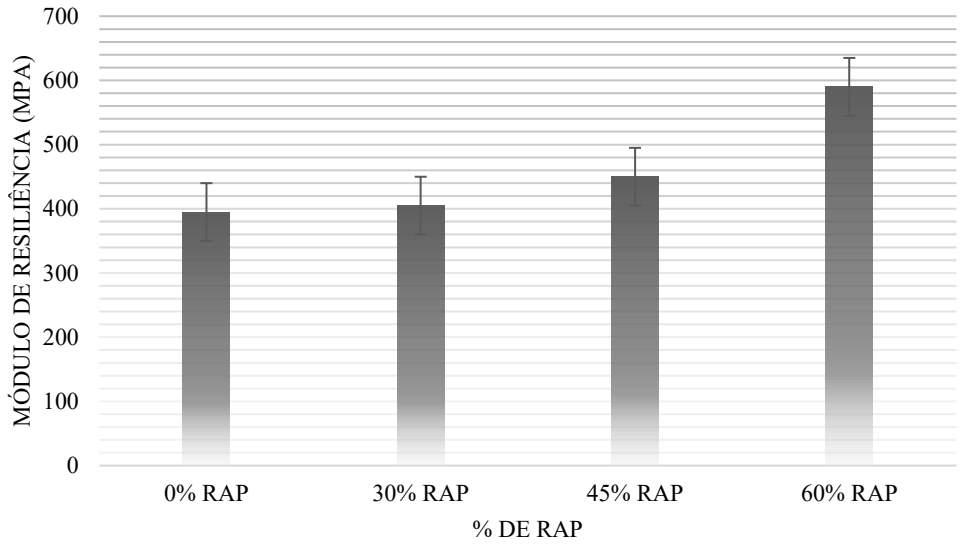


Gráfico 03: Módulo de Resiliência.
Fonte: Autores (2026)

A obtenção de um aumento do módulo de resiliência nos evidenciam que a possibilidade de aplicar material fresado para a estabilização de materiais de base e sub-base de solos traz benefícios tanto para a mecânica dessas estruturas em pavimentos flexíveis, quanto benefícios ambientais. No que tange aos benefícios ambientais seria com relação a economia circular, haja vista a nova destinação de um material que seria descartado em aterros ou de forma inadequada e podendo poluir o ambiente.

Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a incorporação do material fresado (RAP) em misturas com solos lateríticos promove melhorias bem significativas no comportamento mecânico do material, dando uma atenção especial para a resistência à tração por compressão diametral e ao módulo de resiliência. Foi possível observar que as misturas com presença do RAP indicaram um desempenho superior quando comparadas com a mistura de referência, dando um destaque especial para a mistura de solo + 30%RAP + 2%Cimento, a qual evidenciou uma melhoria de quase 30% no RT, dando ênfase a contribuição positiva do material na capacidade de suporte da camada.

Concomitante a isso, foi possível observar que o aumento do teor do material fresado, combinado com à presença do cimento, contribui a resistência do material e aumento da rigidez, resultado da melhoria na interação entre as partículas, da presença do ligante asfáltico residual e da formação da matriz mais coesa. Os resultados para o módulo de resiliência reforçam esse comportamento, trazendo a indicação de que misturas com maiores teores de RAP apresentam maior capacidade de recuperação elástica e melhor desempenho estrutural quando aplicadas em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

Deste modo, a utilização do RAP se destaca como uma grande alternativa alinhada com os princípios da economia circular, uma vez que traz a possibilidade e realizar o reaproveitamento de resíduos oriundos do processo de fresagem dos pavimentos, reduzindo a necessidade de realizar extração de materiais convencionais (materiais naturais) e minimizando ou até mesmo mitigando os impactos ambientais do descarte inadequado. Desta forma, a aplicação do solo-RAP representa uma solução bastante viável e ambientalmente sustentável para a engenharia de pavimentos, contribuindo para o desenvolvimento de infraestruturas mais eficientes e com um impacto ambiental reduzido.

Assim, a utilização do RAP em camadas de pavimentos não apenas transforma o destino de um resíduo, mas também consolida uma engenharia mais eficiente, resiliente e com um grau de sustentabilidade maior.

Comentários finais

Os resultados apresentados demonstraram que a incorporação de RAP em misturas de solo laterítico promove melhorias no comportamento mecânico, como um aumento na resistência à tração como um aumento no módulo de resiliência quando comparados com a mistura de referência. Além disso, afirma-se que a utilização do RAP se mostra uma alternativa sustentável, que está em alinhamento com os princípios da economia circular, ao possibilitar o reaproveitamento deste resíduo e a diminuição do consumo de materiais naturais. Dessa forma, as misturas solo-RAP apresentam uma viabilidade técnica e ambiental para a aplicação em camada de base e sub-base em pavimentos flexíveis.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande, por sediar e dar todo o apoio necessário para a execução de todos os ensaios necessários para a elaboração e execução dessa pesquisa.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12826:2014. *Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).* Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459:2016. *Solo — Determinação do limite de liquidez.* Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180:2016. *Solo — Determinação do limite de plasticidade.* Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181:2016. *Solo — Análise granulométrica.* Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215:2019. *Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão.* Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 23:2001. *Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.* Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 65:2003. *Cimento Portland — Determinação do tempo de pega.* Rio de Janeiro, 2003.

AZARHOOSH, Alirexa; KOOHMISHI, Mehdi. Integrating 10R principles in pavement engineering: Circular economy pathway for reclaimed asphalt pavement. Cleaner Waster Systems, Volume 13, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clwas.2026.100483.

BALDOVINO, Jair de Jesús; IZZO, Ronaldo. Sustainable Use of Recycled Asphalt Pavement in Soil Stabilization. Civil Engineering Journal, volume 9, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-09-016.

DAGOSIN, João Vitório; BILÉSIMO, Natásia Cardoso; ZACCARON, Alexandre; ARCARO, Sabrina; CAMÕES, Aires; RIBEIRO, Manuel J.; RAUPP-PEREIRA, Fabiano. Valorization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) from the Highway Materials Circularity. International Journal of Pavemente Research and Technology, 2026. DOI:

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME 093:1994. *Solos — Determinação da densidade real.* Rio de Janeiro, 1994.

DU, W.; LI, Y.; CHEN, M.; YANG, S.; LIU, X.; WANG, Y. Mechanical behavior of cement-stabilized macadam materials coupled with recycled asphalt pavement (RAP) and latex. *Case Studies in Construction Materials*, volume 22, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04894.

FARIAS, M. L. A. Estudo e classificação de solos lateríticos finos, arenosos e pedregulhosos naturais e melhorados com ligantes hidráulicos para utilização em camadas de pavimento flexível. (Tese – Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, p. 372. 2023.

https://doi.org/10.1007/s42947-026-00706-9.

FAJARDO, Gustavo Antezana. Estudo do comportamento mecânico de solo laterítico argiloso incorporado com resíduo fresado de asfalto. 2025. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025. doi:10.11606/D.18.2025.tde-09022026-101311.

MACÊDO, Ana Leticia Feitosa de. Avaliação da adição de óleo de algodão como modificador de ligante em misturas asfálticas recicladas. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

PINHEIRO, G., VASCONCELOS, K., & BERNUCci, L. Reclaimed Asphalt Pavement Binder Extraction and Recovery Evaluation and Their Effects on the Recycling Agent Assessment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2676, 2026. DOI: https://doi.org/10.1177/03611981221094567.

TRADE-OFFS NA SELEÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS: EVIDÊNCIAS DE UM ESTUDO MULTICASOS EM CONTEXTO ORGANIZACIONAL

1 Isis Lara da Silva Marques, 2 Fernanda Neves da Silva Andrade, 3 Carlos do Amaral Razzino . Vívian Karina Bianchini 5 Glauco Fabrício Bianchini 6 Eloá Cristina Figueirinha Pelegrino 7 Gustavo Henrique Marques 8 Paulo Renato Pakes

1 Pós-graduação em Engenharia de Produção – PPGEP – UNESP - Bauru, e-mail: isis.lara@unesp.br; 2 Pós-graduação em Engenharia de Produção – PPGEP – UNESP - Bauru, e-mail: neves.silva@unesp.br; 3 Departamento de Engenharia de Produção, UNESP, Bauru, e-mail: carlos.razzino@unesp.br; 4 Departamento de Engenharia de Produção, UNESP, Bauru, e-mail: vivian.bianchini@unesp.br; 5 Departamento de Engenharia Civil, UFMT, Cuiabá, e-mail: glauco.bianchini@ufmt.br; 6 Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT, Cuiabá, e-mail: eloa.pelegrino@ufmt.br; 7 Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP – UNESP – Bauru, e-mail: gh.marques@unesp.br; 8 Departamento de Administração, UFSCar, Buri, e-mail: paulopakes@ufscar.br

Palavras-chave: Seleção de materiais; Embalagens alimentícias; Sustentabilidade.

Resumo

A crescente demanda por embalagens no setor alimentício tem intensificado os desafios relacionados à sustentabilidade, especialmente no que se refere à seleção de materiais. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo analisar como empresas de diferentes segmentos da cadeia de embalagens alimentícias realizam o processo de seleção de materiais, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais, bem como a incorporação de princípios da economia circular em seus processos decisórios. Para isso, adotou-se uma abordagem qualitativa, por meio de um estudo de casos múltiplos conduzido em quatro empresas, com coleta de dados realizada por meio de entrevistas semiestruturadas e análise de documentos.

Os resultados indicam que o processo de seleção de materiais é caracterizado por sua natureza multidisciplinar e pela predominância de critérios técnico-funcionais e econômicos, com destaque para aspectos como segurança dos alimentos, propriedades de barreira, estabilidade produtiva e custo. A sustentabilidade, embora reconhecida, apresenta influência limitada, sendo frequentemente condicionada à viabilidade técnica e econômica. *Evidencia-se* ainda a presença recorrente de *trade-offs* estruturais, especialmente entre desempenho técnico, custo e impacto ambiental, que restringem a adoção de materiais alternativos.

Adicionalmente, evidencia-se que a aplicação de princípios da economia circular ocorre de forma pontual e operacional, enquanto o uso de ferramentas estruturadas, como a Avaliação do Ciclo de Vida, é limitado ou inexistente nas empresas analisadas. Esses resultados evidenciam uma lacuna entre abordagens normativas da literatura e as práticas organizacionais, indicando que a incorporação da sustentabilidade depende não apenas de soluções técnicas, mas da forma como os processos decisórios são estruturados nas organizações.

Como contribuição, o estudo oferece evidências empíricas sobre a seleção de materiais em contexto organizacional real, destacando padrões decisórios e limitações recorrentes. Trata-se, contudo, de um estudo em desenvolvimento, cujos resultados devem ser interpretados à luz de suas limitações metodológicas, indicando oportunidades para pesquisas futuras que aprofundem a análise em diferentes contextos e ampliem o uso de abordagens quantitativas e integradas.

Introdução

O crescimento da população mundial e o aumento do consumo têm intensificado a demanda por embalagens no setor alimentício, ampliando a produção de materiais plásticos e, consequentemente, os desafios relacionados à gestão de resíduos e aos impactos ambientais associados (Ncube *et al.*, 2021; Barone *et al.*, 2025). Apesar de sua ampla utilização e relevância na preservação da qualidade e segurança dos alimentos ao longo da cadeia de suprimentos, as embalagens plásticas apresentam limitações significativas em termos de reciclabilidade, especialmente quando compostas por estruturas multicamadas, além de contribuírem para a persistência de resíduos no meio ambiente (Mathews; Moran; Jaiswal, 2021; Bauer *et al.*, 2021). Esse cenário evidencia a necessidade de uma transição de modelos lineares de produção para abordagens mais sustentáveis, fundamentadas nos princípios da economia circular (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

No contexto das embalagens alimentícias, a seleção de materiais representa uma etapa crítica no desenvolvimento de produtos, uma vez que envolve a conciliação de múltiplos critérios, incluindo desempenho técnico, segurança alimentar, viabilidade econômica e impactos ambientais (Zhang *et al.*, 2017; Mahajan; Singh; Arora, 2024). Contudo, tais decisões são marcadas por *trade-offs* estruturais, especialmente entre propriedades de barreira, reciclabilidade e custo, o que torna o processo decisório complexo e dependente de múltiplos fatores organizacionais e tecnológicos (Casson *et al.*, 2022; Farrukh; Sajjad, 2024). Nesse sentido, ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) têm sido amplamente utilizadas para apoiar a análise dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos, embora sua aplicação prática nas organizações ainda enfrente limitações relacionadas à complexidade metodológica e à disponibilidade de dados e à necessidade de conhecimento especializado (Pryshlakivsky; Searcy, 2021; Subal; Braunschweig; Hellweg, 2024).

Embora a literatura apresente avanços relevantes na análise técnica e ambiental das embalagens, *evidencia-se* uma predominância de estudos baseados em avaliações laboratoriais e modelos quantitativos, com ênfase na aplicação da ACV e na

comparação de materiais. Entretanto, permanecem limitadas as investigações empíricas voltadas à compreensão de como as empresas incorporam, na prática, critérios ambientais, técnicos e econômicos em seus processos decisórios relacionados à seleção de materiais (Matthews; Moran; Jaiswal, 2021; Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017). Essa lacuna torna-se ainda mais relevante diante das pressões regulatórias e de mercado por soluções mais sustentáveis, especialmente em setores como o de embalagens alimentícias, nos quais requisitos técnicos e sanitários restringem as alternativas de materiais.

A transição de modelos lineares de produção para abordagens mais sustentáveis tem sido amplamente discutida na literatura, especialmente no contexto da indústria de embalagens alimentícias. Nesse cenário, a economia circular emerge como um modelo que busca minimizar a geração de resíduos e maximizar a eficiência no uso de recursos, promovendo estratégias como redução, reutilização e reciclagem ao longo de toda a cadeia de suprimentos (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017). No setor de embalagens, essa transição está fortemente associada às decisões tomadas na fase de design, uma vez que a escolha dos materiais e a configuração estrutural das embalagens influenciam diretamente seu potencial de circularidade e recuperação ao final do ciclo de vida (Zhu *et al.*, 2022). Entretanto, soluções baseadas exclusivamente na reciclabilidade não garantem, por si só, benefícios ambientais consistentes, sobretudo em estruturas complexas e multimateriais, que dificultam os processos de recuperação e reinserção no sistema produtivo (Bauer *et al.*, 2021), podendo, inclusive, gerar *trade-offs* negativos quando consideradas outras etapas do ciclo de vida, como produção e transporte.

Nesse contexto, a seleção de materiais sustentáveis constitui uma etapa crítica no desenvolvimento de embalagens alimentícias, sendo caracterizada como um processo decisório complexo e multicritério, que envolve a análise simultânea de propriedades técnicas, econômicas e ambientais (Zhang *et al.*, 2017; Mahajan; Singh; Arora, 2024). A literatura destaca o uso de ferramentas estruturadas de apoio à decisão, como bancos de dados de materiais, métodos multicritério e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permitem avaliar o desempenho ambiental e orientar escolhas mais sustentáveis (Mudgal; Pagone; Salonitis, 2024). No entanto, a aplicação prática dessas ferramentas ainda enfrenta limitações, especialmente relacionadas à complexidade metodológica, à disponibilidade de dados e à integração entre áreas técnicas e organizacionais (Pollini; Rognoli, 2021), além de restrições associadas ao tempo de aplicação e à ausência de rotinas estruturadas de uso nas empresas. Além disso, materiais alternativos, como os de base biológica, frequentemente apresentam restrições técnicas, como menor desempenho de barreira e limitações no processamento, o que dificulta sua adoção em larga escala (DONKOR *et al.*, 2023; Sabry; El-Arab; Elwakil, 2026), especialmente em aplicações que exigem elevados níveis de proteção e vida de prateleira.

Complementarmente, o ecodesign tem sido apontado como uma abordagem estratégica para a incorporação de critérios ambientais no desenvolvimento de produtos, considerando todo o ciclo de vida da embalagem, desde a extração de matérias-primas até o descarte final (Pigosso; Rozenfeld; Mcaloone, 2013). A integração do pensamento de ciclo de vida ao processo de design permite evitar a transferência de impactos ambientais ao longo da cadeia e apoiar decisões mais consistentes em termos de sustentabilidade (Niero; Schmidt Rivera, 2018). Contudo, a literatura ressalta que iniciativas focadas em etapas isoladas do ciclo de vida podem gerar subotimizações, não contemplando adequadamente os chamados pontos críticos de impacto (Hauschild; Jeswiet; Alting, 2004). Ademais, a efetividade do ecodesign depende da integração entre aspectos técnicos, organizacionais e institucionais, sendo frequentemente limitada por barreiras estruturais e pela predominância de soluções incrementais, como substituição de materiais e melhorias na reciclabilidade (Maione; Lapko; Trucco, 2022; Simoens, 2024), o que indica um estágio ainda incipiente de maturidade em muitas organizações.

Apesar dos avanços teóricos e metodológicos, *evidencia-se* que a literatura ainda apresenta forte predominância de estudos quantitativos, especialmente baseados em Avaliação do Ciclo de Vida, com foco na comparação de materiais e na mensuração de impactos ambientais. Por outro lado, permanecem limitadas as investigações empíricas voltadas à compreensão de como os critérios de sustentabilidade são efetivamente incorporados nos processos decisórios organizacionais, bem como as barreiras e *trade-offs* enfrentados pelas empresas na prática (Matthews; Moran; Jaiswal, 2021; Afif; Rebolledo; Roy, 2022; Weinrich *et al.*, 2024). Evidências recentes indicam que esses processos decisórios tendem a ser pouco estruturados, frequentemente orientados por critérios econômicos e influenciados por pressões externas, como fornecedores e requisitos regulatórios, o que reforça a necessidade de investigação empírica em contextos organizacionais reais (Weinrich *et al.*, 2024). Nesse sentido, torna-se relevante o desenvolvimento de estudos que explorem, em contextos organizacionais reais, a forma como decisões sobre a seleção de materiais é conduzida, contribuindo para reduzir a lacuna entre abordagens normativas e práticas empresariais no setor de embalagens alimentícias, especialmente no que se refere à priorização de critérios e à gestão de *trade-offs.*

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar como empresas do setor de embalagens alimentícias realizam a seleção de materiais para embalagens, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais, bem como a incorporação de princípios da economia circular em seu processo decisório. Para isso, foi adotada uma abordagem qualitativa, por meio de um estudo de casos múltiplos, buscando compreender, de forma aprofundada, as práticas organizacionais, os *trade-offs* envolvidos e as limitações enfrentadas na operacionalização da sustentabilidade no contexto das embalagens alimentícias.

Como contribuição, este estudo busca oferecer evidências empíricas sobre a tomada de decisão em contexto organizacional real, contribuindo para a compreensão da priorização de critérios e da existência de *trade-offs* na seleção de materiais, bem como para a redução da lacuna entre abordagens normativas da literatura e a prática industrial.

Materiais e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de abordagem qualitativa, de natureza aplicada e caráter exploratório-descritivo, uma vez que busca compreender, em profundidade, como os processos decisórios relacionados à seleção de materiais sustentáveis ocorrem em um contexto organizacional real. Trata-se de uma pesquisa qualitativa do tipo estudo de

casos múltiplos, conforme a abordagem proposta por Yin (2015), adequada para a investigação de fenômenos contemporâneos em contextos reais, especialmente quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não são claramente definidas. Esse tipo de estratégia permite a análise comparativa entre diferentes unidades de análise, possibilitando a identificação de padrões, semelhanças e diferenças entre os casos investigados. Segundo Yin (2015), essa abordagem contribui para o aumento da robustez analítica dos resultados, especialmente por meio da técnica de síntese cruzada entre casos.

As unidades de análise correspondem a empresas inseridas na indústria de alimentos, cuja operação envolve o uso de diferentes tipos de embalagens, como estruturas flexíveis laminadas, cápsulas, embalagens cartonadas e recipientes de vidro. A seleção dos casos foi realizada de forma intencional, com base em critérios de relevância teórica e acesso às informações, conforme recomendações metodológicas para estudos de caso (Miguel, 2012). Esses critérios incluíram: (i) envolvimento direto com decisões sobre embalagens; (ii) diversidade de materiais utilizados; e (iii) possibilidade de acesso a informações sobre o processo decisório. A escolha dos casos se justifica por sua relevância no contexto das embalagens alimentícias, bem como pela possibilidade de acesso a informações detalhadas sobre os processos decisórios relacionados à seleção de materiais.

A coleta de dados foi realizada por meio de entrevistas semiestruturadas, conduzidas com profissionais diretamente envolvidos nas decisões relacionadas às embalagens, atuantes na área de qualidade da empresa. Embora tenha sido priorizado um informante-chave por organização, buscou-se complementar as informações com dados secundários e evidências documentais, visando reduzir vieses individuais, conforme recomendações da literatura (Miguel, 2012). A utilização de entrevistas semiestruturadas permitiu explorar, de forma aprofundada, as percepções e experiências dos respondentes, garantindo flexibilidade na investigação e aderência ao contexto organizacional. Adicionalmente, foram considerados documentos e informações internas da empresa como fonte complementar de dados, contribuindo para a triangulação das evidências.

O instrumento de coleta de dados foi desenvolvido com base na literatura científica sobre sustentabilidade, economia circular, seleção de materiais e ecodesign, sintetizada a partir de revisão sistemática previamente conduzida. Foi elaborado um protocolo de pesquisa contendo o roteiro de entrevistas, procedimentos de coleta e diretrizes para registro dos dados, visando aumentar a confiabilidade do estudo (Miguel, 2012). O roteiro de entrevista foi estruturado em categorias analíticas que contemplam critérios de seleção de materiais, aplicação de princípios da economia circular, uso de ferramentas de apoio à decisão, inovações adotadas, barreiras enfrentadas e *trade-offs* no processo decisório, permitindo uma análise abrangente do fenômeno investigado.

Para a análise dos dados, adotou-se a técnica de análise de conteúdo, com categorização temática orientada pelas dimensões teóricas identificadas na literatura. O processo analítico envolveu etapas de codificação, redução dos dados e comparação entre os casos, permitindo a identificação de padrões e relações entre as variáveis analisadas. Esse procedimento possibilitou a organização, interpretação e comparação dos dados empíricos com os referenciais teóricos, permitindo identificar padrões, convergências e divergências entre a prática organizacional e as abordagens propostas na literatura.

Com vistas a assegurar a qualidade metodológica da pesquisa, foram adotados procedimentos de validação, incluindo: (i) triangulação de fontes de dados; (ii) encadeamento lógico das evidências; e (iii) análise comparativa entre os casos, conforme recomendações da literatura de estudos de caso (Miguel, 2012).

Neste estudo, a seleção de materiais é tratada como um constructo multidimensional, que envolve a integração de critérios técnicos, econômicos e ambientais, bem como processos decisórios organizacionais e contextuais.

Resultados e Discussão

Os dados foram coletados junto a quatro empresas pertencentes a diferentes segmentos da cadeia de embalagens alimentícias, incluindo indústria de alimentos, convertedor de embalagens plásticas, indústria de bebidas e empresa do setor de cafés. Os respondentes ocupam cargos estratégicos e operacionais, como diretoria, gerência de P&D, coordenação de operações e área de qualidade, com tempo de atuação variando entre 4 e 11 anos, o que reforça a confiabilidade das informações ao envolver profissionais diretamente inseridos nos processos decisórios**.** As empresas analisadas utilizam diferentes tipos de embalagens, incluindo estruturas flexíveis (como BOPP e *stand-up pouch*), embalagens rígidas (como PET e vidro) e soluções cartonadas, evidenciando que a escolha dos materiais está diretamente relacionada às características dos produtos, às exigências técnicas e às condições de armazenamento e distribuição.

Para contextualizar os casos analisados, a Tabela 1 apresenta a caracterização das empresas participantes da pesquisa, considerando segmento de atuação, perfil dos respondentes e tipos de embalagens utilizadas.

Caso	Segmento	Cargo do respondente	Tempo de atuação	Tipo de embalagens
Caso A	Indústria de alimentos	Coordenadora de Operações	11 anos	Flexíveis (BOPP), vidro, PET, papelão
Caso B	Convertedor de embalagens	Gerente de P&D	6 anos	Flow pack, pouch, filmes plásticos
Caso C	Indústria de bebidas	Diretor	5 anos	PET e lata
Caso D	Setor de cafés	Área de Qualidade	4 anos	Flexíveis, cápsulas, vidro, cartonadas

Tabela 01: Caracterização dos casos analisados.
Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

A análise dos casos evidencia que o processo de seleção de materiais é caracterizado por sua natureza multidisciplinar, envolvendo diferentes áreas organizacionais, como qualidade, produção, P&D, processos, compras, marketing e diretoria. Esse resultado é corroborado pelos dados empíricos, nos quais os entrevistados destacam que a decisão ocorre de forma integrada, envolvendo múltiplas áreas e etapas formais de validação, como testes, avaliação de risco e gestão de mudanças.

Independentemente do setor analisado, evidencia-se um padrão consistente na predominância de critérios técnico-funcionais e econômicos. Aspectos como segurança dos alimentos, propriedades de barreira, estabilidade do processo produtivo e preservação da qualidade do produto são determinantes nas decisões. Evidências empíricas mostram que propriedades como barreira a oxigênio, proteção de aroma e manutenção do *shelf life* são critérios centrais, sendo frequentemente priorizados em detrimento de alternativas com melhor desempenho ambiental.

Esse achado está alinhado com a literatura, que aponta que a seleção de materiais em embalagens alimentícias é fortemente orientada por requisitos técnicos e de desempenho (Zhang *et al.*, 2017; Casson *et al.*, 2022). No entanto, os resultados avançam ao demonstrar que, na prática organizacional, esses critérios não apenas influenciam, mas dominam o processo decisório, relegando a sustentabilidade a um papel secundário.

A partir dessa lógica, emergem trade-offs estruturais que evidenciam a complexidade da seleção de materiais. Observam-se conflitos recorrentes entre desempenho técnico e reciclabilidade, custo e sustentabilidade, bem como entre qualidade do produto e viabilidade operacional. Os dados empíricos reforçam essa dinâmica, indicando, por exemplo, que a substituição de materiais só ocorre após validação de *shelf life* e integridade do produto, e que materiais mais sustentáveis são frequentemente rejeitados por comprometerem qualidade sensorial ou desempenho técnico.

Esse resultado confirma e aprofunda discussões presentes na literatura, especialmente no que se refere ao *trade-off* entre proteção do alimento e impacto ambiental da embalagem (Casson *et al.*, 2022; Bauer *et al.*, 2021). Diferentemente de abordagens normativas, os achados evidenciam que tais *trade-offs* não são exceção, mas condição estrutural do processo decisório.

As barreiras identificadas reforçam essa dinâmica, sendo predominantemente associadas ao alto custo de materiais alternativos, à baixa disponibilidade no mercado, às exigências de volume mínimo de compra e à necessidade de compatibilidade com processos produtivos já estabelecidos. Adicionalmente, os entrevistados destacam fatores como dependência de fornecedores, limitações tecnológicas e exigências regulatórias como elementos críticos que restringem a adoção de soluções mais sustentáveis.

Esse conjunto de barreiras converge com a literatura, que aponta restrições estruturais, econômicas e tecnológicas como fatores limitantes à transição para embalagens mais sustentáveis (Afif; Rebolledo; Roy, 2022; Donkor *et al.*, 2023). Entretanto, os resultados empíricos evidenciam que essas barreiras atuam de forma simultânea e interdependente, intensificando a complexidade das decisões organizacionais.

No que se refere à sustentabilidade e à incorporação de princípios da economia circular, *evidencia-se* que as práticas adotadas são predominantemente pontuais e operacionais. Entre as principais iniciativas identificadas estão o uso de materiais recicláveis, a redução de gramatura, a utilização de resinas recicladas (PCR) e a adoção de mecanismos de compensação ambiental. No entanto, os dados indicam que essas práticas são frequentemente motivadas por pressões externas, como regulamentações e demandas de clientes, e não por uma estratégia organizacional plenamente integrada.

Esse resultado está em consonância com estudos recentes que indicam que a economia circular ainda é implementada de forma fragmentada nas organizações (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017; Zhu *et al.*, 2022). A contribuição deste estudo reside em evidenciar como essa fragmentação se manifesta concretamente nos processos decisórios.

Adicionalmente, verifica-se que a utilização de ferramentas estruturadas de apoio à decisão, como a Avaliação do Ciclo de Vida, é limitada ou inexistente. Os entrevistados indicam que as decisões são predominantemente baseadas em conhecimento empírico e experiência prática, sendo a ACV pouco utilizada e com baixa influência direta nas decisões.

Esse resultado reforça críticas presentes na literatura sobre a baixa aplicabilidade prática dessas ferramentas, em função de sua complexidade, demanda por dados e necessidade de conhecimento especializado (Pryshlakivsky; Searcy, 2021; Subal *et al.*, 2024). Assim, *evidencia-se* uma lacuna relevante entre o desenvolvimento teórico de ferramentas de avaliação ambiental e sua efetiva utilização no contexto organizacional.

De forma geral, os resultados indicam que a sustentabilidade nas empresas analisadas ainda se encontra em um estágio predominantemente operacional, caracterizado por ações pontuais e reativas. Os entrevistados indicam que a sustentabilidade ainda não é tratada como prioridade estratégica, mas sim como requisito condicionado a viabilidade técnica, econômica e regulatória.

Esse resultado converge diretamente com evidências recentes da literatura, que indicam que os processos decisórios em embalagens sustentáveis tendem a ser pouco estruturados e fortemente influenciados por critérios econômicos e pressões externas (Weinrich *et al.*, 2024). Nesse sentido, os achados reforçam a ideia de que o principal desafio não está na ausência de soluções técnicas, mas na forma como as decisões são estruturadas e conduzidas nas organizações. Para sintetizar os principais achados da análise multicasos, a Tabela 2 apresenta as categorias investigadas, as evidências empíricas e os padrões identificados entre as empresas analisadas.

Categoria	Empresa A	Empresa B	Empresa C	Empresa D	Padrão identificado
Critério predominante	Técnico	Custo	Custo	Técnico	Predominância técnico-econômica
Sustentabilidade	Condicionada	Externa	Compensação	Limitada	Aplicação não prioritária
Economia circular	Reciclável	PCR	Eureciclo	Reciclabilidade	Foco em soluções pontuais
ACV	Não usa	Não usa	Não usa	Baixa utilização	Ferramenta pouco aplicada
Barreiras	Custo/tecnologia	Custo	Custo	Custo/performance	Custo como principal barreira
Trade-offs	Barreira vs reciclabilidade	Custo vs sustentabilidade	Preço vs logística	Sensorial vs sustentabilidade	Trade-offs estruturais

Tabela 02: Síntese comparativa dos casos.
Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

Em seguida, a Tabela 3 estabelece uma comparação entre os resultados obtidos e os principais aspectos discutidos na literatura, permitindo evidenciar convergências e lacunas entre teoria e prática.

Aspecto	Literatura	Evidência empírica
Critério	Multicritério	Predomínio técnico-econômico
Sustentabilidade	Estratégica	Operacional
Economia circular	Sistêmica	Pontual
ACV	Relevante	Ausente ou pouco aplicada
Barreiras	Estruturais	Confirmadas

Tabela 03: Comparação literatura vs. multicasos.
Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo analisar como empresas de diferentes segmentos da cadeia de embalagens alimentícias realizam a seleção de materiais, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais, bem como a incorporação de princípios da economia circular em seus processos decisórios. A partir da abordagem qualitativa adotada, por meio de estudo de casos múltiplos, foi possível identificar padrões, convergências e limitações comuns entre os diferentes contextos organizacionais analisados. Destaca-se, contudo, que os resultados aqui apresentados devem ser compreendidos como parte de um estudo ainda em desenvolvimento, sujeito a aprofundamentos e refinamentos analíticos.

Os resultados evidenciam que o processo de seleção de materiais é caracterizado por sua natureza multidisciplinar e pela predominância de critérios técnico-funcionais e econômicos. Aspectos como segurança dos alimentos, propriedades de barreira, estabilidade do processo produtivo e custo são determinantes nas decisões, enquanto critérios ambientais são considerados de forma secundária e condicionada à viabilidade operacional. Esse padrão se mostrou consistente entre as diferentes empresas analisadas, independentemente do segmento de atuação, sugerindo a existência de uma lógica decisória relativamente homogênea no contexto investigado.

Adicionalmente, observou-se a presença recorrente de *trade-offs* estruturais, especialmente entre desempenho técnico, custo e sustentabilidade. Conflitos como reciclabilidade versus desempenho de barreira e sustentabilidade versus viabilidade econômica limitam a adoção de materiais alternativos, evidenciando a complexidade do processo decisório. Esses resultados reforçam que a incorporação da sustentabilidade não depende exclusivamente da intenção organizacional, mas está condicionada a restrições técnicas, econômicas e de cadeia de suprimentos, o que indica que avanços nessa agenda demandam mudanças que extrapolam o nível das decisões individuais das empresas.

No que se refere à economia circular, *evidencia-se* que sua aplicação ocorre de forma incipiente e predominantemente operacional, concentrando-se em práticas pontuais, como uso de materiais recicláveis, redução de gramatura e mecanismos de compensação ambiental. Apesar de indicarem avanços, essas iniciativas ainda não configuram uma abordagem sistêmica ou plenamente integrada aos processos decisórios estratégicos das organizações, o que evidencia um descompasso entre os princípios amplamente discutidos na literatura e sua efetiva implementação no contexto organizacional.

A análise também evidenciou que a utilização de ferramentas estruturadas, como a Avaliação do Ciclo de Vida, é limitada ou inexistente nas empresas analisadas, sendo substituída por avaliações qualitativas e critérios empíricos. Esse resultado confirma a lacuna apontada na literatura quanto à dificuldade de integração de ferramentas analíticas aos processos decisórios organizacionais, especialmente em contextos marcados por restrições de tempo, dados e capacitação técnica.

Como contribuição, o estudo amplia a compreensão sobre a seleção de materiais sustentáveis em embalagens alimentícias ao oferecer evidências empíricas a partir de múltiplos casos, permitindo identificar padrões organizacionais e limitações estruturais recorrentes. De forma modesta, os resultados contribuem para reduzir a lacuna entre abordagens

normativas e práticas empresariais, ao demonstrar que a sustentabilidade, embora reconhecida, ainda enfrenta desafios significativos para sua incorporação efetiva nas decisões organizacionais.

Como limitações, destaca-se o número reduzido de casos analisados, a utilização de um número restrito de informantes por organização e a concentração em determinados segmentos da cadeia de embalagens, o que restringe a generalização dos resultados. Adicionalmente, reconhece-se que a natureza qualitativa do estudo implica limitações inerentes à interpretação dos dados e à dependência das percepções dos respondentes.

Nesse sentido, sugere-se que pesquisas futuras ampliem a diversidade de setores e incluam diferentes elos da cadeia de suprimentos, como fornecedores de matéria-prima e recicladores, de modo a aprofundar a compreensão sobre os desafios e oportunidades da economia circular no contexto das embalagens alimentícias. Além disso, recomenda-se investigar mecanismos que favoreçam a integração de ferramentas analíticas, como a Avaliação do Ciclo de Vida, aos processos decisórios, bem como o papel de fatores institucionais e regulatórios na promoção de soluções mais sustentáveis. Como desdobramento, estudos futuros podem também explorar, de forma longitudinal, a evolução das práticas organizacionais, bem como analisar como diferentes estratégias empresariais influenciam a priorização de critérios na seleção de materiais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista (UNESP) pelo suporte acadêmico e institucional.

Referências Bibliográficas

AFIF, Karima; REBOLLEDO, Claudia; ROY, Jacques. Drivers, barriers and performance outcomes of sustainable packaging: a systematic literature review. **British Food Journal**, v. 124, n. 3, p. 915–935, 2022.

BARONE, Andreza Salles *et al.* Rethinking single-use plastics: innovations, policies, consumer awareness and market shaping biodegradable solutions in the packaging industry. **Trends in Food Science & Technology**, v. 158, p. 104906, 2025.

BAUER, Anna-Sophia *et al.* Recyclability and redesign challenges in multilayer flexible food packaging: a review. **Foods**, v. 10, n. 11, p. 2702, 2021.

CASSON, Andrea *et al.* Beyond the eco-design of case-ready beef packaging: the relationship between food waste and shelf-life as a key element in life cycle assessment. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 34, p. 100943, 2022.

DONKOR, Leticia *et al.* Bio-based and sustainable food packaging systems: relevance, challenges, and prospects. **Applied Food Research**, v. 3, n. 2, p. 100356, 2023.

FARRUKH, Amna; SAJJAD, Aymen. Investigating sustainability tensions and resolution strategies in the plastic food packaging industry: a paradox theory approach. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 4, p. 2868–2889, 2024.

GEISSDOERFER, Martin *et al.* The circular economy: a new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 2017.

HAUSCHILD, Michael Zwicky; JESWIET, Jack; ALTING, Leo. Design for environment: do we get the focus right? **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 53, n. 1, p. 1–4, 2004.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, 2017.

MAHAJAN, Aditi; SINGH, Inderdeep; ARORA, Navneet. An integrated multi-criteria decision-making framework for the selection of sustainable biodegradable polymer for food packaging applications. **Environment, Development and Sustainability**, v. 26, n. 4, p. 8399–8420, 2024.

MAIONE, Carol; LAPKO, Yulia; TRUCCO, Paolo. Towards a circular economy for the plastic packaging sector: insights from the Italian case. **Sustainable Production and Consumption**, v. 34, p. 78–89, 2022.

MATTHEWS, Chris; MORAN, Fintan; JAISWAL, Amit K. A review on European Union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 125263, 2021.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick (coord.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

MUDGAL, Devanshu; PAGONE, Emanuele; SALONITIS, Konstantinos. Selecting sustainable packaging materials and strategies: a holistic approach considering whole life cycle and customer preferences. **Journal of Cleaner Production**, v. 481, p. 144133, 2024.

NCUBE, Lindani Koketso *et al.* An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 12, 2021.

NIERO, Monia; RIVERA, Ximena C. Schmidt. The role of life cycle sustainability assessment in the implementation of circular economy principles in organizations. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 793–798, 2018.

PIGOSSO, Daniela C. A.; ROZENFELD, Henrique; MCALOONE, Tim C. Ecodesign maturity model: a management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 160–173, 2013.

POLLINI, Barbara; ROGNOLI, Valentina. Early-stage material selection based on life cycle approach: tools, obstacles and opportunities for design. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 1130–1139, 2021.

PRYSHLAKIVSKY, Jonathan; SEARCY, Cory. Life cycle assessment as a decision-making tool: practitioner and managerial considerations. **Journal of Cleaner Production**, v. 309, p. 127344, 2021.
SIMOENS, Machteld Catharina. Unpacking pathways to a circular economy: a study of packaging innovations in Germany. **Sustainable Production and Consumption**, v. 47, p. 267–277, 2024.

SUBAL, Luc; BRAUNSCHWEIG, Arthur; HELLWEG, Stefanie. The relevance of life cycle assessment to decision-making in companies and public authorities. **Journal of Cleaner Production**, v. 435, p. 140520, 2024.

WEINRICH, Ramona *et al.* Decision-making processes on sustainable packaging options in the European food sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 139918, 2024.

YIN, Robert K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZHANG, Honghao *et al.* Green material selection for sustainability: a hybrid MCDM approach. **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, p. e0177578, 2017.

ZHU, Zicheng *et al.* Packaging design for the circular economy: a systematic review. **Sustainable Production and Consumption**, v. 32, p. 817–832, 2022.

ECONOMIA CIRCULAR NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: VIABILIDADE DO EMPREGO DE BORRACHA DE PNEUS TRATADA

1 Arthur Nóbrega de Sousa ; 2 Ana Maria; Lidia Pereira Amaro; 3 Diego José Araújo Viégas; 4 Lídia Pereira Amaro; 5 Thamires Dantas Guerra; 6 Hillary de Oliveira Marinho; 7 Chrysttyan Thalles Ribeiro Félix; 8 Vanessa Silva Oliveira

1 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: arthurnobrega16@gmail.com; 2 Universidade Federal de Campina grande, e-mail: ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br; 3 Universidade de Pernambuco -UPE, e-mail: diegoaraujoviegas@hotmail.com; 4 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: lidia.pereira@estudante.ufcg.edu.br;5 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:thamires_guerra@gmail.com; 6 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:hillary.mariho@estudante.ufcg.edu.br; 7 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: chrysttyan@gmail.com; 8 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: vanessa.silva@estudante.ufcg.edu.br

Palavras-chave: reologia de ligantes; modificação por polímeros; asfalto-borracha.

Resumo

O reaproveitamento de pneus inservíveis na pavimentação asfáltica tem se destacado como uma alternativa sustentável, alinhada aos princípios da economia circular. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso de borracha de pneus tratada como modificador de ligantes asfálticos, com foco na análise das propriedades reológicas, especialmente a viscosidade rotacional e o Performance Grade (PG). Para isso, utilizou-se um ligante CAP 50/70 modificado com 10% de borracha, incorporada por meio do processo via úmida, sob temperatura de aproximadamente 165 °C e adição fracionada. A caracterização dos materiais incluiu ensaios de microscopia óptica, FTIR e TG/DTA para a borracha, além de ensaios físicos e reológicos para o ligante. Os resultados indicaram aumento significativo da viscosidade rotacional do ligante modificado, evidenciando maior resistência ao escoamento e maior estabilidade em altas temperaturas. Os ensaios físicos corroboraram esses resultados, com redução da penetração, aumento do ponto de amolecimento e ganho de recuperação elástica no ligante modificado. Dessa forma, conclui-se que a incorporação de borracha de pneus tratada promove melhorias significativas no desempenho reológico do ligante, além de contribuir para a valorização de resíduos sólidos, configurando-se como uma alternativa técnica e ambientalmente viável para a pavimentação asfáltica.

Introdução

A incorporação de princípios da economia circular na engenharia de pavimentos tem se consolidado como estratégia fundamental para mitigar impactos ambientais associados à disposição inadequada de resíduos sólidos. Dentre esses resíduos, os pneus inservíveis representam um dos principais desafios ambientais, em função de sua elevada durabilidade e resistência à degradação, podendo persistir no meio ambiente por longos períodos e gerar impactos ao solo, à água e à saúde pública (DWIVEDI et al., 2020; COFONE et al., 2025). No Brasil, instrumentos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305/2010) e a Resolução CONAMA nº 416/2009 estabelecem diretrizes para a logística reversa e incentivam a reinserção desses materiais em cadeias produtivas (BRASIL, 2009; BRASIL, 2010). Nesse contexto, destaca-se que "o descarte inadequado de pneus constitui um passivo ambiental e sanitário relevante" (SOUSA, 2026, p. 16).

A utilização da borracha de pneus como modificador de ligantes asfálticos insere-se nesse cenário como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica, e sua incorporação ao cimento asfáltico de petróleo (CAP), especialmente por meio do processo via úmida, promove modificações físico-químicas relevantes, associadas à absorção de frações leves do ligante e ao inchamento das partículas elastoméricas, resultando em alterações significativas no comportamento reológico do material (FAXINA, 2002; WANG et al., 2017). Conforme destacado por Sousa (2026), "a incorporação de borracha moída de pneus a materiais asfálticos [...] tem sido associada a ganhos reológicos e mecânicos, incluindo aumento de elasticidade e redução de suscetibilidade térmica" (SOUSA, 2026, p. 21).

Diversos estudos (Palati, 2008; Oda, 2001; Sousa, 2026) indicam que a modificação do ligante com borracha proporciona aumento da viscosidade e da resposta elástica do material, refletindo diretamente em seu desempenho em campo. De acordo com Pilati (2008), observa-se aumento do módulo complexo (G*) e redução do ângulo de fase (δ), indicando comportamento mais resistente à deformação permanente. Nesse mesmo sentido, Oda (2001) destaca que "a modificação do ligante asfáltico com borracha moída resulta em alterações reológicas expressivas, refletidas no aumento da viscosidade e da capacidade elástica do material". Complementarmente, Sousa (2026) verificou que a modificação do CAP 50/70 com borracha resultou em "boa recuperação elástica e menor suscetibilidade à deformação permanente", reforçando o potencial dessa tecnologia para aplicações em regiões de clima quente.

A resposta reológica do ligante é determinante para o desempenho das misturas asfálticas, uma vez que o comportamento viscoelástico controla a forma como o material responde às solicitações de tráfego e às variações térmicas. Nesse sentido, ressalta-se que "o desempenho de misturas asfálticas é governado pela resposta viscoelástica e viscoplástica do sistema ligante–agregado sob carregamento repetido e variação térmica" (SOUSA, 2026, p. 9). Assim, a modificação do ligante com borracha pode contribuir para a melhoria da resistência à deformação permanente e à fadiga, aspectos críticos para a durabilidade dos pavimentos (BERNUCCI et al., 2022).

Sob a perspectiva ambiental, a aplicação da borracha de pneus em ligantes asfálticos contribui diretamente para a valorização de resíduos e redução de impactos ambientais. Programas de logística reversa coordenados por entidades como a ANIP têm ampliado a coleta e destinação adequada de pneus no Brasil, sendo a pavimentação uma das principais rotas de reaproveitamento (ANIP, 2024). Dessa forma, o uso de asfalto-borracha se alinha aos princípios da economia circular ao transformar um resíduo de difícil disposição em insumo de alto valor agregado.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade do emprego de borracha de pneus tratada como modificador de ligantes asfálticos, sob a ótica da economia circular, com foco na análise de propriedades reológicas. A pesquisa concentra-se no teor de 10% de borracha em massa do ligante, investigando seus efeitos por meio dos ensaios de viscosidade rotacional e Performance Grade. Assim, busca-se contribuir para o avanço do conhecimento técnico e científico, conciliando desempenho mecânico e sustentabilidade na pavimentação asfáltica.

Materiais e Métodos

Foram utilizados como materiais o ligante asfáltico CAP 50/70, fornecido pela CBAA Asfaltos LTDA., e a borracha de pneus tratada (Figura 01), proveniente de uma empresa de reciclagem localizada no estado de São Paulo. A borracha foi previamente submetida a processo de separação magnética para remoção de partículas metálicas e apresenta granulometria passante na peneira nº 40 (0,42 mm), condição adequada para aplicação em ligantes modificados (SOUSA, 2026).



Figura 01: Borracha triturada de pneus inservíveis
Fonte: Autor (2026)

A caracterização da borracha foi realizada por meio de microscopia óptica (MO), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análises termogravimétrica e termodiferencial (TG/DTA), permitindo avaliar sua morfologia, composição química e estabilidade térmica. A caracterização do ligante base foi realizada por meio de ensaios físicos e reológico, sendo, para o escopo deste trabalho, considerado o ensaio de viscosidade rotacional, conforme ASTM D4402/D4402M (SOUSA, 2026) .

A modificação do ligante foi realizada pelo processo via úmida, com incorporação de 10% de borracha em massa do CAP, sob temperatura de aproximadamente 165 °C e agitação mecânica contínua. A adição da borracha foi realizada de forma fracionada, em três etapas iguais, com intervalos de aproximadamente 10 minutos entre cada adição, seguida de mais 30 minutos de agitação contínua, visando à melhor homogeneização do sistema e ao desenvolvimento do processo de inchamento das partículas de borracha (SOUSA, 2026; FAXINA, 2002).

Resultados e Discussões

A caracterização da borracha de pneus tratada evidenciou propriedades compatíveis com sua aplicação como modificador de ligantes asfálticos. A análise por espectroscopia no infravermelho (FTIR), apresentado na Figura 02, indicou a presença de grupos funcionais típicos da estrutura elastomérica, como ligações C–H, C=O e C–O, associados à borracha natural e sintética, além de compostos oxigenados oriundos de aditivos e processos de envelhecimento. Resultados semelhantes foram reportados por Ahmed e Faizan (2024), que observaram bandas características relacionadas a cadeias hidrocarbônicas e grupos funcionais capazes de favorecer a interação com o ligante asfáltico.

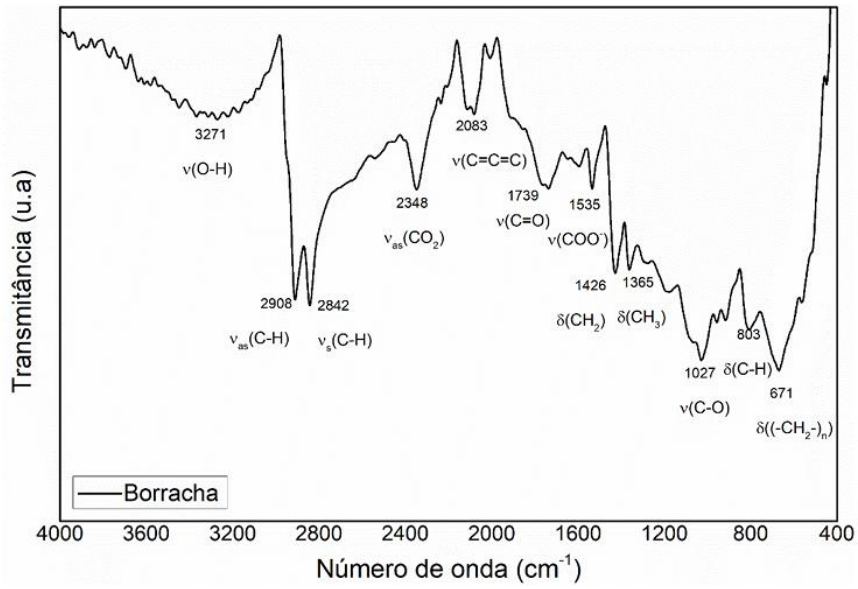


Figura 02: Espectro de FTIR da borracha de pneu
Fonte: Autor (2026)

A análise termogravimétrica (TG/DTA) apresentada na Figura 03 demonstrou elevada estabilidade térmica da borracha até aproximadamente 250–300 °C, com a principal etapa de degradação ocorrendo entre 350 °C e 500 °C. Esse comportamento indica que o material apresenta estabilidade suficiente para suportar as temperaturas típicas de produção de ligantes modificados e misturas asfálticas, corroborando estudos que apontam comportamento térmico semelhante para resíduos de pneus reciclados (AHMED; FAIZAN, 2024; MA et al., 2025).

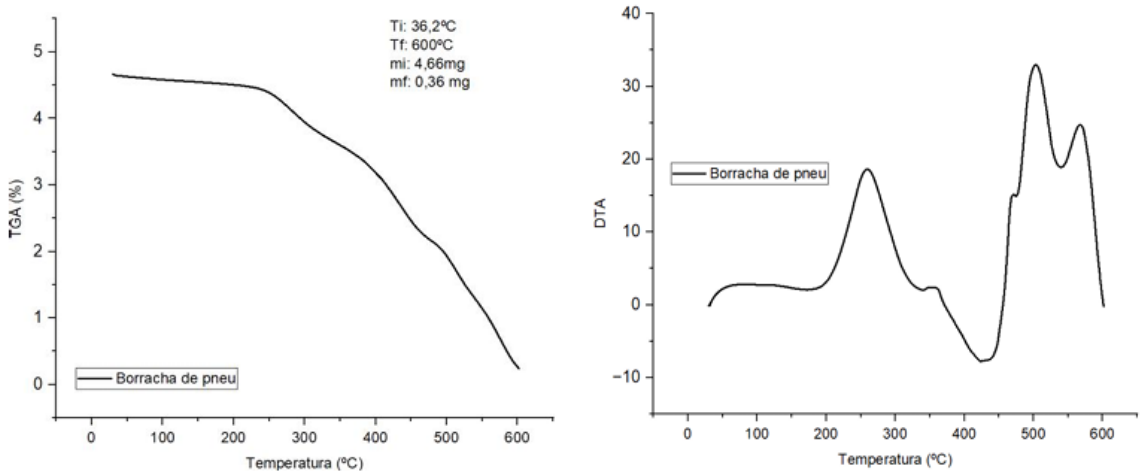


Figura 03: Termograma da borracha de pneu
Fonte: Autor (2026)

A análise termogravimétrica indicou uma perda de massa de 92,3%, com massa inicial de 4,66 mg e resíduo final de 0,36 mg. Esse comportamento evidencia a permanência de uma fração residual, predominantemente composta por negro de fumo, cargas minerais e outros constituintes inorgânicos presentes na composição do pneu. Tal resíduo é característico de materiais elastoméricos vulcanizados e reflete a complexidade composicional da borracha reciclada.

A curva de DTA complementa essa interpretação ao evidenciar os eventos térmicos associados ao aquecimento da amostra. Observam-se picos endotérmicos e exotérmicos ao longo da faixa de temperatura analisada, indicando a ocorrência de transições térmicas e processos de decomposição química. O evento observado entre 200 °C e 300 °C está associado à volatilização de compostos leves e ao início da degradação de aditivos, enquanto os picos mais intensos entre 450 °C e 600 °C correspondem à degradação das estruturas poliméricas mais estáveis, bem como à oxidação residual do material.

A análise por microscopia óptica (Figura 04) evidenciou que a borracha de pneus tratada apresenta partículas com morfologia irregular, predominantemente angulosa, com superfície rugosa e heterogênea, características típicas de materiais obtidos por processos de trituração mecânica. Observa-se a presença de diferentes tonalidades e fases, associadas à composição complexa do material, que inclui borracha natural e sintética, negro de fumo e cargas minerais. Essa heterogeneidade estrutural favorece o aumento da área específica das partículas e contribui para uma maior interação com o ligante asfáltico.

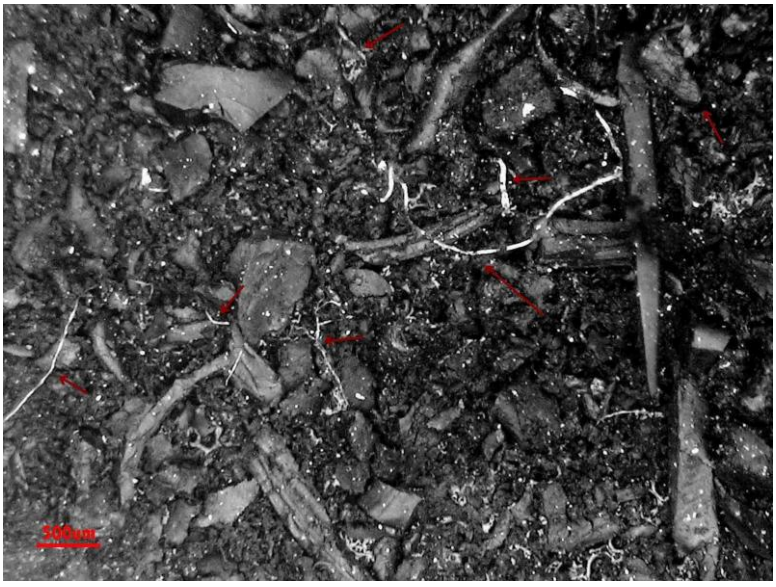


Figura 04: Microscopia óptica da borracha de pneu
Fonte: Autor (2026)

De forma geral, os resultados obtidos por microscopia óptica indicam que a borracha tratada apresenta características adequadas para aplicação como modificador de ligantes asfálticos, uma vez que sua morfologia favorece os mecanismos de interação responsáveis pela melhoria do desempenho do material, sem interferência significativa de contaminantes metálicos residuais.

A caracterização do ligante CAP 50/70 (Tabela 01) indicou comportamento compatível com as especificações normativas e adequado para uso em pavimentação. O valor de penetração de 65,8 dmm encontra-se dentro da faixa especificada (50–70 dmm), evidenciando consistência intermediária do ligante. O ponto de amolecimento de 48 °C, superior ao mínimo exigido, indica boa resistência à deformação em temperaturas elevadas. Em relação à viscosidade rotacional, os valores obtidos a 135 °C (458,67 cP), 150 °C (227,79 cP) e 177 °C (83,09 cP) atendem aos limites especificados, demonstrando adequada trabalhabilidade e comportamento térmico coerente com ligantes convencionais. A caracterização reológica do ligante CAP 50/70 indicou temperatura crítica superior de Performance Grade (PG) igual a 67,2 °C.

CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES				
Ensaios	**Resultados**		**Especificações (DNIT 111/2009)**	
	AV (50/70)	**AB 10**	**AB8**	**AB22**
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	65,8	30	30-70	30-70
Ponto de amolecimento, °C	48	56	55	57
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	458,67	1642,3	-	-
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, cP	227,79	744,9	-	-
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	83,09	229,3	-	-
Recuperação elástica (25°C, 20 cm), %	-	55	50	55

Tabela 01: Caracterização do ligante virgem (AV) e do ligante modificado (AB 10)
Fonte: Autor (2026)

Com relação ao ligante AB 10, os ensaios físicos evidenciam mudanças significativas no comportamento do ligante modificado. A penetração apresentou redução expressiva de 65,8 dmm no ligante virgem (AV) para 30 dmm no ligante modificado (AB10), indicando aumento da consistência e maior rigidez do material. Esse comportamento é típico de ligantes modificados com borracha, sendo associado à absorção de frações leves do CAP e ao desenvolvimento de uma estrutura mais resistente à deformação (FAXINA, 2002).

O ponto de amolecimento também apresentou aumento significativo, passando de 48 °C para 56 °C, evidenciando maior resistência ao fluxo em temperaturas elevadas. Esse resultado reforça a melhoria do desempenho térmico do ligante modificado, tornando-o menos suscetível à deformação permanente em condições de serviço (WANG et al., 2017).

Outro parâmetro relevante é a recuperação elástica, inexistente no ligante virgem e igual a 55% no ligante AB10, indicando a introdução de comportamento elastomérico ao material. Esse ganho de elasticidade está diretamente relacionado à presença da borracha, que confere ao ligante, maior capacidade de recuperação após a aplicação de cargas, contribuindo para a resistência à fadiga e à deformação permanente (ZHAO et al., 2023).

Embora o aumento da viscosidade implique em maior demanda energética durante a usinagem, esse comportamento é desejável do ponto de vista de desempenho, uma vez que está relacionado à maior estabilidade do ligante em altas temperaturas e à redução da suscetibilidade à deformação permanente. Esse efeito é particularmente relevante em regiões de clima quente, onde o desempenho do pavimento está fortemente condicionado à capacidade do ligante em resistir ao acúmulo de deformações sob carregamento repetido (NUNES, 2017).

De forma geral, os resultados dos ensaios físicos evidenciam que a modificação com 10% de borracha promove aumento da rigidez do ligante, redução da penetração, elevação do ponto de amolecimento e introdução de recuperação elástica, quando comparado ao material convencional. Essas alterações indicam maior consistência, melhor resistência ao fluxo em temperaturas elevadas e capacidade de recuperação após deformações. Dessa forma, o uso do ligante modificado com 10% de borracha demonstra elevado potencial para aplicação em pavimentação, especialmente em condições de tráfego intenso e altas temperaturas, além de contribuir para a valorização de resíduos sólidos no contexto da economia circular.

Considerações Finais

Os resultados obtidos evidenciaram que a incorporação de 10% de borracha de pneus tratada ao ligante CAP 50/70 promoveu alterações significativas em seu comportamento reológico, com destaque para o aumento da viscosidade rotacional. O incremento expressivo da viscosidade indica maior resistência ao escoamento e maior consistência do ligante, refletindo diretamente na melhoria da estabilidade em altas temperaturas. Esse comportamento está associado ao processo de interação entre o ligante e a borracha, caracterizado pela absorção de frações leves e pelo inchamento das partículas elastoméricas.Os resultados dos ensaios físicos complementam essa análise, indicando aumento da rigidez e introdução de comportamento elastomérico no ligante modificado. No entanto, é na análise da viscosidade que se observa de forma mais evidente o ganho de desempenho proporcionado pela incorporação da borracha.

Sob a perspectiva ambiental, a utilização da borracha de pneus tratada como modificador de ligantes asfálticos se mostra uma alternativa tecnicamente eficiente e alinhada aos princípios da economia circular, promovendo simultaneamente melhoria no desempenho do material e valorização de resíduos sólidos. Dessa forma, conclui-se que o ligante modificado com 10% de borracha apresenta elevado potencial para aplicação em pavimentação asfáltica, especialmente em condições de altas temperaturas, sendo a viscosidade rotacional e o Performance Grade parâmetros fundamentais para evidenciar os ganhos obtidos com a modificação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), por meio do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa. Agradecem também às instituições e empresas fornecedoras dos materiais utilizados, em especial à CBAA Asfaltos LTDA. e à empresa responsável pelo fornecimento da borracha de pneus tratada, pela colaboração no desenvolvimento do estudo. Os autores reconhecem, ainda, o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo incentivo ao desenvolvimento científico e à formação de recursos humanos.

Referências Bibliográficas

AHMED, K. Z.; FAIZAN, M. **Comprehensive characterization of waste tire rubber powder**. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, v. 105, n. 1, p. 11-20, 2024. DOI: 10.1007/s40034-023-00282-8.

BERNUCCI, L. B. et al. ***Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*.** 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis**. Diário Oficial da União, Brasília, 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, Brasília, 2010.

DWIVEDI, C.; MANJARE, S.; RAJAN, S. K. **Recycling of waste tire by pyrolysis to recover carbon black: alternative and environment-friendly reinforcing filler for natural rubber compounds**. *Composites Part B: Engineering*, v. 200, p. 108346, 2020. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108346.

FAXINA, A. L. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos modificados com borracha moída de pneus**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MA, Y. et al. **Influence of rubber cross-linking degree on compatibility and performance of modified asphalt: rheological characterization and molecular simulation**. *Case Studies in Construction Materials*, p. e05487, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05487.

NUNES, J. A. **Avaliação do comportamento reológico de ligantes asfálticos modificados com borracha**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

ODA, S; FERNANDES J. J. L. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação.** Acta Scientiarum (Maringá), Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v23i0.2804.

PILATI, F. **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas.** pág.210. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: (PDF/BDTD-USP). https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-14062008-202738/publico/PILATI2008.pdf.

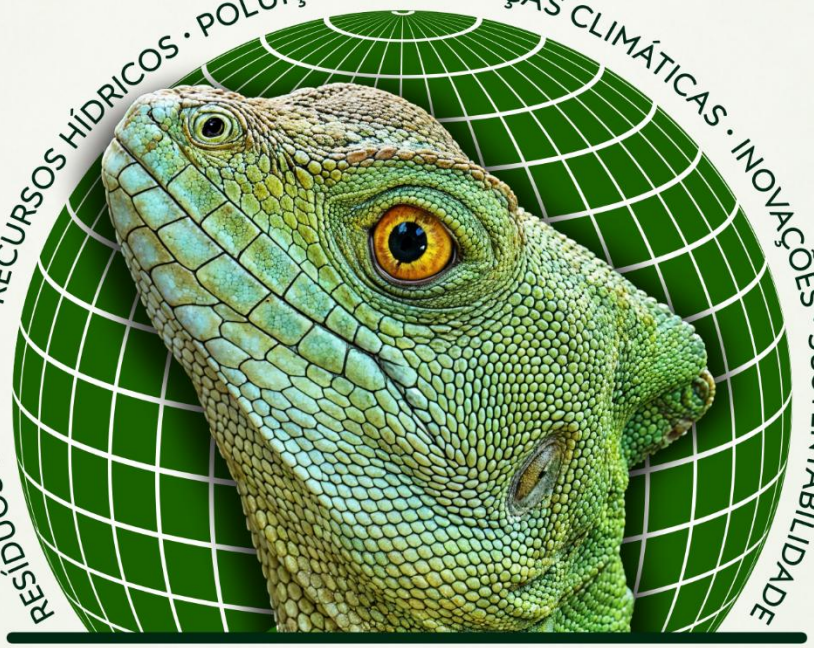
SOUSA, Arthur Nóbrega de. ***Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas e descontínuas produzidas com asfalto-borracha***. 2026. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2026.

WANG, S., CHENG, D., & XIAO, F. **Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt**. Construction and Building Materials, v. 131, p. 101-113, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.077.

ZHAO, Z., WU, S., XIE, J., YANG, C., YANG, X., CHEN, S., & LIU, Q. **Recycle of waste tire rubber powder in a novel asphalt rubber pellets for asphalt performance enhancement**. Construction and Building Materials, v. 399, p. 132572, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132572.

ÁREA TEMÁTICA 7

EDUCAÇÃO AMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE
ENGENHARIA AMBIENTAL

IMPLANTAÇÃO DE UM VIVEIRO FLORESTAL EXPERIMENTAL E ANÁLISE DA ESPÉCIE AZEITONA ROXA (*Syzygium cumini*) NA CIDADE DE MANAUS/AM

1 André Vilhena de Oliveira, 2 Nidianne Nascimento Vilhena, 3 Bruno Cardoso Braga de Almeida, 4 Marina Leal Cavalcante.

1 Instituto Federal do Amazonas - IFAM, Prof. Dr. Pós-Doc. e-mail: andre.vilhena@ifam.edu.br; 2 Instituto Federal do Amazonas - IFAM, Profa. Dra. Pós-Doc. e-mail: nidianne.nascimento@ifam.edu.br; 3 Instituto Federal do Amazonas – IFAM – Aluno do Curso Técnico em Meio Ambiente. 4 Instituto Federal do Amazonas – IFAM – Aluna do Curso Técnico em Meio Ambiente.

Palavras-chave: Syzygium cumini; Banco de Germoplasma; Viveiro Florestal.

Resumo

A semente é o fator principal no processo de produção de mudas, já que representa um pequeno custo no valor final da muda e tem uma importância fundamental no valor das plantações (MACEDO, 1993, p. 06). Assim, tem-se como objetivo principal desta pesquisa, a implantação de um viveiro florestal experimental a partir do plantio de mudas da espécie azeitona roxa em uma localidade da cidade de Manaus-AM. A azeitona (*Syzygium cumini*) é um fruto pertencente à família *Myrtaceae* no qual é uma árvore de grande porte, seus frutos são carnosos do tipo baga, elípticos. Quanto aos métodos utilizados, teve-se como proposta metodológica uma abordagem qualitativa e quantitativa, com a utilização de pesquisas bibliográficas sobre o fruto utilizado no experimento, com suas características físicas, químicas e biológicas, além da aplicação da biometria de sementes, quanto à pesagem e análise do teor de umidade e taxa de germinação, com dados quantitativos expressivos das sementes analisadas. O trabalho de seleção, coleta e análise das matrizes, ocorreu nos municípios de Manaus e Careiro da Várzea, sendo coletados trinta (30) frutos de cinco (5) matrizes diferentes, totalizando 150 frutos de azeitona roxa. Os resultados promissores observados desde a seleção, coleta, pesagem, biometria, análise, semeadura, germinação e posterior transplantio das mudas de Syzygium cumini indicaram uma seleção de matrizes aptas a fornecer sementes saudáveis que produziram mudas de altíssimo vigor e qualidade.

Introdução

Muito se tem discutido sobre desmatamento e suas consequências que afetam tanto o meio ambiental quanto a sociedade, no qual tem como um dos problemas, o aumento de áreas degradadas onde há uma considerável retirada total ou parcial da cobertura florestal. Devido a essas diversas problemáticas, que muitos órgãos e instituições de pesquisa criaram métodos para recuperação e regeneração de áreas que sofreram impactos ambientais. Dentre um dos métodos utilizados, podemos destacar a técnica do plantio de espécies frutíferas em viveiros florestais experimentais, através da seleção de matrizes e preservação de sementes em bancos de germoplasma vegetal (câmara seca). Almeida (2016, p. 118) ressalta que este é um modelo interessante por proporcionar alimento e atração da fauna silvestre. Além disso, o plantio de árvores frutíferas traz inúmeros benefícios se plantada em uma área urbana como sombra fresca, fornecimento de frutas, purificação do ar, equilíbrio da fauna e um ambiente mais paisagístico (VPA, 2020). Para se ter uma boa qualidade na produção de mudas frutíferas, é necessário uma estrutura e organização para produzir plantas adequadas, principalmente no processo germinativo onde deve-se ter uma atenção especial na escolha de sementes. Quanto às técnicas utilizadas para a produção de mudas, utilizou-se a implantação de viveiros florestais experimentais, sobre sua definição, é conceituada como: "Locais nos quais são produzidas mudas de plantas, e que reúnem todas as condições necessárias para o desenvolvimento delas. As plantas que ali estão em fase inicial de desenvolvimento, geralmente são de espécies nativas da região onde se encontra instalado o viveiro, e o destino destas plantas em grande parte são para o reflorestamento – para recomposição da mata ciliar, de áreas degradadas, proteção de mananciais, entre outro" (CULTURA MIX, 2015). A semente é o fator principal no processo de produção de mudas, já que representa um pequeno custo no valor final da muda e tem uma importância fundamental no valor das plantações (MACEDO, 1993, p. 06). Por isso, o processo produtivo de sementes e mudas devem seguir parâmetros metodológicos quanto ao seu material genético, o seu manuseio, o plantio etc. Tendo em vista a importância do plantio de mudas, principalmente de espécies frutíferas, em que contribuem para a regeneração de áreas degradadas, o tema proposto pauta-se na implantação de um viveiro florestal experimental, o qual contribuirá para a busca pela preservação da natureza e interesse pela educação ambiental, além da promoção de conhecimentos acerca do meio ambiente.

Objetivos da Pesquisa

Objetivo Geral: Contribuir para o conhecimento científico através da implantação de um viveiro florestal experimental a partir do plantio de mudas da espécie azeitona roxa (*Syzygium cumini*) na cidade de Manaus-AM.

Objetivos Específicos: ● Implantar um viveiro florestal experimental da espécie da Azeitona Roxa (*Syzygium cumini*) em uma localidade da cidade de Manaus; ● Construir um banco de germoplasma vegetal (câmara seca) da Azeitona Roxa (*Syzygium cumini*); ● Efetuar análise morfológica e biométrica das sementes de azeitona roxa realizando diagnósticos de taxa de umidade e germinação de sementes; ● Produzir mudas de azeitona para recuperação de áreas degradadas e práxis de Educação ambiental.

Fundamentação Teórica

Para compreendermos sobre o plantio de mudas bem como sua análise a partir das sementes de árvores frutíferas, é necessário compreender a sua importância e as legislações que regem este tema, entre outros fatores. Sabemos que o meio ambiente, nos primórdios da humanidade, era composto por florestas, campos e cursos d'água antes da existência dos centros urbanos, mas devido à crescente urbanização, ocorreram diversas alterações nos ecossistemas naturais (CECCHETTO *et al*, 2014, p.02). Como Lima *et al* (2018) explica que um desequilíbrio vem sendo causado pelo crescimento desordenado das cidades, onde as árvores e qualquer tipo de vegetação são trocados por vias, ruas, construções, nos quais trazem para o planeta poluição sonora e visual. Mas como Cunha (2019) ressalta, que a arborização urbana representa um elemento necessário para um desenho adequado às exigências de conforto. E como está crescendo a preocupação da população para as questões ambientais, cresceu a procura de métodos para reflorestamento em áreas urbanizadas, como o plantio de mudas e criação de viveiros florestais com o uso de sementes. O plantio de árvores é necessário, pois os arbustos conseguem armazenar boa parte da demanda pluvial. Além disso, as árvores servem para sugar esta quantidade de água e abastecer os lençóis freáticos – camada subterrânea abaixo do solo (RCAMARGO, 2020). E para a utilização de sementes, existe uma legislação que regulamenta o seu uso. A lei nº 10.711 criada no ano de 2003, dispõe sobre o Sistema Nacional de Sementes e Mudas, que objetiva garantir a identidade e a qualidade do material de multiplicação e de reprodução vegetal produzido, comercializado e utilizado em todo o território nacional. Então, todo o manuseio bem como a escolha das sementes e das mudas devem seguir os critérios previstos pela legislação. As leis que tratam sobre o uso de sementes não apenas produzem seus efeitos sobre os sistemas agrícolas, como também têm interfaces com as políticas de desenvolvimento rural sustentável, segurança alimentar e nutricional, inclusão social, agrobiodiversidade e sobrevivência cultural dos povos indígenas e tradicionais. Conforme Pereira Neto (2004, p.12), os bancos de germoplasma são os principais locais para disponibilizar os recursos genéticos necessários para a obtenção de novos cultivares e/ou a melhoria das existentes. Conforme a Embrapa (2013), as principais atividades de um Banco de Germoplasma são coleta, preservação, caracterização, documentação, avaliação e intercâmbio. As sementes armazenadas são chamadas de sementes crioulas, que têm como características viabilidade de multiplicação e possibilidade de serem selecionadas por não apresentarem modificações. A azeitona (*Syzygium cumini*) é um fruto pertencente à família *Myrtaceae* e é originária da Índia sendo naturalizada no Brasil. Também é conhecida por outras denominações como jambolão, murta, jambu, jamelão, ameixa-roxa, entre outros. A árvore é de grande porte, sendo adaptável aos diferentes tipos de solo e condições climáticas do Brasil. De acordo com Vizzoto e Fetter (2009, p. 1), à frutificação ocorre de janeiro à maio e os frutos são do tipo baga de coloração preta, conforme mostra a figura 01:



Figura 01: Árvore de Azeitona Roxa (*Syzygium cumini*).
Fonte: Próprio Autor (2025).

Os frutos possuem pericarpo de coloração escura intensa medindo cerca de 3 à 4 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro, são carnosas do tipo baga, elípticos, com apenas uma semente de aspecto oval e coloração marrom escura (SILVA, 2014, p. 10). Vale ressaltar que calçamentos e passeios costumam ficar recobertos de coloração azul à roxa, devido aos frutos que caem no chão. Quanto à árvore, Almeida e Santos (2019, p. 02) explicam que ela mede cerca de 10 m de altura e 3 à 4,5 de diâmetro de projeção de copa, possuindo tronco lenhoso e cilíndrico, além de folhagem abundante. As sementes são de formato irregular, duras e resistentes em volta de uma polpa, como mostra a figura 02:



Figura 02: Fruto e semente de Azeitona Roxa (*Syzygium cumini*).
Fonte: Próprio Autor (2025).

Sobre suas propriedades e indicações, a azeitona roxa é muito utilizada para finalidades medicinais devido à sua alta atividade antioxidante, onde sua casca e caule são utilizadas para controle de diabetes, minimizando as ações de insulina e regulando níveis glicêmicos. No seu fruto são encontradas algumas substâncias químicas denominadas fitoquímicos ou compostos secundários, no qual são produzidas naturalmente pelas plantas para se proteger do ataque de pragas e doenças (VIZZOTO e FETTER, 2009, p.1).

Material e Métodos

Para a construção do viveiro florestal experimental a partir do fruto da azeitona roxa, teve-se como proposta metodológica uma abordagem qualitativa e quantitativa, como a utilização de pesquisas bibliográficas sobre o fruto utilizado no experimento **e** suas características físicas, químicas e biológicas, além de cálculos quanto à pesagem e análise do quantitativo de sementes. Teve-se também o trabalho de campo quanto à escolha das matrizes. Todo processo para a implantação do viveiro foi realizado por etapas, respeitando os procedimentos indicados na literatura quanto ao manuseio das sementes.

Primeira etapa: coleta dos frutos.

Para coleta de frutos da azeitona, teve-se como base o tempo de floração e frutificação. Tendo assim, o início da coleta a partir do mês de dezembro de 2025, no qual foram escolhidas cinco matrizes de localidades distintas, árvores vigorosas e sadias**,** situadas no Estado do Amazonas, como mostra a figura 03 a seguir.

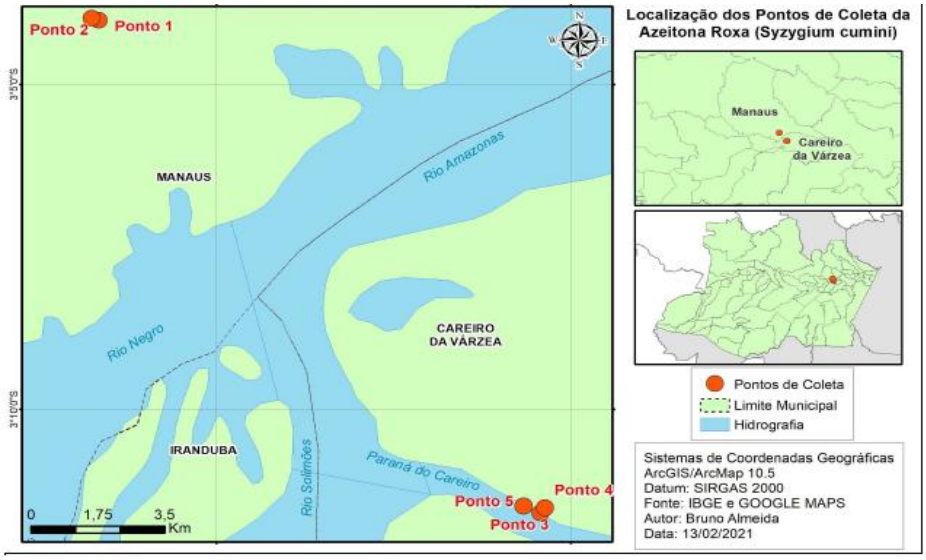


Figura 03: Localização dos frutos de Azeitona Roxa (*Syzygium cumini*).
Fonte: Próprio Autor (2025).

As coletas foram feitas em datas diferentes, as duas primeiras localizadas na cidade de Manaus - Amazonas. Já as três últimas matrizes, vieram do município de Careiro da Várzea – Região metropolitana de Manaus. Em cada matriz foram coletados 30 frutos, totalizando 150 frutos de azeitona roxa.



Figura 04: Matrizes selecionadas (de 1 à 5 da esquerda para à direita, respectivamente).
Fonte: Próprio Autor (2025).

Quanto aos métodos utilizados para a coleta, e em razão das árvores de azeitona roxa serem de Estrato Arbóreo e Arborescente, na primeira e segunda matriz utilizou-se uma vara para fazer a coleta (Figura 05). Quanto às três últimas, os frutos foram coletados diretamente da árvore, no qual foi necessário escalar a árvore para efetuar a coleta.



Figura 05: Método de coleta utilizada.
Fonte: Próprio Autor (2025).

Segunda etapa: separação, limpeza e secagem das sementes.

A velocidade da secagem é de fundamental importância quando se considera tempo e deterioração da semente. Após a coleta, em dezembro de 2025 teve início a separação da polpa e da semente com a utilização de uma faca para fazer o corte e fazer a retirada (figura 06). Posteriormente, as sementes foram limpas e depois submetidas à secagem natural com a exposição diretamente ao sol para poder diminuir o teor de água nas sementes. A secagem natural é baseada nas ações do vento e do sol para a remoção da umidade das sementes. Tal processo é limitado pelo clima, quando as condições de umidade relativa do ar e temperatura não permitem, ou quando se trata de maiores volumes de sementes.



Figura 06: Separação da Polpa (parte carnosa) da semente.
Fonte: Próprio Autor (2025).

Terceira etapa: pesagem das sementes antes e após a secagem.

Quanto à pesagem das sementes, esta etapa, se divide em duas: Pesagem inicial das sementes contendo impurezas (antes da secagem) e Pesagem final das sementes limpas e perfeitas (após a secagem). As sementes selecionadas para o procedimento, foram as que ficaram armazenadas na câmara seca (banco de germoplasma vegetal). Sobre a importância da pesagem das sementes, Alves et al (2005, p. 878) destaca que à separação das sementes por classes de tamanho para determinação da qualidade fisiológica, através de testes de germinação e vigor, tem sido bastante empregada, visando encontrar a classe ideal para multiplicação das diversas espécies vegetais. Além disso, é necessário saber o quilograma de cada semente, para saber a qualidade da mesma (GARCIA *et al*, 2004). Nas sementes do mesmo tamanho, um peso menor é uma indicação de um grão mal desenvolvido ou de um ressecamento excessivo. O tamanho pode ser julgado por comparação com amostras representativas ou passando a semente através de telas selecionadoras com malhas de dimensões diferentes. Para a pesagem inicial das sementes antes da secagem, foi realizada com o uso de uma balança de precisão. Cada semente foi colocada na balança e pesada individualmente. Após a pesagem, cada semente foi medida em largura, diâmetro e comprimento. Ao final, foram pesadas todas as dez (10) sementes de cada matriz, totalizando cinquenta (50) sementes analisadas de cinco (5) matrizes distintas da mesma espécie, conforme Tabela 01.

Matriz 1	Semente 1	Semente 2	Semente 3	Semente 4	Semente 5	Semente 6	Semente 7	Semente 8	Semente 9	Semente 10	P. total
Peso	2g	2g	2g	1g	1g	2g	2g	1g	1g	1g	15g
Largura	0,9cm	1,0cm	1,0cm	1,0cm	1,0cm	1,1cm	1,0cm	1,0cm	0,9cm	0,9cm	
Comp	2,2cm	2,2cm	2,5cm	1,8cm	1,8cm	2,1cm	2,1cm	2,0cm	1,2cm	1,8cm	
Matriz 2	Semente 11	Semente 12	Semente 13	Semente 14	Semente 15	Semente 16	Semente 17	Semente 18	Semente 19	Semente 20	P. total
Peso	1g	1g	1g	1g	1g	1g	2g	2g	1g	1g	12g
Largura	1,0cm	0,9cm	0,8cm	1,0cm	0,9cm	0,8cm	1,0cm	1,1cm	0,8cm	0,9cm	
Comp	1,9cm	1,7cm	1,8cm	2,0cm	2,0cm	1,4cm	1,8cm	1,8cm	2,1cm	1,8cm	
Matriz 3	Semente 21	Semente 22	Semente 23	Semente 24	Semente 25	Semente 26	Semente 27	Semente 28	Semente 29	Semente 30	P. total
Peso	2g	2g	2g	2g	2g	2g	1g	2g	1g	1g	17g
Largura	1,3cm	0,9cm	1,1cm	1,1cm	1,1cm	1,0cm	1,0cm	1,0cm	0,9cm	0,9cm	
Comp	2,4cm	2,1cm	2,3cm	2,3cm	2,1cm	2,1cm	1,9cm	1,9cm	1,8cm	1,8cm	
Matriz 4	Semente 31	Semente 32	Semente 33	Semente 34	Semente 35	Semente 36	Semente 37	Semente 38	Semente 39	Semente 40	P. total
Peso	1g	2g	2g	2g	2g	1g	1g	1g	1g	1g	14g
Largura	1,0cm	1,0cm	1,0cm	1,0cm	0,9cm	0,9cm	0,9cm	0,9cm	0,8cm	1,0cm	
Comp	1,8cm	2,1cm	1,7cm	1,7cm	1,8cm	1,8cm	1,8cm	1,9cm	1,8cm	1,9cm	
Matriz 5	Semente 41	Semente 42	Semente 43	Semente 44	Semente 45	Semente 46	Semente 47	Semente 48	Semente 49	Semente 50	P. total
Peso	2g	2g	2g	2g	2g	2g	1g	2g	1g	2g	18g
Largura	1,2cm	1,1cm	1,0cm	1,0cm	1,1cm	1,1cm	1,0cm	1,0cm	0,9cm	0,8cm	
Comp	2,5cm	2,5cm	2,0cm	2,3cm	2,1cm	1,5cm	1,5cm	1,6cm	1,7cm	1,8cm	

Tabela 01: Pesagem inicial das sementes.
Fonte: Próprio Autor (2026).

Na pesagem final (Tabela 2) após a secagem de seis (6) dias, sendo exposto a uma temperatura média ambiente de 25º C, as sementes foram pesadas em uma balança de precisão de 0,01 grama com um copo. Foram anotados os valores do peso de cada semente e matriz como foi feito anteriormente. Após, foi aplicado à fórmula matemática da literatura existente (%U = (Pi-PS) *100/Pi) para saber a porcentagem de umidade de cada semente.

Matriz 1	Semente 1	Semente 2	Semente 3	Semente 4	Semente 5	Semente 6	Semente 7	Semente 8	Semente 9	Semente 10	P. total
Peso	1,11	0,70	1,16	0,71	0,82	1,09	1,06	0,92	0,74	0,87	
%U	44,5%	65,0%	42,0%	29,0%	18,0%	45,5%	47,0%	8,0%	26,0%	13,0%	
Matriz 2	Semente 11	Semente 12	Semente 13	Semente 14	Semente 15	Semente 16	Semente 17	Semente 18	Semente 19	Semente 20	P. total
Peso	0,86	0,70	0,63	0,78	0,81	0,63	1,14	0,95	0,74	0,51	
%U	14,0%	30,0%	37,0	22,0%	19,0%	37,0%	43,0%	5,0%	26,0%	49,0%	
Matriz 3	Semente 21	Semente 22	Semente 23	Semente 24	Semente 25	Semente 26	Semente 27	Semente 28	Semente 29	Semente 30	P. total
Peso	1,95	1,37	1,96	1,63	1,36	1,78	0,87	1,54	0,95	0,88	
%U	2,5%	31,5%	2,0%	18,5%	32,0%	11,0%	13,0%	23,0%	5,0%	12,0%	
Matriz 4	Semente 31	Semente 32	Semente 33	Semente 34	Semente 35	Semente 36	Semente 37	Semente 38	Semente 39	Semente 40	P. total
Peso	0,81	1,47	1,06	1	1,09	1	0,95	0,85	0,82	0,92	
%U	19,0%	26,5%	47,0%	50,0%	45,5%	0%	5,0%	15,0%	18,0%	8%	
Matriz 5	Semente 41	Semente 42	Semente 43	Semente 44	Semente 45	Semente 46	Semente 47	Semente 48	Semente 49	Semente 50	P. total
Peso	1,74	1,50	1,73	1,57	1,61	1,40	0,91	1,19	0,81	1,12	
%U	13,0%	25,0%	13,5%	21,5	19,0	9,0	30,0	40,5	19,0	44,0	

Tabela 02: Pesagem final das sementes.
Fonte: Próprio Autor (2026).

Quarta etapa: semeadura e Germinação.

Para a etapa da semeadura, foram utilizadas sementeiras de isopor e copos de plástico, com terra preta adubada. Após isso, colocaram-se as sementes nos recipientes e posteriormente foram irrigadas, como mostra a figura 07. O local escolhido para colocar as mudas foi em um espaço semiaberto e com luminosidade natural para as plantas. O total de sementes plantadas foram cinquenta (50), sendo dez (10) de cada matriz.



Figura 07: Plantio das sementes.
Fonte: Próprio Autor (2026).

Para melhor germinação das sementes, a irrigação ocorreu duas vezes ao dia em razão das altas temperaturas, condições climáticas da cidade de Manaus, uma pela manhã e outra no fim da tarde. As sementeiras, tubetes e os copos com as sementes plantadas, ficaram ao ar livre. No mês de janeiro de 2026, as sementes começaram a germinar, oito (8) dias após o plantio. Em seguida as plântulas se tornaram mudas e foram crescendo, um mês após a germinação as sementes se tornaram pequenas herbáceas, como mostra a figura 08.



Figura 08: Processo de germinação das sementes plantadas.
Fonte: Próprio Autor (2026).

Quinta etapa: banco de Germoplasma.

Além da implementação do viveiro florestal e para uma melhor análise das sementes, foi criado um banco de germoplasma vegetal (câmara seca) a partir das sementes de azeitona roxa, coletadas de cada matriz. O banco de germoplasma é utilizado para a preservação de espécies vegetais e animais. Isso ocorre porque o banco de germoplasma conservado funciona como um reservatório de genes, visto que o armazenamento tem importância fundamental em razão de espécies cujas sementes perdem rapidamente a sua qualidade fisiológica**,** principalmente quando não são semeadas logo após a colheita. Para a implantação do banco de germoplasma vegetal a partir das sementes de azeitona roxa, foram selecionadas dez (10) sementes de cada matriz sendo cinquenta (50) ao todo selecionadas para o armazenamento, como mostra a figura 09:



Figura 09: Banco de Germoplasma (câmara seca) da espécie Azeitona Roxa (*Syzygium cumini*).
Fonte: Próprio Autor (2026).

Quanto ao banco de germoplasma, foi feito de madeira oriundas de sobras de reaproveitamento da construção civil, a madeira apresenta uma característica chamada anisotropia, que propicia a troca de umidade das sementes com o meio externo, sendo fundamental para a preservação das sementes em câmara seca. Outro componente presente na câmara seca, é a tampa de vidro, oriunda do reaproveitamento de sobras da indústria de vidro da zona franca de Manaus. O vidro contribui com uma característica importante para a preservação das sementes, é a chamada higroscopia, que é a capacidade de manter a troca de temperatura entre os diferentes tipos de ambientes, fundamental para a preservação das sementes com baixo custo, sem a

necessidade de câmara fria. Internamente as sementes foram armazenadas com o auxílio de EPE (espuma de polietileno expandido) oriunda do reaproveitamento de sobras da indústria da zona franca de Manaus. O EPE apresenta uma característica fundamental para a preservação das sementes, que é faixa de densidade de kg/m³, variando de 15 – 50, bem como contribui para a baixa absorção de água pelas sementes, impedindo sua germinação dentro da câmara, sua elasticidade média contribuí para o controle da dilatação das sementes com ganho e perda de umidade diariamente, além de apresentar boa durabilidade, protegendo as sementes dentro da câmara seca.

Sexta etapa: transplantio das mudas.

Cerca de dois (2) meses e oito (8) dias, especificamente no mês de março de 2026, todas as mudas plantadas foram transplantadas para sacolas plásticas devidamente adubadas com adubo orgânico. Após o transplantio, todas elas foram irrigadas e etiquetadas a espera do plantio em áreas degradadas da cidade de Manaus, conforme figura 10.



Figura 10: Processo de transplantio das mudas.
Fonte: Próprio Autor (2026).

Resultados e discussões

Após a coleta, pesagem, limpeza, armazenamento e semeadura das sementes de Azeitona roxa (Syzygium cumini), que foram divididas em cinco grupos de dez sementes por matriz distinta, para a implantação de um viveiro florestal experimental na cidade de Manaus, levando em consideração o clima local que passa por constantes variações, foi possível observar e obter resultados relevantes e satisfatórios. Todas as cinco matrizes, apresentaram alta taxa de germinação: Matriz um (1) obteve 100% de germinação, ou seja das dez (10) sementes plantadas, todas germinaram; Matriz dois (2) obteve 80% de germinação, ou seja das dez (10) sementes plantadas, oito (8) germinaram; Matriz três (3) obteve 100% de germinação, ou seja das dez (10) sementes plantadas, todas germinaram; Matriz quatro (4) obteve 90% de germinação, ou seja das dez (10) sementes plantadas, nove (9) germinaram; Matriz cinco (5) obteve 100% de germinação, ou seja das dez (10) sementes plantadas, todas germinaram. A semeadura realizou-se em uma sementeira de isopor em tubetes e em copos descartáveis em lugares distintos, não havendo alteração nos resultados obtidos para o processo de germinação em decorrência dos diferentes lugares, pois todas as matrizes foram plantadas no mesmo tipo de solo com a devida adubação e irrigados todos os dias no início da manhã e final da tarde, ocasionando um ambiente saudável e equilibrado para a germinação e desenvolvimento das plântulas. Por ser uma espécie que gosta de umidade, foi observado que a implantação de um viveiro de Syzygium cumini deve ser realizado no período chuvoso (inverno amazônico), que em Manaus e Estado do Amazonas, tem início em meados de novembro e se estende aproximadamente até maio, mesmo que a estação frutífera da espécie dure aproximadamente um período de dois meses. O procedimento de pesagem antes e após o período de secagem foi realizado, constatando a perda de umidade presente nas sementes selecionadas para a formação do banco de germoplasma das matrizes escolhidas para a implantação do viveiro florestal experimental. Os resultados promissores observados desde a coleta, semeadura, germinação e posterior transplantio das mudas de Syzygium cumini indicaram uma seleção de matrizes aptas a fornecer sementes saudáveis que produziram mudas de vigor e qualidade. Além disso, o uso da metodologia de preservação de sementes em câmara seca (banco de germoplasma vegetal) demonstrou ser uma forma simples, didática, eficaz e de baixo custo para contribuir com os estudos e preservação das sementes frutíferas do Bioma Amazônia.

Considerações Finais

Esta pesquisa demonstrou o conhecimento e análise das seguintes informações sobre as sementes da espécie Azeitona Roxa (Syzygium cumini): 1- Qualidade fisiológica, 2 - Morfológica, 3 - Anatômica e 4 - biométrica das sementes, que variou de acordo com os frutos e das respectivas matrizes das quais foram coletadas, demonstrando a variação da taxa de umidade, quando expostas à temperatura ambiente. Quanto às sementes, estas devem ser plantadas em solo úmido e adubado para contribuir com a germinação e desenvolvimento das plântulas, sendo feita a remoção da parte carnosa do fruto. O revestimento externo (tegumento externo) das sementes apresenta propensão à aquisição de fungos que facilitam a putrefação apontando a espécie como uma escolha desafiadora para a implantação de viveiros experimentais. Além disso, a pesquisa possibilitou um amplo conhecimento acerca da espécie da azeitona roxa, bem como todo o processo para o seu plantio e germinação até o seu desenvolvimento. Também pode-se compreender mais a importância de um viveiro florestal, principalmente de espécies frutíferas que são benéficas tanto para o meio ambiente quanto para a população. Sugere-se então, com base nestes estudos, o incentivo a novos projetos voltados ao estudo de sementes de árvores frutíferas da região amazônica, não apenar por ser o bioma mais rico em biodiversidade do mundo, mais por possuir diversas espécies totalmente desconhecidas, que podem contribuir com o avanço da ciência.

Referências Bibliográficas

AGUIAR, I.B. de; PINÃ-RODRIGUES, F.C.M. & FIGLIOLIA, M.B. **Sementes Florestais, Morfologia, Germinação, Produção.** ABRATES, Brasília, 1993.

ALMEIDA, DS. **Modelos de recuperação ambiental.** In: Recuperação ambiental da Mata Atlântica [online].3rd ed. rev. and enl. Ilhéus, BA: Editus, 2016, pp. 100-137.ISBN 978-85-7455-440-2.

ALVES, E. U.; BRUNO, R. L. A.; OLIVEIRA, A. P.; ALVES, A. U.; ALVES, A. U.; PAULA, R. C. **Influência do tamanho e da procedência de sementes *Mimosa caesalpiniifolia* Benth. Sobre a germinação e vigor.** Rev. Árvore vol.29 no.6 Viçosa

Nov./Dec. 2005.

CECCHETTO, Carise Taciane1; CHRISTMANN, Samara Simon2; OLIVEIRA, Tarcísio Dorn de. **ARBORIZAÇÃO URBANA: IMPORTÂNCIA E BENEFÍCIOS NO PLANEJAMENTO AMBIENTAL DAS CIDADES**. In: XVI Seminário Internacional de Educação do Mercosul. Disponível em: https://www2.ufrb.edu.br/petmataatlantica/. Acesso em 02 de fevereiro de 2026.

CULTURA MIX. **O viveiro florestal - montagem e manutenção. 2015.** Disponível em:https://meioambiente.culturamix.com/agricultura/o-viveiro-florestal-montagem-emanutencao. Acesso em: 02 de fevereiro de 2026.

CORDEIRO, A.; FARIA, A.A. – **Gestão de bancos de sementes comunitários.** Rio de Janeiro: AS-PTA, 1993. Cap2, p 47-60.

CUNHA, Carla Salina da. **IMPORTÂNCIA DAS ÁRVORES PARA MELHORA NO CONFORTO TÉRMICO DE VIAS PÚBLICAS URBANAS.** Disponível em: https://www.eumed.net/rev/cccss/2019/05/arvores-melhora-conforto.html. Acesso em: 02 de janeiro de 2026.

DEICHMANN, V. **Noções sobre Sementes e Viveiros Florestais.** Universidade Federal do Paraná, 1ª Edição, UFPR, Curitiba,1967.

GARCIA, D.C.; BARROS, A.C.S.A.; MENEZES, S.T.P. **A secagem de sementes.** In: Fitotecnia • Cienc. Rural 34 (2) • Abr 2004•https://doi.org/10.1590/S0103-847. https://www.scielo.br/j/cr/a/kBCLtfwTJhWMrC85CKwxDhq/?lang=pt.Acesso em 15 de janeiro de 2026.

MACEDO, A. C. **Produção de mudas em viveiros florestais - Espécies Nativas.** SEMA-SP, São Paulo, 1993.

SILVA, Marciéli da. **Poder germinativo de sementes de Jambolão [*Syzygium cumini* (L.) Skeels] de acordo com o tempo de secagem posterior ao hidrocondicionamento - Dois vizinhos**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Paraná, 2014.

VPA. **5 motivos para ter uma árvore frutífera em casa.** Viveiro Porto Amazonas. 2020. Disponível em: http://www.viveiroportoamazonas.com.br/noticias/5-motivos-para-ter-uma-arvore-frutifera-em-casa. Acesso em: 20 de fevereiro de 2026.

INTERESSE PELOS TEMAS DAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS NO ENSINO FUNDAMENTAL II

1 João Antenogenes Prudencio da Costa, 2 Roberto Wagner Lourenço, Prof. Dr.
1 Unesp - Instituto de Ciência e Tecnologia campus Sorocaba - ICTS, e-mail: joao.antenogenes@unesp.br; 2 Unesp - Instituto de Ciência e Tecnologia campus Sorocaba - ICTS, e-mail: roberto.lourenco@unesp.br.

Palavras-chave: 1:Ensino; 2: Ambiental; 3: Escalas.

Resumo

A pesquisa investiga os impactos pedagógicos do ensino da temática ambiental no Ensino Fundamental II, utilizando como estudo de caso a E.M.E.F. Leandro Klein, em São Caetano do Sul. O objetivo geral é mensurar o interesse de alunos e professores pelos temas das ciências ambientais, buscando promover um melhor planejamento de aulas e a transdisciplinaridade. A metodologia emprega uma abordagem quanti-qualitativa, com a aplicação de questionários estruturados baseados em escalas psicométricas de Likert/Guttman para coletar dados de 15 professores e 30 alunos. Intitulada "Ensino de meio ambiente em escolas do fundamental II" aborda o senso de conexão e interesse dos estudantes e professores por temas das ciências ambientais e que estes deveriam estar relacionados ao sentimento de pertencimento a um lugar, sendo que este mesmo é parte integrante do meio ambiente geral, incluindo a comunidade a que ele pertence. A Base Nacional Comum Curricular (BRASIL,1996) e os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL,1998) para o ciclo de ensino do fundamental II (6º ao 9º) apresentam no seu escopo geral um conjunto de orientações sobre os conteúdos e aprendizagens fundamentais ao ensino de disciplinas do ciclo básico. Contudo, seu teor não contempla os modos de abordagem na práxis docente. A pesquisa se endereça a esta operação e pretendeu avaliar as variáveis de sensibilização ambiental e que possa ajudar na integração da escola com seu meio ambiente.

Introdução

Os Parâmetros Curriculares para o Ensino Fundamental (6º ao 9° anos) indicam que, as ciências ambientais têm por base os conhecimentos das disciplinas de Física, Química, Matemática, Biologia, Geografia. Assim o aprofundamento nestas disciplinas favorece a compreensão dos processos ambientais de forma geral, podendo-se avançar em questões ambientais mais relevantes, como os temas sobre Geologia, Geomorfologia, Recursos Hídricos, Climatologia e Ecossistemas. Já a transdisciplinaridade e a interdisciplinaridade devem, segundo a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional LDB ou Lei nº 9.394/1996 nos artigos 3º, 6º 10º, 12º e 24º proporcionar um desenvolvimento aprendizado dos temas das ciências ambientais. Esta pesquisa pretendeu incentivar o aprendizado da temática ambiental e seu uso na rotina pedagógica e assim contribuir para a formação e qualificação de professores do ensino fundamental II nestes eixos.

Material e Métodos

Foi escolhida para aplicar a pesquisa a Escola Municipal de Ensino Fundamental Leandro Klein. A E.M.E.F. Leandro Klein em 2022 contou com 1.034 matriculas de alunos, distribuídos em dois ciclos de funcionamento, ensino fundamental II pela manhã 6º ao 9º ano e ensino fundamental I no período da tarde 1º ao 5º ano, localizada no município de São Caetano do Sul, Estado de São Paulo, Brasil. (PMSCS, 2024).

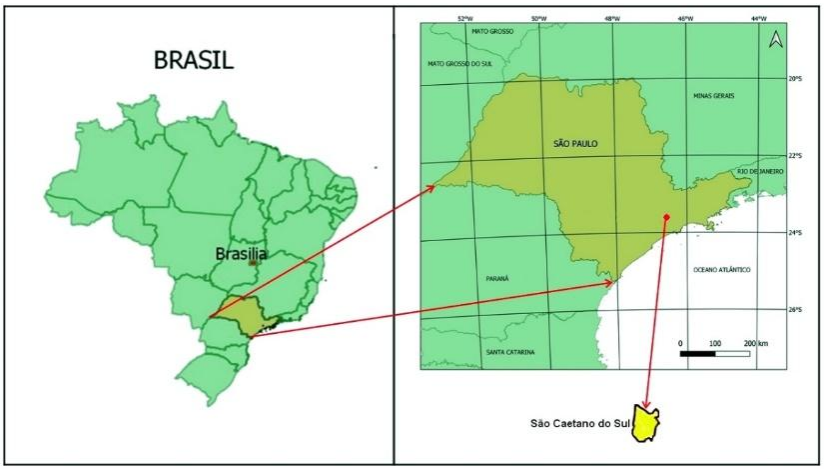


Figura 01: Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Autor (2025)

A escola conta com bons recursos de acessibilidade com escadas, elevador e sanitários, que atendem as demandas espaciais. É fornecida alimentação (café e almoço) para os alunos de ambos os ciclos, que se reveza nos turnos da manhã e tarde.

A área externa é bem arborizada (Figura 03), com plantas e áreas gramadas cuidadas durante todo o ano. Nessa parte aberta, são realizadas a entrada e a saída dos alunos, bem como as festas comemorativas do calendário escolar (junina, mostra cultural e outras).

Com relação ao acesso, o prédio tem quatro pisos que podem ser acessados pelo elevador, pela escada de livre circulação e por duas escadas de acesso limitado que também funcionam como saídas de emergência. A escada do subsolo conduz ao refeitório, ao laboratório de Ciências, ao ateliê de Arte, sala de impressão, sala de música, sala de ensino especial, quadra de esportes, sanitários, vestiários, sala de Educação Física, sala de manutenção e estacionamento de professores. No andar térreo, há acessos às áreas abertas, aos brinquedos infantis, ao pátio coberto, sala de judô, secretaria geral, sala de direção, sala de professores e aos sanitários. O primeiro andar conta com dez salas de aula, sala de coordenação e sanitários. No segundo andar possui oito salas de aula, sala de leitura/biblioteca, sala de coordenação, sala de informática e sanitários (Figura 02).



Figura 02: Área externa arborizada. Fonte: Autor (2023)

É considerada uma escola dinâmica por oferecer atividades complementares, durante todo o ano, com foco no desenvolvimento de responsabilidade social e das competências socioemocionais fundamentais para a convivência em sociedade no mundo contemporâneo com grande participação dos discentes nesses projetos. A escola desfruta ainda de elevado respeito da comunidade local e de seu entorno imediato, além de ser bastante procurada por pais e responsáveis que desejam matricular seus filhos devido às qualidades estruturais do edifício e à qualificação do corpo docente, demonstrando ser sua influência significativa na região onde se localiza.

Recursos humanos institucional

O corpo discente é formado por alunos que compartilham majoritariamente algumas características comuns, como residir perto da escola e o uso dos diferentes serviços que a unidade oferece. O alunado caracteriza-se ainda pela quase nula distorção idade-série e por um bom desempenho nas avaliações externas. O corpo docente é composto de 51 professores contratados por meio de concurso público, sendo muitos atuantes nesta escola desde sua inauguração (1996), e que lecionam em ambos os períodos, manhã e tarde, com a maioria deles com duas licenciaturas, especialização latu-sensu e/ou mestrado nas suas áreas de atuação. São reconhecidos por seu padrão participativo, com engajamento em todas das discussões da escola, bem como das atividades propostas, sendo responsáveis pelo desenvolvimento escolar.

Elaboração do método investigativo

Os questionários e formulários desta pesquisa, apresentados previamente ao Conselho de Ética em Pesquisa da Unesp através da Plataforma Brasil e obteve aprovação e licença para continuar a investigação com os dois grupos de pessoas: professores e alunos. Deu-se dessa forma, tendo em vista a possibilidade de facilitar a amostragem e permitir a validação que pudessem representar de modo mais adequado os grupos investigados (LOPES, NETO, p.13, 2023). Optou-se a partir dos questionários aplicados utilizar o modelo de escalas de Likert e Gusmann para a análise exploratória em escalas de variáveis, que se apresentam de forma hora nominais ou ordinais (COSTA Jr. et al., p. 361, 2024).

As questões que compõem os questionários foram divididas em 03 grupos:

a) Desenvolvimento dos professores da escola (P1): contempla questões relacionadas a formação acadêmica dos professores, sobre sua visão de meio ambiente e sustentabilidade;
b) Composição de temas sobre sustentabilidade e meio ambiente (P2, P3): contempla questões relacionadas a temas abordados pelos professores no cotidiano das disciplinas que compõem o currículo escolar, buscando identificar a transversalidade dos temas de meio ambiente e sustentabilidade;
c) Percepção da temática ambiental (P&A): busca avaliar como professores e alunos percebem a importância da temática ambiental no contexto de sua formação pedagógica.

Amostragem com os professores se deu da seguinte maneira: 02 professores de Língua Portuguesa, 01 de Língua Inglesa, 02 de Ciências, 02 de Educação Física, 02 de Ciências, 02 de História, 02 de Geografia, 02 de Matemática totalizando 15 professores. Para os alunos foi adotado um número mínimo de 30 carteiras ocupadas das salas do 6º ao 9º ano, totalizando 30 alunos. Foi adotado as nomenclaturas de identificação dos questionários, sendo o aparece a letra “P” são questionários dedicados aos professores e onde aparece a letra “A” são dedicados a alunos e onde aparece ambas a letras “P&A” é referente a ambos.

Elaboração dos indicadores de desenvolvimento (P1, P2, P3, P&A)

O questionário denominado P1, foi construído conforme os itens da Figura 03 em que os professores foram incentivados a responder a questões relacionadas ao seu histórico profissional, considerando respostas flexíveis, do tipo afirmativo ("SIM") ou negativo ("NÃO"), bem como respostas abertas conforme a sensibilidade do professor.

Qual a sua formação universitária? Resposta aberta
Possui pós-graduação e em que nível? ( ) SIM ( ) NÃO e Respostas abertas.
Tem acúmulo de cargo? Resposta aberta ....
Disciplinas que leciona?
Quantos anos faz que leciona na escola?
Quais são os períodos e os anos em que leciona?
Que tipo de ensino superior indicaria para os alunos que desejassem seguir carreira nas ciências ambientais e se pública ou privada?
Qual sua profissão anterior a docência?
Quais os tipos de atividades extracurriculares participam?

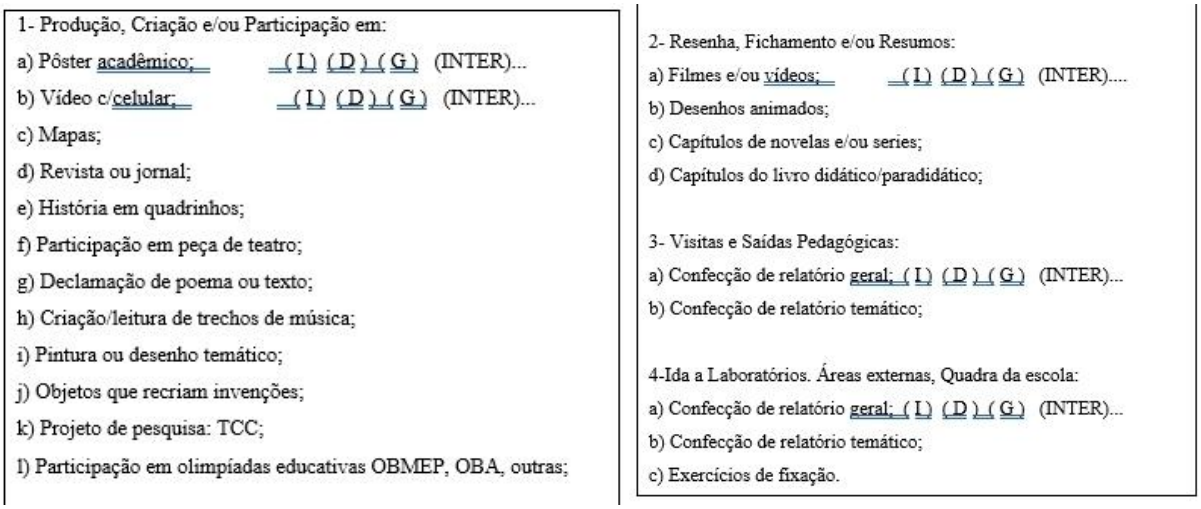
Figura 03: Itens do questionário P1. Fonte: Autor (2025)

O questionário "P2" foi construído conforme as questões da Figura 04, sendo indicado ao professor marcar com um "X" os tipos de assunto que foram utilizados pelo professor para aprofundar o conhecimento relacionado ao meio ambiente, bem como se foi realizado individualmente (I), em duplas (D), em grupos (G) ou de forma interdisciplinar (INTER).

1. Parques Estaduais/ Nacionais/ Municipais; (I) (D) (G) (INTER)...
2. Meio Rural e florestal (desmatamento e cultivo); (I) (D) (G) (INTER)...
3. Produção de bens de consumo (mudança na vida urbana);
4. Setor Primário (agricultura, pecuária, mineração);
5. Bacias Hidrográficas;
6. Modificações atmosféricas (chuvas/secas);
7. Manejo florestas naturais ou plantadas;
8. Climatologia (continental e oceânica);
9. Usos das águas (superficiais e subterrâneas);
10. Recursos Energéticos (vento, solar, hidrelétrica, outras);
11. Saúde Pública (gripe, COVID, contaminações);
12. Amazônia (áreas do Brasil e América do Sul);
13. Represas hidrelétricas e de abastecimento;
14. Agroecologia (rural, histórico, ecoturismo);
15. Biomas do Brasil (caatinga, cerrado e outros);
16. Direito Ambiental (direito humano a vida saudável);
17. Usos das águas (pesca, recreação, lagos, represas, praias);
18. Capital humano e direito ambiental;
19. Vídeos e mídias interativas sobre temas ambientais (youtube, facebook, etc);
20. Pesticidas e defensivos agrícolas (perigos p/ saúde);
21. Astronomia (viagens espaciais, astros, poluição luminosa);
22. Culinária orgânica (alimentos sem agrotóxicos);
23. Desastres ambientais (chuvas e secas sazonais/histórica);
24. Aspectos geológicos (tipos de rocha, placas e Pangeia);
25. Outros. Sugestão?

Figura 03: Itens do questionário P2. Fonte: Autor (2025)

O questionário (P3), foi elaborado sobre as questões da Figura 04, sendo indicado ao professor marcar com um "X" nos tipos de instrumentos que foram utilizados por ele para aprofundar o conhecimento relacionado ao meio ambiente. Também por assinalar "X" onde foi realizado individualmente (I), em duplas (D), em grupos (G) ou de forma interdisciplinar (INTER).



1- Produção, Criação e/ou Participação em:
a) Pôster acadêmico; (I) (D) (G) (INTER)...
b) Vídeo c/celular; (I) (D) (G) (INTER)...
c) Mapas;
d) Revista ou jornal;
e) História em quadrinhos;
f) Participação em peça de teatro;
g) Declamação de poema ou texto;
h) Criação/leitura de trechos de música;
i) Pintura ou desenho temático;
j) Objetos que recriam invenções;
k) Projeto de pesquisa: TCC;
l) Participação em olimpíadas educativas OBMEP, OBA, outras;

2- Resenha, Fichamento e/ou Resumos:
a) Filmes e/ou vídeos; (I) (D) (G) (INTER)....
b) Desenhos animados;
c) Capítulos de novelas e/ou series;
d) Capítulos do livro didático/paradidático;

3- Visitas e Saídas Pedagógicas:
a) Confecção de relatório geral; (I) (D) (G) (INTER)...
b) Confecção de relatório temático;

4-Ida a Laboratórios. Áreas externas, Quadra da escola:
a) Confecção de relatório geral; (I) (D) (G) (INTER)...
b) Confecção de relatório temático;
c) Exercícios de fixação.

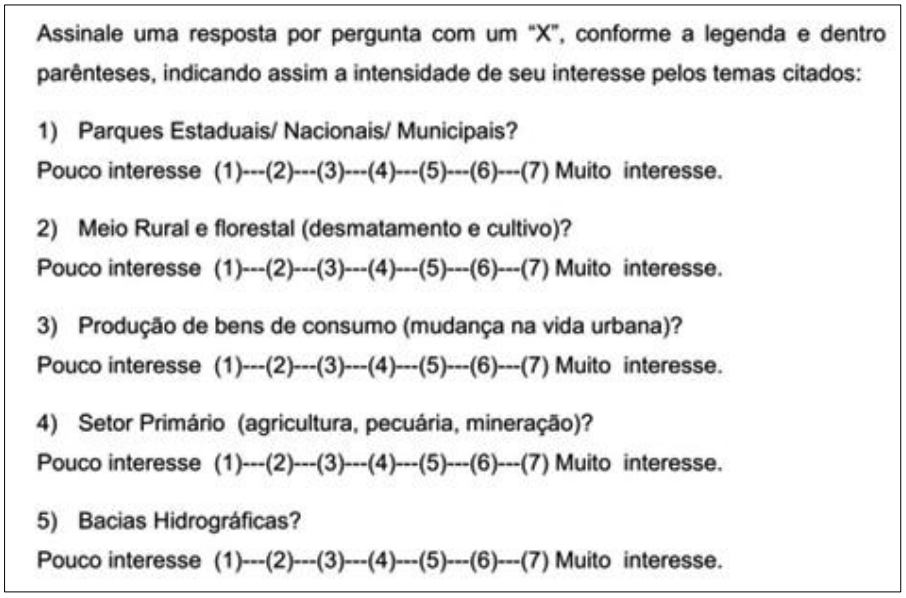
Figura 04: Itens do questionário P3. Fonte: Autor (2025)

O questionário (P&A) da Figura 06 foi aplicado para professores e alunos, buscando medir o grau de intensidade de interesse pessoal pelos temas relacionados ao meio ambiente. Nesta etapa, foram definidas 07 classes de identificação, para medir o grau de interesse pessoal pelos assuntos abordados em sala de aula (Costa Jr, et al. p.367, 2024)". Em seguida, o conjunto de 07 números passaram por um processo de transformação, sendo agrupados em 03 intervalos discretos ou categorias, visando simplificar os dados e facilitar a interpretação. As 03 categorias da legenda ES referenciadas nas escalas Likert/Guttman (ALABI,2023).

Desinteresse	Neutro	Interesse
(1) Extremo Desinteresse	(4) Neutralidade	(5) Moderado Interesse
(2) Muito Desinteresse		(6) Muito Interesse
(3) Moderado Desinteresse		(7) Extremo Interesse

Figura 05: Legenda das categorias do questionário P&A. Fonte: Autor (2025)

Abaixo temos os itens do questionário P&A. Note que as questões 6,7,8 até a 25 são as mesmas do questionário P2.



Assinale uma resposta por pergunta com um "X", conforme a legenda e dentro parênteses, indicando assim a intensidade de seu interesse pelos temas citados:

1) Parques Estaduais/ Nacionais/ Municipais?
Pouco interesse (1)---(2)---(3)---(4)---(5)---(6)---(7) Muito interesse.

2) Meio Rural e florestal (desmatamento e cultivo)?
Pouco interesse (1)---(2)---(3)---(4)---(5)---(6)---(7) Muito interesse.

3) Produção de bens de consumo (mudança na vida urbana)?
Pouco interesse (1)---(2)---(3)---(4)---(5)---(6)---(7) Muito interesse.

4) Setor Primário (agricultura, pecuária, mineração)?
Pouco interesse (1)---(2)---(3)---(4)---(5)---(6)---(7) Muito interesse.

5) Bacias Hidrográficas?
Pouco interesse (1)---(2)---(3)---(4)---(5)---(6)---(7) Muito interesse.

Figura 06: Itens do questionário P&A. Fonte: Autor (2025)

Resultados e Discussão

Apresentamos a seguir os resultados obtidos na pesquisa.

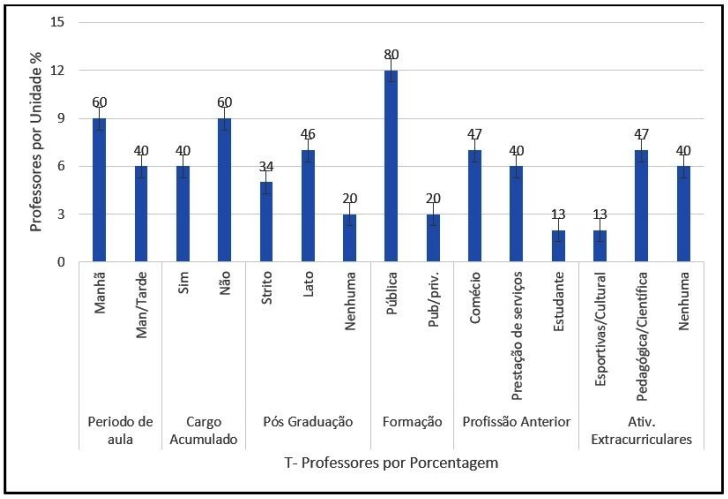


Figura 09: Respostas do questionário P1. Fonte: Autor (2025)

O gráfico da Figura 09 indica que a maioria dos professores trabalha pela manhã (60%) e desses 40% acumulam cargos em outras redes det ensino. A maioria tem pós-graduação, com predomínio para o Latu sensu (40%) e a maioria deles (80%) são oriundos de escolas públicas. Outra importante constatação, e preocupante, diz respeito ao fato de que a minoria dos professores, ou seja, somente 13% destes tiverem origem estudantil, o que quer dizer que a maioria ao concluir o 2º grau não continuou os estudos para acender a carreira docente. Também outro número significativo, está no fato de 40% desses professores não realizarem até a data da pesquisa, nenhuma atividade extracurricular.

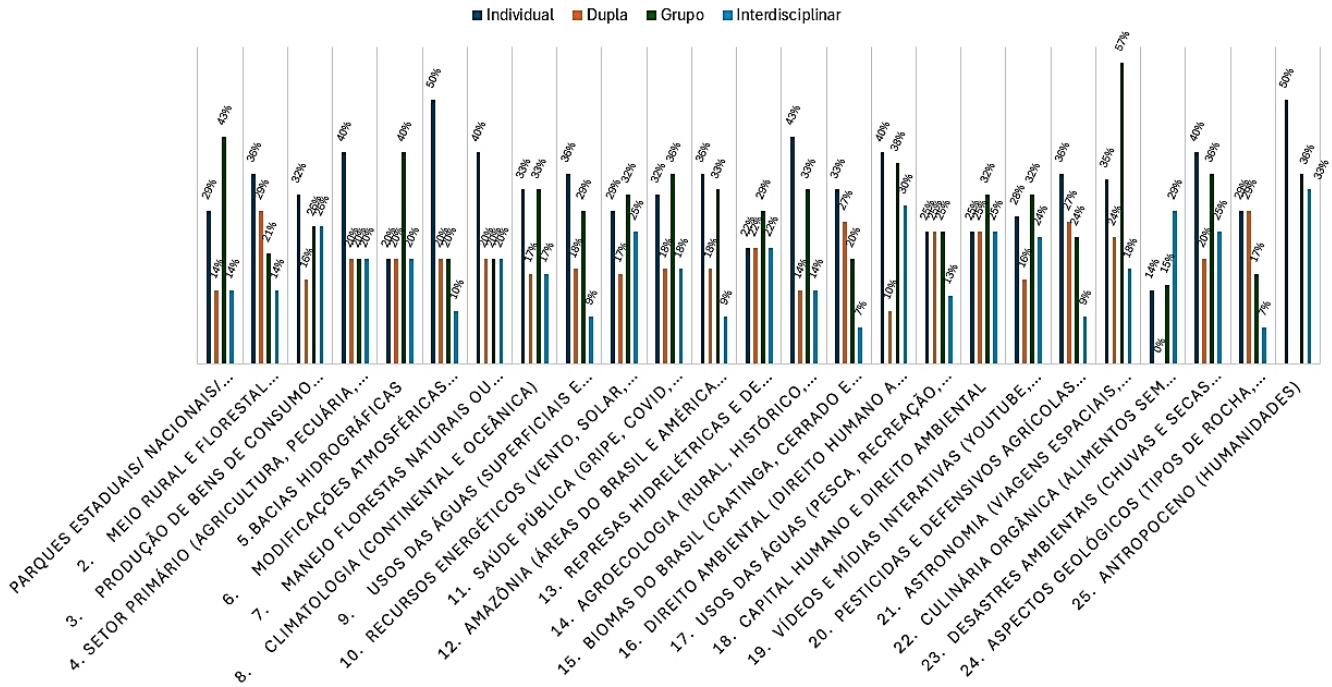


Figura 10: Respostas do questionário P2. Fonte: Autor (2025)

Ao analisar o gráfico da Figura 06 do questionário P2, é possível observar que um grupo de 05 temas se destacaram: vídeos e mídias interativas (19) com 87%, saúde pública (11) com 80%, seguidas de produção de bens de consumo (3) e recursos energéticos (10), ambos com 73%, bem como Parques Estaduais/ Nacionais/ Municipais (1) com 60% de abordagem. Os destaques negativos ficaram por conta: bacias hidrográficas (5) com 13%, manejo florestas naturais ou plantadas (7), climatologia (8) e capital humano e direito ambiental (18), todas com 20% de abordagem. Nesse sentido a pesquisa mostra que apesar dos temas periféricos como: saúde pública, produção de bens de consumo e recursos energéticos, existe baixa abordagem por temas de alta relevância ambiental, tais como, bacias hidrográficas, manejo florestais naturais ou plantadas e climatologia, e isso é muito preocupantes, visto que estes têm correlação com questões ambientais importantes.

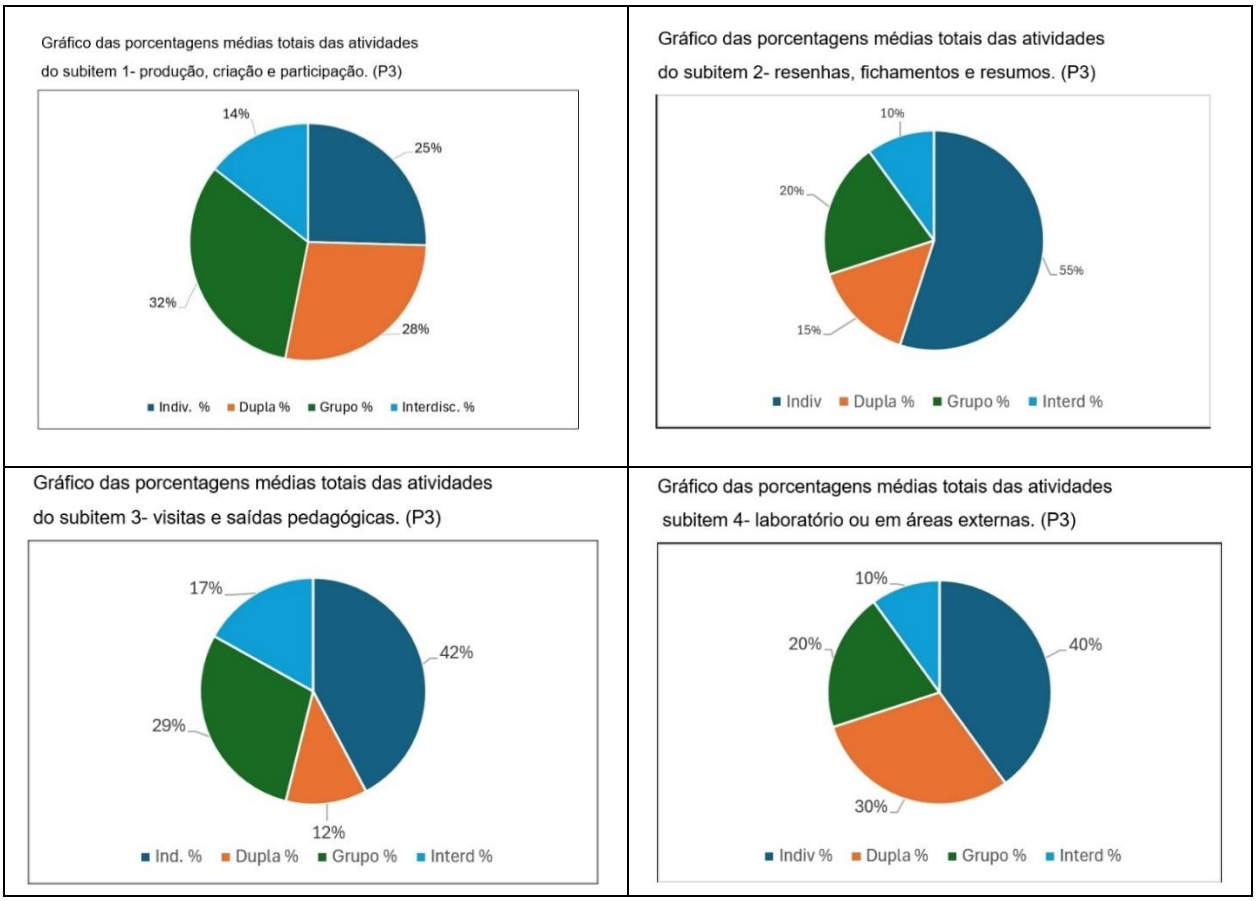


Figura 11: Gráficos das respostas do questionário P3. Fonte: Autor (2025)

Os gráficos da Figura 11 indicam que a maioria absoluta dos professores deram preferência por realizar as atividades de maneira individual, seguidos por duplas e depois vem os grupos. E as atividades de maneira interdisciplinar estão vinculados as saídas pedagógicas, visitas a laboratórios e a suas apresentações se fazem em forma de resenhas, fichamentos e resumos.

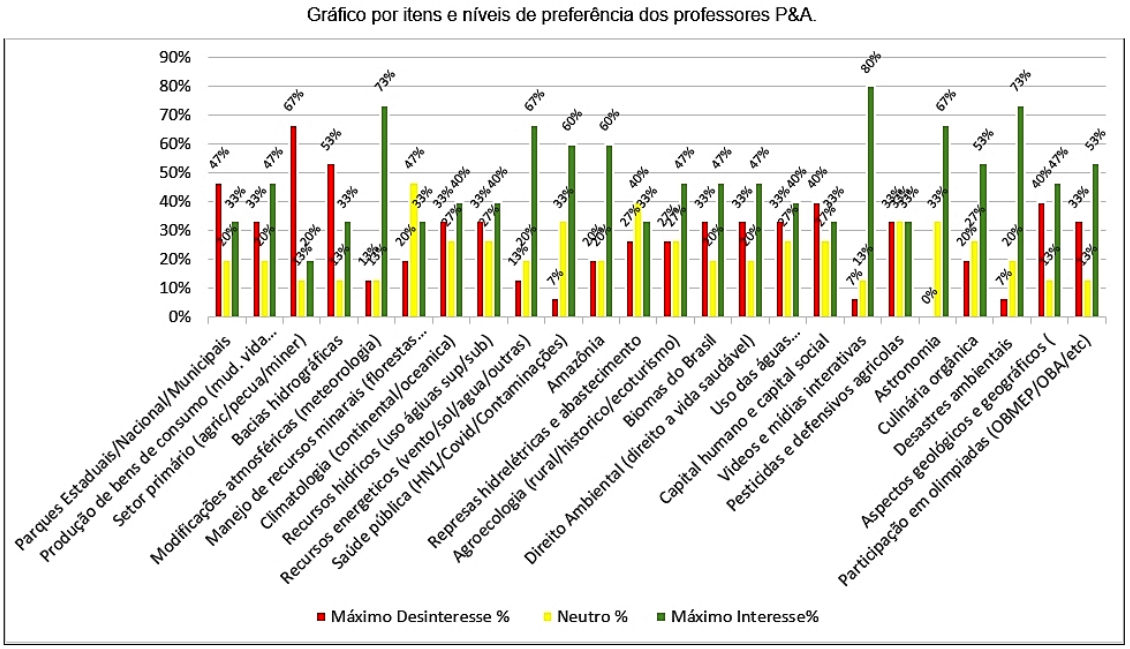


Figura 12: Respostas do questionário P3 pelos Professores. Fonte: Autor (2025)

O gráfico da Figura 12 indica que, 80% dos professores mostraram as maiores preferencias pelo tema Vídeos e mídias interativas, seguidas de Modificações atmosféricas (meteorologia) e Desastres ambientais, sendo preferidos por 73% dos

professores. É bem provável que essas preferencias tenham forte correlação', no caso dos Vídeos e mídias interativas com o momento atual, que facilita esse tipo de manuseio de tecnologia, e no caso das outras duas, as atuais discussões em torno de temas relacionados a clima e mudanças climáticas e os noticiados relacionados a eventos climáticos extremos. No caso do Máximo Desinteresse, o item Setor Primário com 67% de falta de interesse dos professores, pode ter se destacado por ser um tema extremamente técnico, exigindo um grau de conhecimento mais aprimorado. Importante notar que, o tema Bacias Hidrográficas, aparece como o segundo tema mais rejeitado na escala de Máximo Desinteresse.

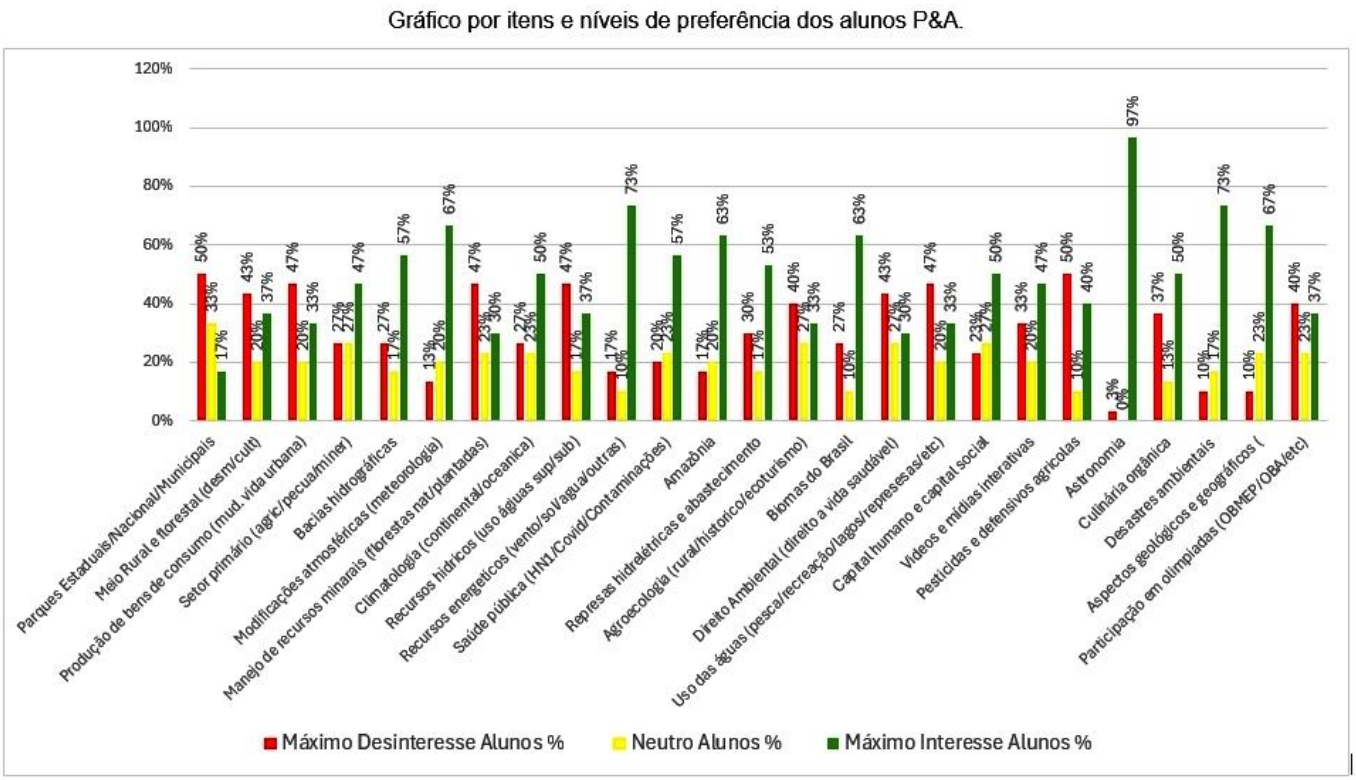


Figura 13: Respostas do questionário P3 pelos Professores. Fonte: Autor (2025)

No gráfico da Figura 13 vemos que, 97% dos alunos tem os maiores interesses pelos temas de Astronomia, acompanhados de Recursos energéticos e Desastres ambientais, ambos com 73% das preferências. Merecem destaque ainda Aspectos geológicos e Modificações atmosféricas, cada uma com 67% das preferências. Acreditamos ser reflexo do momento atual, em que a discussão por energias renováveis, exploração de novas fontes de energia, veículos elétricos e demais questões relacionadas devem provocar nos alunos uma maior curiosidade. No caso do Máximo Desinteresse, os destaques ficaram para temas relevantes como, Parques (50%), temas relacionados a Florestas e a Recursos hídricos (47%). O que é preocupante, visto que são temas de importância e relevância no contexto da conservação e preservação ambiental

Matriz de correlação dos níveis de Interesse Professores X Alunos.

Níveis de interesse	Máx. Desinter. Aluno %	Neutro Alun %	Máx. Inter. Alu %	Máx. Desinter. Prof. %	Neutro Prof.%	Máx. Inter. Prof. %
Máximo Desinteresse. Aluno. %	1	0,34	-0,93	0,40	0,20	-0,53
Neutro Aluno. %	0,34	1	-0,67	0,46	-0,21	-0,35
Máximo Interesse Aluno %	-0,93	-0,67	1	-0,50	-0,08	0,56
Máximo Desinteresse Professor %	0,40	0,46	-0,50	1	-0,32	-0,84
Neutro Professor %	0,20	-0,21	-0,08	-0,32	1	-0,24
Máximo Interesse Professor %	-0,53	-0,35	0,56	-0,84	-0,24	1

Figura 13: Correlação de Pearsons das respostas dos grupos. Fonte: Autor (2025)

A Figura 13 apresenta os resultados utilizando o "Coeficiente de Correlação de Pearson" (FIGUEIREDO, 2014), que é uma técnica estatística para medir uma relação linear e bivariada entre os valores percentuais dos níveis de Máximo Desinteresse, Neutro e Máximo Interesse dos questionários. Quanto ao nível de interesse dos professores e alunos chamam a atenção para a correlação obtida entre os níveis de Máximo Desinteresse de ambos os grupos, com correlação de 40%. Isso mostra que tanto professores como alunos rejeitam quase 40% dos 25 temas pesquisados. Por outro lado, quando tratado do item Máximo Interesse entre os grupos o valor de aceitação é de 56%. Quando tratado do item Máximo Interesse entre os grupos o valor de aceitação é de 56%. Dessa forma indica que as repostas dos grupos tem uma relação moderada entre sí, ou seja, de um pouco mais da metade dos temas pesquisados são de interesse para ambos os grupos.

Considerações Finais

Embora os resultados encontrados apontem de forma geral, para as atividades de produção e criação e elas foram realizadas na sua forma interdisciplinar e que houve a predominância de atividades individuais, acreditamos se fossem promovidas oficinas práticas para professores das disciplinas de linguagens como Português, História, Artes, Inglês, Educação Física afim de crescer seu interesse em associar as outras como, Matemática, Ciências e Geografia, que assim poderia haver melhoria nos resultados gerais de interdisciplinaridades.

Para trabalhos futuros ou publicações, derivadas propomos expandir a atual pesquisa sobre os temas apresentados, para outras unidades escolares do município e até de seu entorno. Espera-se que o presente trabalho possa ser replicado a outras unidades escolares, não só do ensino fundamental II, mas aos demais níveis escolares, em regiões rurais e ou litorâneas e a outros públicos com realidades socioeconômicas menos favoráveis e que os resultados apresentados neste estudo indicam existir bons níveis de receptividade que pode a escola se utilizar de temas ambientais mais amplamente de forma integrativa transdisciplinar, melhorando o conhecimento e o aprendizado.

Agradecimentos

A todos da E.M.E.F Leandro Klein e a ICTS-Unesp campus Sorocaba pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ALABI, A.T., JELILI, M.O. Clarifying Likert Scale misconceptions for improved application in urban studies. Quality & Quantity (2023) 57, 1337–1350. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01415-8> Acesso em: 30 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Brasília: Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, [1996]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm. Acesso em: 20 jul. 2024.

BRASIL. Ministério da Educação e do Desporto, Secretaria de Educação Fundamental. Parâmetros Curriculares Nacionais - PCN, MEC/SEF. Brasília. 1998.

BRASIL, Ministério da Educação. Avaliações e exames. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira IDEB/INEP, 2023. Disponível em https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/avaliacao-e-exames-educacionais/saeb/resultados>, acesso em 02.05.2025.

COSTA Jr. João Florêncio et al. Um estudo sobre o uso da escala de Likert na coleta de dados qualitativos e sua correlação com as ferramentas estatísticas. Rev. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v.17, n.1, p. 360-376, PR, 2024.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; ROCHA, E. C.; SILVA JR, J.; PARANHOS, R; A., NEVES, J. A. B. e SILVA, M. B. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno Leviathan Cadernos de Pesquisa Política, n.8, p. 66-95, SP, 2014

LOPES, Andressa Freitas; NETO, Luiz Caldeira Brant de Tolentino. Comunidade de prática no ambiente escolar: questionário como instrumento de pesquisa. Rev. de Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Federal de Santa Maria UFSM, Santa Maria, RS, 2023

SAO CAETANO DO SUL. Secretaria Municipal de Educação- SME. Currículo Municipal de Educação de São Caetano do Sul. 2ª ed. Cecape. SCS, SP, 2024.

SÃO PAULO. Secretaria da Educação. Fundação para o Desenvolvimento da Educação-FDE. Portal de dados abertos. Disponível em < https://pesquisaseduc.fde.sp.gov.br/localize_escola>, acesso em 15.05.2025.

ESTUDO PRELIMINAR SOBRE A ATUAÇÃO DE BITUCAS DE CIGARRO NO DESENVOLVIMENTO DE LARVAS DE *Artemia salina*

1 Ana Laura Frescura Ceolin, 2 Carla Matos Dornelles, 3 Paula Pedrali Mello, 4 Cisnara Pires Amaral

1 Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, e-mail: laura.anafc@gmail.com; 2 Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, e-mail: carlamatosdornelles@gmail.com; 3 Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, e-mail: paulapedrallimello@gmail.com; 4 Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Santiago, e-mail: cisnara.amaral@urisantiago.br

Palavras-chave: Sustentabilidade; *Artemia salina*, bitucas de cigarro.

Resumo

As bitucas de cigarro (bts) representam um dos principais fatores de poluição ambiental em áreas urbanas e aquáticas, configurando um sério problema para os ecossistemas. Compostos por nicotina, metais pesados como cádmio e arsênio, além de outras substâncias tóxicas de alta resistência à decomposição, esses resíduos permanecem por longos períodos no solo, em rios e oceanos. Esses compostos nocivos prejudicam a fauna, a flora e comprometem a qualidade de vida da população a médio e longo prazo. Dessa forma, o objetivo desse trabalho consistiu em apresentar os estudos experimentais realizados no Laboratório de Toxicologia da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, verificando os efeitos de lixiviados de bts de cigarro nna eclosão e desenvolvimento de *Artemia salina Leach.* Os experimento foram conduzidos no Laboratório de Farmacologia e Toxicologia da URI, câmpus Santiago, onde utilizou-se a metodologia de Abessa *et al* (2019) para produzir lixiviados utilizando bitucas de cigarro inseridas em solução salina previamente produzida. A solução salina serviu de base para a eclosão de ovos e para a diluição dos compostos produzidos com as bts. Os ovos foram expostos em condições laboratoriais controladas (temperatura 30ºC, ambiente escuro, aeração e ausência de nutrição). Após o período de eclosão, as larvas foram distribuídas em tubos experimentais, sendo utilizados três tubos de ensaio para concentrações de 100%, 50%, 25%, 12,5% e 6,25% de lixiviados, além de um grupo controle contendo apenas solução salina e *A. salina*. Notou-se que a preparação de lixiviado de bitucas de cigarro exerceu efeitos expressivos sobre as larvas de *A. salina*, afetando diretamente sua eclosão, sobrevivência, mobilidade e possivelmente sua morfologia, pois observou-se ausência de larvas nos lixiviados 50% e 100%, fato não verificado nos demais. A mortalidade e a eclosão das larvas mostraram-se diretamente proporcionais à concentração do lixiviado, pois todas as triplicatas demonstraram o mesmo resultado, o que evidencia elevada toxicidade nessas condições indicando que essas concentrações são altamente prejudiciais aos organismos expostos. Ainda são necessário mais estudos sobre esse tema e publicações que favoreçam a discussão e a disseminação de conhecimentos, e o reconhecimento de que esses resíduos podem ser altamente contaminantes, inclusive para os organismos humanos.

Introdução

O descarte inadequado de bts representa um problema ambiental relevante, uma vez que esses resíduos contêm diversas substâncias químicas potencialmente tóxicas, capazes de causar efeitos nocivos a organismos vivos quando liberadas no ambiente aquático. Estudos apontam que o lixiviado de bts pode provocar efeitos citotóxicos significativos em organismos aquáticos, afetando a sobrevivência e o comportamento desses indivíduos (Abessa *et al*., 2021).

A decomposição desse produto leva aproximadamente 5 anos e, ainda são reconhecidas como a forma mais comum de lixo antrópico, descartadas inadequadamente no meio (Curtis *et al*., 2017). Esse resíduo que possui apenas 2,5 cm é capaz de lixiviar compostos químicos como acetonas, formaldeído, chumbo, cádmio e ser responsável pela alteração de ciclos, que trazem riscos emimentes a flora e a fauna (Giaccobo; Souza, 2024).

Uma única bt contém uma mistura de 7000 compostos químicos que podem contaminar cerca de 1000 L de água, liberando compostos como metais e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), compostos nitrogenados, aminas aromáticas, entre outros (Akhbarizadeh *et al*., 2021). Essas substâncias químicas são persistentes, bioacumulam em organismos vivos, influenciando a cadeia alimentar; além de induzirem efeitos mutagênicos, carcinogênicos e teratogênicos (Neira *et al*., 2017).

Certamente esses compostos químicos estão atingindo o ambiente natural, induzindo efeitos deletérios, indicando preocupação com os riscos ecológicos e à saúde, tornando-se necessário abordar e discutir o tema com o intuito de mitigar a contaminação ambiental (Castro; Ribeiro, 2023). Nesse contexto, organismos bioindicadores são amplamente utilizados para a avaliação da toxicidade ambiental, destacando-se as larvas de *A. Salina* devido à sua sensibilidade a contaminantes, facilidade de cultivo e ampla aplicação em testes ecotoxicológicos. A utilização de *A. salina* como bioindicador tem se mostrado eficiente na detecção de poluentes marinhos e na avaliação de efeitos adversos causados por diferentes compostos químicos, evidenciando sua relevância em estudos de toxicidade ambiental (Waichert; Filho; Reis, 2024).

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Comana, nº 357 salienta a importância da realização de testes de ecotoxicidade realizados através de ensaios toxicológicos que determinem o efeito deletério de agentes físicos ou químicos em diversos organismos visando avaliar o potencial de risco à saúde humana. Assim, o estudo de contaminação por bitucas envolve vários estudos, como os evidenciados através dos estudos de Lins *et al.*(2025) que realizaram pesquisa na praia de Boa Viagem no Recife, PE onde estimaram que aproximadamente 200.000 unidades de bts sejam descartadas ao longo dos 8 km de praia, somente durante o ano de 2024, revelando um panorama crítico, revelando efeitos toxicológicos diretos sob peixes, tartarugas, moluscos, aves marinhas, compreendendo mortalidade aguda, disfunções hepáticas e estresse oxidativo.

Vale ainda considerar os trabalhos de Montalvão *et al*.(2018) que avaliaram os possíveis efeitos citotóxicos sobre eritrócitos de girinos de *Physalaemus nattereri* expostos (por um período de 24h, 48h e 72h) a lixiviado de cigarros fumados em concentrações ambientais, definidas com base na concentração de nicotina encontrada em águas superficiais (1,9 µg/L-1) evidenciando que as análises revelaram que os girinos, quando comparados com o grupo controle apresentaram maior frequência de eritrócitos micronucleados (após 72h) e aumento na frequência de eritrócitos com núcleo reduzido quando expostos a 48h e 72h. Observaram ainda que o maior número de anormalidades nucleares foi quando a avaliação dos girinos tratados ocorreu após 72h de exposição.

Dessa forma, torna-se fundamental trabalhos de Educação Ambiental (EA) para trabalhar a conscientização e a criticidade das comunidades. Nesse intuito, Santos *et al*.(2019), realizaram pesquisa onde foram entrevistadas 330 pessoas, sendo que 50% dessas afirmaram realizar o descarte de bts em lixo comum e 34% afirmaram realizar o descarte no chão. Ainda evidenciaram que 224 entrevistados afirmaram a importância de trabalhos de conscientização sobre a contaminação ambiental pelo produto para que mudem seus hábitos e atitudes.

Segundo a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) as bts são o lixo mais comum no planeta, com 4,5 milhões de unidades descartadas por ano, isso seria equivalente a encontrar 1 bt de cigarro a cada 4 metros quadrados, afirmando que as áreas protegidas a contaminação consegue ser reduzida em até 10 vezes (Fapesp, 2026).

Esses dados podem ser reafirmados através de estudos de Ribeiro *et al*. (2026) que realizaram o estudo da contaminação por bts de cigarro em 55 países entre os anos de 2013 a 2024, utilizando uma meta-análise de 130 estudos revistos por pares e 2723 registros. Os estudos evidenciaram que a densidade média global foi de 0,24 bts por metro quadrado, com uma variabilidade geográfica acentuada. Salientaram que 17 países demonstraram pontos críticos, especialmente a Ásia e a América Latina.

Ainda relatam que os ambientes aquáticos, representados em sua grande maioria pelas praias, apresentaram maior contaminação, demonstrando que áreas protegidas estão menos sujeitas a contaminação por bts. Nota-se que além do efeito visual, as bts estão presentes nos mais variados ambientes, causando impactos ambientais que passam despercebidos e desconhecidos pela grande maioria da população (Ribeiro *et al*., 2026).

Assim sendo, esse trabalho tem como objetivo apresentar os estudos experimentais realizados no Laboratório de Toxicologia da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, verificando os efeitos de lixiviados de bts de cigarro no desenvolvimento de *Artemia salina Leach.*

Material e Métodos

As atividades foram realizadas no laboratório de Farmacologia e Toxicologia da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Santiago e incluíram inicialmente a coleta de bitucas de cigarro provenientes de um único indivíduo, do sexo masculino, com o objetivo de reduzir possíveis variações relacionadas a diferentes tipos de cigarro ou hábitos de consumo, além de evitar contaminação por cosméticos, bem como minimizar contaminações externas. As bitucas recebidas foram higienizadas e medidas para que todas ficassem do mesmo tamanho.

Após eram inseridas em 500 mL de solução salina artificial, preparada com 11,5 g de sal marinho e 0,35 g de bicarbonato de sódio, permanecendo em agitação contínua por um período de três dias para a obtenção do lixiviado, conforme metodologias adaptadas de Botelho (2018) e Abessa *et al*. (2021). A solução obtida foi filtrada e distribuída em tubos contendo diferentes concentrações, sendo elas 6,25%, 12,5%, 25%, 50% e 100%, completadas com solução salina artificial. Paralelamente, 80 mg de cistos de *Artemia salina* foram colocados para eclosão em 1000 mL de solução salina artificial, preparada utilizando 23 gr de sal marinho e 0,7 de bicarbonato de sódio, mantendo-se as larvas por 3 dias em aeração constante, ambiente escuro e temperatura controlada de aproximadamente 30 °C.

Após o período de eclosão, as larvas foram distribuídas em tubos experimentais, sendo utilizados três tubos de ensaio para cada concentração, além de um grupo controle contendo apenas solução salina. Cada tubo recebeu 10 mL da respectiva solução e 10 larvas de *Artemia salina,* que permaneceram em contato com o extrato por 24 horas. Ao final desse período, foi realizada a contagem do número de indivíduos mortos em cada concentração e em cada triplicata. Posteriormente, as artemias foram fixadas em solução composta por 7 mL de álcool 70% e 3 mL de formaldeído tamponado, com a finalidade de permitir análises microscópicas posteriores voltadas à avaliação morfológica.

Deve-se considerar que, ao estudarmos artigos científicos, observamos a possibilidade de alimentar as Artemias com spirulina em pó, atividade que será realizada na segunda quinzena de abril do ano de 2026. Acredita-se que a nutrição das larvas favorecerá a visualização do desenvolvimento morfológico e a possível comparação entre larvas expostas ao lixiviado e não expostas (Pereira, 2023).

Resultados e Discussão

Para as discussões iniciais, foram realizados 4 testes, realizados em dias alternados, que envolveram produção de lixiviado, eclosão e mortalidade de náuplios. Para tal, foi produzida uma tabela comparativa que levou em consideração a porcentagem do lixiviado e seus resultados. A Tabela 1 apresenta os testes com os liviados.

Porcentagem Sol. de Bitucas	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3
6,25%	Foram observadas 8 artemias	Foram observadas 7 artemias	Foram observadas 8 artemias vivas e

	vivas e 2 mortas. Não foram identificadas alterações morfológicas.	vivas e 3 mortas. Não foram identificadas alterações morfológicas.	2 mortas. Não foram identificadas alterações morfológicas.
12,5%	Foram observadas aproximadamente 5 artemias vivas, com contagem dificultada pela turbidez do material, e análise morfológica inconclusiva.	Foram observadas aproximadamente 5 artemias vivas, contagem dificultada por turbidez do material. Sem alterações morfológicas aparentes.	Foram observadas 7 artemias vivas e 3 mortas, sem alterações morfológicas aparentes.
25%	Contagem prejudicada pela turbidez do material e agregação das artemias. Os indivíduos móveis apresentaram locomoção alterada, sem alterações morfológicas aparentes.	Contagem prejudicada pela turbidez do amterial e agregação das artemias. Os indivíduos móveis apresentaram locomoção alterada, sem alterações morfológicas aparentes.	Contagem prejudicada pela turbidez do material e agregação das artemias. Observou-se deslocamento aparente dos olhos em relação à posição habitual, além de espessamento e curvatura anormal do segmento abdominal.
50%	Ausência de eclosão.	Ausência de eclosão.	Ausência de eclosão.
100%	Ausência de eclosão.	Ausência de eclosão.	Ausência de eclosão.
Solução Controle	Sem mortalidade e alterações morfológicas.	Sem mortalidade e alterações morfológicas.	Sem mortalidade e alterações morfológicas.

Tabela 1 – Testes iniciais e resultados.
Fonte: Elaborado pelas autoras.

Deve-se considerar, que para verificar o desenvolvimento dos náuplios foi levado em consideração o trabalho realizado por Correa (2022). Nota-se que a preparação de lixiviado de bitucas de cigarro exerceu efeitos expressivos sobre as larvas de *A. salina*, afetando diretamente sua eclosão, sobrevivência, mobilidade e possivelmente sua morfologia, pois observou-se ausência de larvas nos lixiviados 50% e 100%, fato não verificado nos demais. Notou-se ausência total de eclosão nesses lixiviados.

A mortalidade e a eclosão das larvas mostraram-se diretamente proporcionais à concentração do lixiviado, pois todas as triplicatas demonstraram o mesmo resultado, o que evidencia elevada toxicidade nessas condições e indica que essas concentrações são altamente prejudiciais aos organismos expostos. A alta mortalidade desses microcrustáceos em lixiviados de 50 e 100% após 24 h de exposição indica uma forte ação citotóxica, visto que dentre os bioensaios simples e rápidos para avaliar a citotoxicidade de substratos se encontram *A. salina*, microcrustáceos que apresentam alta sensibilidade a ampla série de compostos (Harada, 2009).

Os estudos com bitucas de cigarro são praticamente inexistentes. Existem estudos que avaliam a citotoxicidade de outros substratos, como é a pesquisa de Santos *et al*. (2023), que relatam que o uso desse microcrustáceo auxilia os ensaios de citotoxicidade, pois é um bioindicador por sua baixa tolerância a fatores ambientais específicos, apresentando facilidade nas respostas a pequenas variações ambientais.

Ainda percebe-se que nas concentrações inferiores, embora não tenha sido registrada mortalidade completa das larvas, foram observadas alterações significativas no comportamento locomotor. As artemias expostas apresentaram perda do padrão normal de locomoção, caracterizado por movimentos contínuos e regulares, passando a exibir movimentos reduzidos, descoordenados ou irregulares, bem como períodos de ausência parcial de deslocamento. Essas alterações na mobilidade sugerem efeitos citotóxicos subletais, que podem comprometer funções fisiológicas essenciais para a sobrevivência dos organismos. Libralato *et al.* (2016) relatam a importância da utilização *de A.salina* , pois seus ovos eclodem entre 28 a 72h, apresentam custo-benefício, disponibilidade de cistos comerciais, fácil manipulação e manutenção laboratorial.

Esse invertebrado halófilo, que pertence ao Filo dos Artrópodes, classe Crustacea, apresenta importante papel nos ecossistemas aquáticos e marinhos salinos. É utilizado para pesquisas na área da aquicultura e na detecção de toxicidade nas áreas da Ecologia, Fisiologia, Ecotoxicologia, Aquicultura e Genética (Ntungwe *et al*., 2020).

Além dos efeitos sobre a sobrevivência e a mobilidade, foram identificadas possíveis alterações morfológicas em partes do corpo das larvas expostas ao lixiviado de bitucas de cigarro. Esse fato só será comprovado a partir do momento que ocorrer a nutrição das larvas, durante a continuidade do projeto. Essas alterações podem ser consideradas relevantes, uma vez que podem estar associadas à ação de compostos tóxicos presentes no extrato. No entanto, essas modificações ainda necessitam de confirmação, sendo prevista a realização de análises morfológicas mais detalhadas em etapas futuras do estudo, a fim de melhor caracterizar os efeitos subletais da citotoxicidade observada.

Moreira (2013) relata que ensaios que utilizam *A. salina* auxiliam a realização da correlação da atividade tóxica sobre o microcrustáceo e têm sido empregada como técnica bioindicadora e biomonitora de qualidade de água. Siqueira *et al*. (1998) observam que os ensaios de citotoxicidade que envolvem esse microcrustáceo são rápidos, de baixo custo e eficientes, requerem uma pequena quantidade de amostra e não requer equipamentos especiais, demonstrando boa correlação.

Ainda deve-se considerar que esse tema é relevante, que *A. salina* desempenha papel crucial na aquicultura e na pesquisa científica ambiental e médica, na avaliação da qualidade de efluentes e na toxicidade geral de vários produtos (Santos *et al*., 2023). Salienta-se que os testes de citotoxicidade que utilizam diferentes organismos-testes se constituem como fonte de informação e conhecimento afim de correlacionar os resultados, auxiliando a comunidade acadêmica a discutir hipóteses e variáveis.

Testes de toxicidade, mostram que os possíveis contaminantes analisados possuem efeitos no ambiente aquático, afetando os processos bióticos e abióticos que não são reproduzidos no laboratório, eles são imprescindíveis para predizer possíveis efeitos tóxicos dos contaminantes no ambiente e suas alterações na cadeia alimentar (Costa *et al*., 2008). Importante observar que *A. salina* são invertebrados utilizados em vários bioensaios como os realizados por Lustosa *et al*. (2023) onde avaliaram o potencial tóxico de inseticida agrícola ciromazina utilizando o microcrustáceo *A. salina*, demonstrando que os testes realizados após 24 e 48 horas permitiu contabilizar as larvas sobreviventes, e a realização de testes para verificar a toxicidade aguda, a Concentração Letal Média (CL_{50}) e a relação dose-resposta. Notaram que o inseticida pesquisado foi considerado tóxico, e a toxicidade aguda foi maior após 48 horas de exposição, além de verificar uma relação dose-resposta, entre as concentrações e a mortalidade dos organismos expostos.

Essas atividades corroboram para monitorar os efeitos tóxicos de vários produtos, que vão desde inseticidas até bitucas de cigarro. Sendo assim, ainda são necessários testes que promovam a discussão, o questionamento e a conscienttização da população em relação a contaminantes que podem afetar a cadeia alimentar e os ciclos biogeoquímicos trazendo efeitos mutagênicos a longo prazo.

Considerações Finais

A partir dos resultados parciais obtidos, observa-se que a concentração do lixiviado de bitucas de cigarro está associada diretamente à eclosão, mobilidade e manutenção da vida desses microcrustáceos. Os dados indicam que concentrações mais elevadas estão relacionadas a efeitos mais severos sobre a sobrevivência dos organismos, enquanto concentrações menores podem provocar alterações comportamentais, especialmente na mobilidade. Essas respostas sugerem que os compostos presentes nas bitucas de cigarro interferem em processos biológicos essenciais, mesmo na ausência de mortalidade imediata, podendo afetar o funcionamento e o desenvolvimento normal dos organismos expostos. Além disso, as possíveis alterações morfológicas observadas indicam a ocorrência de efeitos subletais, ampliando a compreensão sobre o impacto biológico desse resíduo em organismos aquáticos e reforçando sua relevância ambiental, uma vez que tais alterações podem comprometer o equilíbrio dos ecossistemas. Conclui-se que os estudos são relevantes e que são prioritários mais testes para acirrar a discussão e trazer dados que fortaleçam a relação de contaminação do meio com bitucas de cigarro, demonstrando que esses resíduos podem se mostrar altamente tóxicos se deixados no meio ambiente.

Referências Bibliográficas

ABESSA, D.M.S.; *et al.* Acute Toxicity of Cigarette Butts Leachate on Nauplii of Artemia sp. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research***,* v. 4, n. 1, p. 659–670, 2021.

AKHBARIZADEH, R., DOBARADARAN, S., PARHIZGAR, G., *et al*, 2021. Potentially toxic elements leachates from cigarette butts into different types of water: A threat for aquatic environments and ecosystems? **Environ. Res**. 202, 111706. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111706

BOTELHO, R.S.S. **Testes de método de eclosão de Artêmia (Branchipus sagnalis) para alimentação de espécies nativas da Amazônia.** 2018.30 fls. Trabalho de Conclusão de Curso de Medicina Veterinária. Escola Superior Batista do Amazonas. Manaus. 2018.

CASTRO, I.B.; RIBEIRO, V.V. Bitucas de cigarro descartadas: relações entre impactos ambientais, demografia e mercado em cidades brasileiras altamente urbanizadas. São Paulo: **ACT Promoção da Saúde**, 2023. Disponível em: https://actbr.org.br/uploads/arquivos/Bitucas-de-cigarro-descartadas-relacoes-entre-impactos-ambientais%2C-demografia-e-mercado-em-cidades-brasileiras-altamente-urbanizadas%281%29.pdf .Acesso em novembro de 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Ministério da Saúde. Resolução nº 357. Brasília. DF, 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450 Acesso em março 2026.

CORREA, J.M. **Biologia e manejo das Artemias**. 2º ed. Joinville: Clube de autores, 2022.

COSTA,C.R. *et al*. A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química Nova**,v.31, n.7, p.1820-1830,2008.

CURTIS, C., NOVOTNY, T., LEE, K. *et al.* Tobacco industry responsibility for butts: a Model Tobacco Waste Act Tob. **Control**, 26 (2017), pp. 113-117, 10.1136/tobaccocontrol-2015-052737

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP). Bitucas de cigarro são o lixo mais

comum do planeta. São Paulo, 2026. Disponível em: https://agencia.fapesp.br/bitucas-de-cigarro-sao-o-lixo-mais-comum-do-planeta-com-45-trilhoes-de-unidades-descartadas-por-ano/57377 Acesso março 2026.

HARADA, T.N. Correlação entre os ensaios de citotoxicidade em Artemia salina Leach e atividade antineoplásica sobre linhagens de células tumorais para algumas classes de produtos naturais. 2009. 92 fls. **Dissertação Programa de Pós-Graduação em Saúde e Desenvolvimento na Região Centro-Oeste**, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2009.

LIBRALATO, G. *et al.* A review of toxicity testing protocols and endpoints with *Artemia* spp. **Ecological Indicators,** v.69, p.35-49, 2016.

LINS, E.A.M. *et al.* **Resíduos de cigarros em praias urbanas: estimativas e impactos na praia de Boa Viagem**. Recife, PE. *In:* Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Recife – PE, 2025.

LUSTOSA, E.A. *et al*. Toxicidade de inseticida agrícola em bioensaio com *Artemia salina.* **Scientia Plena**, v.19, n.5, p.1-8, 2023.

MONTALVÃO, M.F. *et al*. **Exposição de Physalaemus nattereri a lixiviado de cigarros em concentrações ambientais e relevantes.** Congresso Brasileiro de Ecotoxicologia. *In*: Anais XV Congresso Brasileiro de Ecotoxicologia. Aracaju, SE, Brasil, p.733-735,2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Aline-Bernegossi/publication/331357554_Sublethal_effects_of_caffeine_in_Daphnia_magna_life_cycle_using_a_new-term_endpoint/links/5f567dc3a6fdcc9879d62356/Sublethal-effects-of-caffeine-in-Daphnia-magna-life-cycle-using-a-new-term-endpoint.pdf#page=735 Acesso em março 2026.

MOREIRA, L.A.O. Avaliação da atividade tóxica em *Artemia salina Leach* de extratos de duas espécies da família Melastomataceae. 2013. 51 fls. **Monografia Curso de Licenciatura em Química**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Góias, Anápolis, 2013.

NEIRA, C., COSSABOON, J., MENDOZA, G., *et al*, 2017. Occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of San Diego Bay marinas. **Marine Pollution Bulletin**. 114, 466–479.

NTUNGWE, E. *et al*. Artemia species: an important tool to screen general toxicity samples. **Curr Pharm Des**, v.26, n.24, p. 2892-2908, 2020.

PEREIRA, R. G**.** Avaliação nutricional de Artemia sp. Alimentada com diferentes espécies de microalgas**.** 2023. 41fls. **Monografia apresentada ao Curso de Bacharel em Engenharia de Pesca**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

RIBEIRO, V.V. *et al.* Global cigarette butt contamination: a review. **Environmental Chemistry Letters,** p.1-22, 2026. https://doi.org/10.1007/s10311-026-01897. Acesso em nov 2025.

SANTOS, B.F.S. *et al*. Toxicidade de produtos naturais e a Artemia salina.**Ciências Agrárias**, v.3, p.9-27, 2023.

SANTOS, R.C. dos *et al*. **Estudo sobre gerenciamento de resíduos de bitucas de cigarro**. *In:* 2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu- Paraná, 2019.

SANTOS, H.B.C. Educação Ambiental: Desafios e Perspectivas no Processo de Ensino Aprendizagem. **Educação & Realização: conectando teoria e prática,** vol. 4, p. 356.

SIQUEIRA, J.M. *et al*. Estudo Fitoquímico de Unonopsis lindmanii - Annonaceae, biomonitorado pelo ensaio de toxicidade sobre a Atemia salina Leach. **Revista Química Nova**, v.21, n,5, p.557-559, 1998.

WAICHERT, R.H.; FILHO, J.R.; REIS, C. Uso da Artemia (*Artemia* sp.) como bioindicardor de poluentes marinhos. **Revista Ciência em Foco e Saúde**, v. 1, n. 1, p. 141–153, 2024.

DESMITIFICANDO O ODOR NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM: SENSIBILIZAÇÃO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

1 Camila Tatiane Santana Jek; 2 Letycia Rolim de Lima; 3 Yasmim Rolim de Lima; 4 Marianny Ester Lima da Silva

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: camila.jek@sou.ufmt.br; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: Letycia.lima@sou.ufmt.br; 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: yasmim.lima4@sou.ufmt.br; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: marianny.silva@sou.ufmt.br

Palavras-chave: Compostagem; Conscientização; Resíduo orgânico.

Resumo

A compostagem constitui uma alternativa viável e acessível para a gestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e a sua destinação adequada, além disso, trata-se de uma técnica que traz benefícios socioambientais e econômicos, através da capacidade de geração de fertilizante natural e adubo. Essa transformação controlada de matéria orgânica em adubo natural possui muitas vantagens em vários aspectos relacionados a gestão sustentável de resíduos, a título de exemplo, temos a diminuição das emissões de gases provenientes da decomposição da matéria orgânica realizada pelos microrganismo, como bactérias aeróbicas, além de outras reações químicas e processos físicos para a efetivação da compostagem. Assim, o presente estudo objetiva desmistificar a concepção negativa que existe em relação a geração de odores fétidos no processo, visando a sensibilidade e valorização dessa prática sustentável. Além disso, a aplicação dessa técnica contribui, significativamente, para a redução do volume de resíduos que são enviados a aterros sanitários, mitigando diversos impactos no meio ambiente, como a poluição atmosférica, hídrica e dos solos, além de prevenir a proliferação de vetores de doenças. Diante disso, a conscientização e o domínio do manejo técnico, contribui para a disseminação da compostagem e evidencia que que eventuais odores resultam de falhas operacionais e não de forma intrínseca do processo natural. Desse modo, a educação ambiental apresenta-se como uma forma de quebrar barreiras culturais e contribui para a gestão eficiente e valorização de resíduos orgânicos

Introdução

No Brasil, a gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) apresenta um grande desafio devido ao seu crescente volume de geração. Segundo o Panorama de Resíduos sólidos do Brasil 2025, a produção de Resíduos sólidos chegou a mais de 80 milhões de toneladas por ano e que segundo o EMBRAPA, que caracteriza tecnicamente, confirma que 50% do Resíduos Sólidos Urbano (RSU) são de resíduos orgânicos (restos de alimentos e podas) que tem grande potencial para produção de energia a partir do material orgânico, dentre eles a produção de biofertilizantes e adubo, contudo, grande parte desse material ainda são enviados aos aterros sanitários e lixões, agravando a poluição dos solos, aquíferos e atmosfera, bem como impactos também na sociedade, pois ocasiona a atração de animais vetores e, consequentemente, na disseminação de doenças. O termo composto orgânico pode ser aplicado ao produto compostado, estabilizado e higienizado, benéfico à produção vegetal e solo (GUIDONI et al., 2013). É diante disso, que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece a compostagem como uma das principais estratégias para a redução do envio de resíduos destinados aos aterros sanitários, portanto apesar de ser uma técnica milenar e de baixo custo, ainda enfrenta significantes barreiras socioculturais.

Assim, a compostagem contribui para a redução dos resíduos sólidos destinados a aterros sanitários, diminuindo impactos ambientais e promovendo uma gestão mais sustentável dos resíduos. (XAVIER, 2023). Além disso, esse processo de transformação controlada de resíduos atrai muito proveito, no que diz respeito às questões ambientais e as necessidades de reaproveitamento de resíduos, contribuindo para a gestão sustentável dos resíduos. Nesse sentido, a compostagem promove benefícios ambientais e econômicos, como a redução da poluição, reaproveitamento de resíduos e aumento da produtividade do solo. (SILVÉRIO, 2025). Ademais, essa técnica ambientalmente sustentável pode ser utilizada como ferramenta de educação ambiental, promovendo conscientização e práticas sustentáveis na sociedade. (BRINCK, 2020.) O composto resultante possui inúmeros benefícios: melhora o crescimento de vegetais, exerce bi controle em diferentes fitopatógenos do solo e altera positivamente a estrutura dos solos, melhorando a retenção de água, a estruturação das partículas e a aeração (ONWOSI et al., 2017).

Uma das barreiras é sensorial e está relacionada ao odor fétido produzido, que muitas vezes é fruto de experiências com o descarte inadequado, e que também está relacionado à atração de vetores. Porém, isso é resultado de um sistema operacional inadequado da composteira, pois o odor não é necessariamente um produto final desse processo, A disposição inadequada de resíduos orgânicos pode resultar em decomposição descontrolada, com geração de odores e atração de vetores. (AZEVEDO, 2020). Mas sim um indicador de falha no manejo e operação que geram processos anaeróbios. A ausência de aeração adequada favorece a formação de condições anaeróbias, resultando na geração de odores desagradáveis e redução da eficiência do processo. (INÁCIO, 2009). Além disso, vale ressaltar que outro obstáculo que pode causar odores desagradáveis durante o manuseio dos resíduos e dos compostos orgânicos são os teores elevados de umidade comprometem a porosidade do material, dificultando a circulação de ar e favorecendo processos anaeróbios. (KIEHL, 2004).

Analisando Bioquimicamente, a compostagem é um processo aeróbio que estabiliza a matéria orgânica, e que, quando operada de maneira adequada e com o devido rigor ao seguir os parâmetros técnicos, como o controle da relação Carbono/Nitrogênio (C/N) e com a oxigenação necessária através da cobertura e envolvimento correto do composto, a emissão de gases dos gases de

mau cheiro são neutralizadas (Reduz-se a emissão de enxofre, que é o responsável pelo odor desagradável). O equilíbrio adequado entre carbono e nitrogênio é essencial para o crescimento dos microrganismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica. (EMBRAPA, 2011). Os principais grupos de microrganismos que participam da compostagem são bactérias e

Fungos (BIDONE; POVINELLI, 1999). Materiais com alta relação carbono/nitrogênio tendem a degradar-se mais lentamente, enquanto aqueles com baixa relação podem provocar perdas de nitrogênio e geração de odores. Ademais, a falta de oxigênio pode levar à formação de condições anaeróbias, resultando na produção de odores desagradáveis e na redução da eficiência do processo de compostagem. (DIAZ; SAVAGE; EGGERTH; GOLUEKE, 2007).

Outrossim, a disposição inadequada, isto é, de forma descontrolada de resíduos orgânicos pode resultar em decomposição desequilibrada, com geração de odores e atração de vetores. (MONTEIRO et al., 2001). Desse modo o único odor que apresenta em um processo sem falhas é o aroma de terra úmida, evidenciando assim, que o subproduto dessa técnica não é o odor fétido, mas se trata de um indicador de falha operacional. “Um composto bem estabilizado apresenta odor semelhante ao de terra úmida, indicando a maturidade do material. (KIEHL, 2004). O cheiro de solo fresco é um indicativo de que o processo de compostagem ocorreu de forma adequada, sem condições anaeróbias. (EMBRAPA, 2011).

Sobre esse ponto de vista, que busca desmistificar a ideia de que a compostagem apresenta odor fétido, objetiva-se a sensibilização quanto a essa prática sem que haja mitos, que limitam a educação ambiental e a aplicação dessa técnica sustentável nos ambientes. A percepção de que a compostagem gera mau cheiro e atrai vetores é um dos principais fatores que dificultam sua adoção pela população. (BRASIL, 2017). Através do presente estudo, baseado em relatos de experiência e fundamentação teórica, apresenta a compostagem como um processo sustentável e socialmente aceito quando se fala de gestão e valorização de resíduos orgânicos. A educação ambiental é fundamental para desmistificar a compostagem e promover a mudança de comportamento em relação aos resíduos orgânicos. (LOUREIRO, 2012) Portanto a sua aplicação não deve ser limitada em razão de concepções equivocadas acerca de odores, uma vez que estes são evitáveis a partir do manejo correto. A sensibilização da sociedade quanto à gestão adequada dos resíduos sólidos é essencial para ampliar práticas sustentáveis como a compostagem.” (JACOBI, 2003).

Material e Métodos

A metodologia se fundamentou em um levantamento bibliográfico de caráter exploratório, que analisou estudos de caso e parâmetros técnicos da compostagem anaeróbica para desmistificar a ideia de que a compostagem tem um odor fétido quando bem operada. É um método que necessita ser bem operado para evitar problemas como a geração de odores e a proliferação de vetores de doenças. (BRASIL, 2017). O referencial foi baseado em consulta às bases de dados acadêmicos e governamentais, em plataformas científicas como o SciELO e em repositórios técnicos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), além de acessar a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Foi analisada a comparação realizada entre compostagem aeróbia (decomposição na presença de oxigênio) e compostagem anaeróbia (decomposição na ausência de oxigênio) e avaliou-se como a ausência de oxigênio e do revolvimento do material resulta na produção de gases como o Metano (CH4) e o gás Sulfídrico (H2S), os mesmos que causam os maus odores. Processos anaeróbios são mais lentos e podem gerar compostos como metano e sulfeto de hidrogênio, frequentemente associados a odores desagradáveis. (DIAZ; SAVAGE; EGGERTH; GOLUEKE, 2007)

Ademais, foi analisado os parâmetros e fatores que influenciam na degradação aeróbia, são eles a relação Carbono/Nitrogênio (C/N), devido controle de umidade e temperatura. Uma relação C/N muito elevada limita a disponibilidade de nitrogênio para os microrganismos, retardando o processo de biodegradação. (TCHOBANOGLOUS; THEISEN; VIGIL, 1993).

E baseou-se em alguns estudos de caso e relatos de experiências que foram utilizados para fundamentar e desmitificar o mau odor que é gerado, justamente pela falha no manejo e não pelo processo que ocorre em si. Quando corretamente conduzida, a compostagem apresenta baixos níveis de emissão de odores, aumentando sua aceitação social. (FERREIRA, 2023).

Resultados e Discussões

A comparação entre Aerobiose e Anaerobiose, baseado na revisão bibliográfica, demonstrou que a questão do mal cheiro está associada à transição do processo aeróbico para o anaeróbio.

A decomposição na presença de Oxigênio (aerobiose) é realizada pela ação de microrganismos que liberam calor, gás carbônico (CO2) e vapor de água e conforme Pereira Neto (2007), o processo exala apenas um aroma de terra úmida ou Húmus (matéria orgânica decomposta). Diferentemente da decomposição na ausência de Oxigênio (Anaerobiose), que ocorre com o excesso de umidade e a falta de revolvimento (oxigenação), resultando em gases fétidos, são eles o gás Sulfídrico (H2S), que tem o odor de ovo podre, e a amônia (NH3), que tem um odor acre, parecido com o cheiro de urina.

Na literatura técnica (KIEHL, 1998), destaca-se o equilíbrio entre materiais ricos em Carbono e ricos em Nitrogênio, que determina a estabilidade do sistema. O Nitrogênio é identificado como materiais “marrons” (restos de alimentos úmidos) e o Carbono como “verdes” (folhas secas e serragem). O excesso de Nitrogênio sem a devida cobertura de Carbono acelera o processo de decomposição e compacta o material, evitando a oxigenação e assim causando odores. Portanto, manter o equilíbrio dessa relação (Carbono/Nitrogênio), geralmente entre 25:1 e 30:1 é fundamental para que neutralize a emissão de gases odoríferos.

Diante dessa discussão, é notável que existe uma barreira para a adoção da compostagem que é cultural e sensorial. É um processo interessante do ponto de vista ambiental, pois possibilita tratar os resíduos orgânicos na própria origem, utilizando técnicas e equipamentos simples, operados pelo próprio gerador (LEITE, 2011) E, mesmo sendo uma prática acessível e de baixo custo, o desconhecimento gera, ainda, um certo medo de atrair vetores e gerar odores, Apesar ser poder ser operada pelo próprio

gerador, a compostagem demanda dedicação e conhecimentos sobre o processo, para a efetiva satisfação do usuário e continuidade do seu uso, bem como o seu sucesso (SILVA et al., 2013). Sendo assim, a educação ambiental é uma ferramenta indispensável para auxiliar nesse processo de conscientização e de promoção de conhecimento, para que possibilite a aplicação dessa prática sustentável de gestão de resíduos sólidos.

Para auxílio e ilustração dessa observação acerca das práticas corretas e incorretas na compostagem, apresenta-se a comparação (Tabela 1).

Tabela 1: Comparação entre o Manejo adequado e inadequado

Parâmetro	**Manejo Adequado (Aeróbio)**	**Manejo Inadequado (Anaeróbio)**
Oxigenação	Revolvimento periódico ou cobertura com folhas secas e outros	Compactação do material, ausência de oxigênio
Relação C/N	Equilíbrio entre Carbono e Nitrogênio	Excesso de Nitrogênio
Vetores	Não atrai, devido a cobertura	Atrai larvas e moscas
Odor	Odor agradável de terra úmida	Odor desagradável (ovo podre e amônia)

Fonte: autoria própria (2026).

Em suma, conforme a Tabela 1, é possível notar que o sucesso no processo de compostagem e para que se evite maus odores e vetores está ligado ao controle rigoroso de parâmetros técnicos e demonstra que o manejo baseado na oxigenação e relação C/N é indispensável para a mitigação dos problemas de odores e vetores, garantindo a eficiência e viabilidade do sistema. A relação C/N influenciará na qualidade do composto. Se for muito alta, o processo poderá não ocorrer. Por outro lado, se for muito baixa, haverá perda de N na forma de amônia, dificultando o processo e resultando em odores e vetores (DA SILVA, 2007). A relação C/N depende da dosagem dos materiais adicionados nas composteiras. Geralmente, resíduos palhosos, como vegetais secos, são fontes de C, enquanto excrementos e legumes e frutas frescas, ricos em N. Materiais com alta relação C/N, a base de madeira,

Conferem estrutura aos volumes de resíduos e são comumente utilizados. (DAZZI, 2018).

Conclusão

O estudo realizado permite concluir que a compostagem é uma ferramenta indispensável para gerir os resíduos sólidos, principalmente o orgânico e comprovou que a concepção de odres que existe não possui comprovações quando bem operada adequadamente, sobre condições aeróbias. Demonstrou que o mau cheiro gerado é resultado de um manejo inadequado e um indicativo de falha operacional da composteira, pois quando há a oxigenação adequada e a cobertura com matéria seca, não gera gases e nem atraem vetores, resultando em um adubo de boa qualidade. Portanto, superar essa barreira é fundamental para se cumprir a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Recomenda-se que haja programas de educação ambiental que auxiliem a prática adequada do manejo técnico, de modo a transformar a concepção da sociedade quanto ao resíduo orgânico: de um resíduo inútil e produtor de odores para um recurso inodoro e que seja valorizado.

O estudo realizado permite concluir que a compostagem é uma ferramenta indispensável para a gestão eficiente dos resíduos sólidos orgânicos, sendo essencial para o cumprimento das diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). A aplicação correta desta técnica mitiga impactos ambientais severos, como a poluição atmosférica, hídrica e dos solos, ao reduzir significativamente o volume de materiais que representam 50% dos resíduos urbanos e que ainda são encaminhados incorretamente a aterros e lixões. Para assegurar a viabilidade do sistema e a produção de um adubo de boa qualidade, comprovou-se que é fundamental o controle rigoroso dos parâmetros técnicos, especialmente a manutenção da relação Carbono/Nitrogênio entre 25:1 e 30:1 e a garantia de oxigenação por meio do revolvimento periódico, fatores que neutralizam a emissão de gases.

Ademais, a superação das barreiras culturais e sensoriais é determinante para a aceitação social desta prática, visto que a concepção de que a compostagem gera odores fétidos e atrai vetores decorre exclusivamente de falhas operacionais e não de uma característica intrínseca do processo natural. A decomposição anaeróbia, causada pelo excesso de umidade ou falta de

oxigenação, é a responsável pela liberação de gases como o sulfídrico e a amônia, que geram o desconforto sensorial. Nesse sentido, recomenda-se a implementação de programas de educação ambiental que auxiliem na prática do manejo técnico adequado, transformando a percepção da sociedade quanto ao resíduo orgânico: de um material inútil e incômodo para um recurso inodoro e valorizado para a sustentabilidade.

Agradecimentos

Agradeço à Deus pelo discernimento durante a pesquisa, à Professora MsC. Ana Rubia de Carvalho, nosso orientador, pela paciência, pelo incentivo na escrita deste trabalho, abordando um assunto tão relevante no meio acadêmico, ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), que busca formar profissionais mais conscientes e comprometidos com o desenvolvimento de pesquisas, e aos meus colegas, pela colaboração e apoio mútuo para o desenvolvimento deste estudo.

Referências Bibliográficas

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025/2026. São Paulo: ABREMA, 2026. Disponível em: abrema.org.br. Acesso em: 26 mar. 2026.

AZEVEDO, Noatan Santos et al. Compostagem: resgatando os resíduos orgânicos. Cadernos de Agroecologia, 2020.

BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. São Carlos, EESC/USP, 1999, 120p.
BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: manual de orientação. Brasília, DF: MMA, 2017.

BRINCK, Rosiani Ramos Lopes. Compostagem: ferramenta sustentável de educação ambiental e redução de resíduos. *Cadernos de Agroecologia*, 2020.

DIAZ, L. F.; SAVAGE, G. M.; EGGERTH, L. L.; GOLUEKE, C. G. *Composting and recycling municipal solid waste*. Boca Raton: CRC Press, 2007.

DA SILVA, L.N. Processo de compostagem com diferentes porcentagens de resíduos sólidos agroindustriais. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná.

DAZZI, Juliana Glicerio; BRINGHENTI, Jacqueline Rogéria; TEIXEIRA, Roberta Arlêu. Compostagem: fatores que a influenciam e a importância do processo em pequena escala para gestão de resíduos orgânicos nos centros urbanos. Engemay, [S. l.], n. 2359-1048, dez. 2018

EMBRAPA. *Compostagem: fundamentos e práticas*. Brasília, DF: Embrapa, 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**.** Tecnologias de compostagem e biodigestão para resíduos orgânicos urbanos. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br. Acesso em: 26 mar. 2026.

FERREIRA, Ítalo Cintra; SILVA, Joelmir Marques da**.** Técnicas para compostagem doméstica de resíduos orgânicos: uma revisão de literatura. Scientific Journal ANAP, 2023**.**

GUIDONI, L.L.C. et al. Compostagem domiciliar: implantação e avaliação do processo. Tecno-lógica, Santa Cruz do Sul, v.17, n.1, p.44-51, jan./jun.2013.

INÁCIO, C. de T.; MILLER, P. R. M. Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

JACOBI, P. R. *Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade*. Cadernos de Pesquisa, São Paulo, n. 118, p. 189–205, 2003.

KIEHL, Edmar José. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto. Piracicaba: Edição do Autor, 1998.

KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto. Piracicaba: E. J. Kiehl, 2004.

LOUREIRO, C. F. B. *Educação ambiental e movimentos sociais*. São Paulo: Cortez, 2012.

MONTEIRO, José Henrique Penido et al. *Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

ONWOSI, C.O.; IGBOKWE, V.C.; ODIMBA, J.N.; IFEANYICHUKWU, E.E.; MARY, O.; NWANKWOALA, I.N.; LEWIS, I.E. Composting tecnology in waste stabilization: On the methods challenges and future prospects. Journal of Environmental Management, Espanha, v.190, p.140-157, 2017.

PEREIRA NETO, João Tinôco. Manual de compostagem: processo de baixo custo. Belo Horizonte: UNICEF, 2007. Disponível em: www.unicef.org. Acesso em: 27 mar. 2026.

LEITE, D. F. M. Avaliação do uso e operação de composteira em pequena escala que utiliza vermicompostagem. 2011. Graduação (Faculdade de Saúde Pública) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVÉRIO, Mateus Brito et al. Análise bibliográfica sobre os principais elementos que influenciam o processo de compostagem. *Editora Impacto Científico*, 2025.

SILVA, P.R.D. et al. Processo de estabilização de resíduos orgânicos. Vermicompostagem versus compostagem. Química Nova, São Paulo, v.36, n.5, p.640-645, 2013.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill, 1993.

XAVIER, Talita Cristina Soares. *Compostagem: definição e importância ambiental*. 2023. Trabalho de Graduação (Curso Superior em Gestão Ambiental) – Fatec Nilo de Stéfani, Jaboticabal, 2023.

CONTRAMÃO DA EDUCAÇÃO: A FUNBOSQUE DO RECONHECIMENTO COMO REFERÊNCIA NA EDUCAÇÃO AMBIENTAL E PATRIMONIAL NA AMÉRICA LATINA E O RISCO DA EXTINÇÃO

1 Rita Denize de Oliveira, 2 Agnaldo Aires Rabelo

1 Pós-Graduanda em Educação no Campo da Universidade do Estado de Mato Grosso-UNEMAT e docente da Universidade Federal do Pará-UFPA, e-mail:ritadenize@ufpa.br; 2 Escola Bosque Professor Eidorfe Moreira, e-mail: agnaldoaires@hotmail.com

Palavras-chave: Caratateua; Fundação; Movimentos Sociais.

Resumo

A Fundação Escola Bosque Professor Eidorfe Moreira-Funbosque foi criada a partir da Lei nº 7.747 de 2 de janeiro de 1995 na Gestão do Prefeito Hélio Gueiros com forte apelo e pressão dos movimentos sociais, como o Conselho de Representantes da Ilha de Caratateua-Consilhas e lideranças sociais, um dos precursores o então sociólogo Mariano Klautau como idealizador e representativo na educação ambiental, conferindo-lhe o status na América Latina. O objetivo da pesquisa é demonstrar por meio de uma reflexão histórica indicadores que permitiram elevar a Fundação Escola Bosque ao status de patrimônio material e imaterial pela contribuição na educação com valorização dos territórios amazônicos e avaliar o processo agressivo de extinção em 2025. A metodologia constou de pesquisa bibliográfica e documental, trabalho de campo e laboratório com confecção de mapas usando software QGIS 3.14. Os dados iniciais da pesquisa iniciaram-se em 2024, dentro do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência–PIBID da Universidade Federal do Pará-UFPA em parceria com a sede em Caratateua e unidades pedagógicas em outras ilhas como Cotijuba, Paquetá e Jutuba, de Belém-PA. A análise bibliográfica e documental mostrou a relevância dos movimentos sociais nos dois contextos de criação e extinção por meio do Consilhas e Funbosque Fica, as metodologias foram decisivas para os princípios pedagógicos e operacionais da Fundação valorizando a educação ribeirinha em que o território, o patrimônio natural e a cultura são as principais ferramentas educacionais, entretanto, a extinção da fundação trouxe impactos na autonomia administrativa e financeira com impactos diretos à comunidade das outras ilhas e faz parte de um contexto de fechamento das escolas do campo e tendência da educação a distância com a Lei 10.820/2024 que previa substituição do ensino indígena presencial pela modalidade a distância revogada a partir de grande mobilização social e desvalorização da carreira de professores.

Introdução

A pesquisa iniciou em 2024 dentro o Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência–PIBID na Universidade Federal do Pará, anteriormente a extinção, tendo como escola polo a Fundação Escola Bosque Professor Eidorfe Moreira, sediada em Caratateua e criada oficialmente pela Lei nº 7.747 de 2 de janeiro de 1995 na Gestão do Prefeito Hélio Gueirros com forte apelo e pressão dos movimentos sociais e influenciadores de relevância acadêmica, suas construções na educação ambiental lhe conferiu status na América Latina.

De acordo com Silva, Tapajós e Clarindo (2024. p. 11), a Funbosque funcionou por quase três décadas sem fins lucrativos e regida por estatuto próprio. A Escola Bosque, como é conhecida localmente, constituiu-se como uma fundação, com personalidade jurídica de direito público, autonomia administrativa, financeira e patrimonial. Sua institucionalização objetivou na construção de um centro de referência em Educação Ambiental, integrando a formação desde a educação básica, atuando no âmbito da educação infantil, ensino fundamental e médio. A fundação, hoje escola, atende alunos/as nas modalidades de ensino: Educação de Jovens e Adultos-EJA, Educação do Campo e Educação Profissional e Tecnológica.

Neste sentido, o presente artigo tem por objetivo apresentar as experiências exitosas da antiga fundação tendo por base um levantamento bibliográfico e documental e trabalho de campo por base em experiências contemporâneas desenvolvidas e acompanhadas ao longo do PIBID. Neste trabalho, priorizou-se uma abordagem patrimonial na discussão da identidade de populações tradicionais que vivem em ilhas atendidas pela Funbosque, assinadas pela religiosidade e elementos culturais, da relação com a natureza rios e florestas tão bem exemplificados por meio da valorização da memória e patrimônio que garantiria a elevação da fundação ao *status* de patrimônio material e imaterial pela contribuição na educação amazônida. Por outro lado, na contramão da educação tradicional, é marcada pela austeridade fiscal do estado (justica-se a extinção da instituição como economia dos gastos públicos), e com tentativas de burlar a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Básica-LDB, que prevê o a implementação de uma educação indígena pública, de qualidade e presencial, além de conjunto de reformas conhecido de "pacote de maldades" por meio da Lei nº 10.266/26 que retira conquistas trabalhistas históricas como Plano de Cargos e Carreiras dos Professores-PCCR com forte resistência sindical.

Neste sentido, são apresentados algumas produções nos últimos anos antes da extinção da Fundação Escola Bosque, como a colaboração no Projeto Roteiros Geo-Turísticos de Icoaraci e da Ilha de Caratateua, o papel da instituição no Ecomuseu da Amazônia, tanto com acervo material com as peças cerâmicas e até mesmo na valorização de profissões eminentemente

amazônidas, como os *ceramistas* no bairro do Paracuri, no distrito de Icoaraci, e na elaboração de roteiros de memória na ilha de Cotijuba, projetos que valorizam o manejo agroecológico das terras por meio dos quintais agroecológicos ou ecopoéticos e hortas comunitárias.

Materiais e Métodos

A sede-administrativa da Fundação Escola Bosque estava localizada na Ilha de Caratateua (Figura 1), sendo integrada com outras unidades na zona rural do município de Belém, como a Escola da Pesca, em Caratateua, e outras unidades pedagógicas nas ilhas de Cotijuba, Paquetá e Jutuba. A ilha de Caratateua era conhecida nas cartas Náuticas de Belém, como ilha Barreira, porém, popularmente é conhecida como ilha de Outeiro, localizada a Nordeste de Belém, constituindo-se em um dos seus distritos.A ilha é banhada pela Baía de Santo Antônio, uma das reentrâncias da Baía de Guajará e contornada pelo Rio Maguari conhecido como Furo Maguari localmente (Furtado, 2021; p. 467).



Figura 01: Mapa de Localização da Escola Bosque Professor Eidorfe Moreira na Ilha de Cratateua, Pará. Fonte: Os autores (2026)

Dos procedimentos metodologicos estrutura-se em três pilares: a) análise bibliografica e documental; b) trabalho de campo com coleta de relatos e ; c) etapa de laboratório que constou do uso do software Q gis 3.14 para elaboração dos mapas. O modelo teorico adequou-se a teoria da complexidade.

Resultados e discussões

Funbosque e a Identidade de uma Escola Ribeirinha

Os principais resultados apresentados pós-análise documental e trabalhos de campo na Fundação Escola Bosque, tornando-se referência em educação ambiental e patrimonial na porção insular na Amazônia. É perceptível a valorização de uma identidade ribeirinha ou dos povos tradicionais instalados na região. Assim, a Fundação Escola Bosque transforomou-se como uma referência na América latina. As especificidades da construção da fundação, desde o início até o dia de sua extinção, foram marcadas pelo intenso ativismo político e mobilização dos movimentos sociais, e em 1993 com a participação do *Consilha* (o Conselho de representantes da Ilha de Caratateua) (Silva, 2007, p. 118) e, atualmente, a partir de 2025, com a extinção da Fundação com o movimento *Funbosque Fica.*

A gênese da Fundação Escola Bosque foi influenciada por eventos em escola global, nacional e local. Em escala Global a ECO- 92, nacionalmente e localmente uma preocupação dos movimentos com o impacto da ocupação desordenada das terras na porção insular intensificada após a construção da ponte Enéas Pinheiro, em 1986 que acelerou a ocupação das terras na ilha de Caratateua, que até então o único acesso ao continente ocorria por via fluvial. A participação do Consilhas, liderada pelo professor Mariano Klautau, junto a arquiteta Dula Maria Bento de Lima, idealizaram a Fundação Escola Bosque, em parceria com a Secretaria Municipal de Educação de Belém-SEMEC, na gestão do Prefeito Hélio Gueiros, permitindo a criação de uma escola voltada à conservação da natureza.

O tratamento da identidade na Fundação Escola Bosque uma multiplicidade, como a estrutura física, o desenho político e pedagógico da fundação. Em um quadro de síntese, utilizando um informativo da Prefeitura Municipal de Belém-PMB celebrou os 27 (vinte e sete) anos de existência da Funbosque , e no material disponível digitalmente, ressaltava-se os movimentos socais, em especial o Conselho de Representantes da Ilha de Caratateua, ou Consilhas. Em 2023, discretamente, o informativo demonstrava toda a potencialidade da pesquisa, ensino e extensão da Funbosque conforme, o Quadro 01. A Fundação Escola Bosque apresentava o amadurecimento de um projeto de educação que possui um potencial de publicação de livros (Figura 2), participação em eventos importantes como Reunião da Sociedade Brasileira do Progresso para a Ciência-SBPC, sediada na Universidade Federal do Pará, projetos que valorizavam a Etnobotânica, Meliponário e rodas de conversas que fortalecem a agroecologia com temáticas como fertilização e aeração do solo amazônico.

O Quadro 1 de síntese demonstra relação da educação formal por meio da atuação da Funbosque com história de vida dos ilheús, suas memorias, identidades e patrimônios conceitos que agregam a educação ambiental, pilar da Funbosque. A educação Patrimonial é uma das ferramentas disponíveis na escola, por meio de projetos interdisciplinares compromissados com os patrimônios culturais da localidade e dos territórios. Educar o olhar e sensibilizar os educandos na observação dos elementos sociais e culturais que formam a comunidade, e deve ser construída de modo que favoreça a preservação, a crítica e a construção de outras narrativas e relações com aqueles objetos, monumentos e manifestações sociais (Damasceno, 2023).

A obra de Paulo Freire, *Extensão ou Comunicação* ([1969] 1983), foi fundamental na Funbosque permitindo-se o desenvolvimento de uma metodologia dialógica vivenciando comunicação efetiva com povos tradicionais e comunidades urbanas, sem invadir, impor, manipular ou organizar empenhando-se na transformação constante da realidade. A partir da perspectiva freiriana, o diálogo é o encontro amoroso dos homens que, mediatizados pelo mundo, o "pronunciam", isto é, o transformam, e, transformando-o, o humanizam para a humanização de todos. O legado da Funbosque as populações tradicionais é que elas nunca se sentem invadidas, ou consideradas como tabuas rasas, que se tornam depósitos de conteúdos e práticas desconexas de suas realidades, mas sentem-se valorizadas e respeitadas. A figura abaixo observa-se duas experiências a construção do roteiro geoturistico do Distrito de Icoaraci contruido a partir da pesquisa bibliográfica, mas também por meio dos relatos em pesquisa de campo com moradores e Projeto Cartografia Social da Amazônia em que as representações cartográficas são desenhadas pelos povos tradicionais (Figura 3).

Unidade	**Ações da Funbosque nos anos 2021, 2023 e 2024.**
Ilha de Caratateua (Outeiro): Escola Bosque (Sede);	• Apresentação do espetáculo EKOS: A origem da Vida; • Lançamento de livro "Memória Patrimonial da Ilha de Caratateua 13 anos de atuação do Ecomuseu da Amazônia, na ilha de Caratateua (valorização cultura, memoria, patrimônio). • Os alunos da turma Bem-Te-Vi (Ciclo I, 3°ano) visitaram o Planetário do Pará; • Alunos da Funbosque recebem bolsa de iniciação a pesquisa do CNPQ, parceria com projeto Cultura Digital e Meio Ambiente, desenvolvido pelo Núcleo de Tecnologia Inovação e Educação Digital (Nutec) • Plantio de canteiro medicinal na trilha da escola; • Roteiro de memória realizado pela prefeitura de Belém encanta visitantes na ilha de Caratateua; • No aniversário de 130 anos de Outeiro, a Prefeitura de Belém, por meio da Fundação Escola Bosque (Funbosque), lançou o projeto Rua Ecológica; • A oficina de bordado em chita trouxe um colorido a mais para a trilha da Fundação Escola Bosque (Funbosque); • O 1° encontro plantaformas: ancestralidade, clima e participação social, foi realizado na fundação escola bosque (funbosque), na ilha de Caratateua. • A Funbosque em parceria com a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (Emater) e a Associação dos micros produtores de hortifrutigranjeiros e Pisicultura de Outeiro (AMP), realizaram um mutirão de limpeza no sítio da dona Maria José, no Curupere, • A Ecofeira Cultural da Funbosque realizada no dia 2 de junho de 2023, teve a participação de produtores rurais, artistas e de moradores comunidade da ilha de Caratateua. • Em 2024 - segunda edição da COP das Baixadas, com a temática central "A Periferia Amazônica no Centro do Debate Climático; • Em 2024 a Funbosque participou da Reunião da Sociedade a Brasileira do Progresso para a Ciência (SBPC) realizada na Universidade Federal do Pará (UFPA), com o tema "Ciência para um futuro sustentável e inclusivo: por um novo contrato social com a natureza". • Lançamento da cartilha "Gigantes da Trilha: 30 árvores da trilha principal da Fundação Escola Bosque – Vol. 1; • Liderança indígena, ambientalista e escritor Ailton Krenak palestrante no I Seminário de Educação Ambiental que integra a programação da 21ª edição do Diálogos de Saberes com palestra "A natureza do tempo presente: reflexões sobre crise ambiental, cosmologia indígena e ancestralidade; • Funbosque antirracista: Contra toda natureza de racismo!" em alusão ao Dia da Consciência Negra, com atividades de costura criativa que produz peças voltadas para a cultura afroamazônida, permitindo sua identidade de forma positiva; • Escola Nacional de Turismo (ENT), junto com o Ministério do Turismo e do Ministério da Educação, o curso de "Gestão de Negócios para Turismo".

Ilha de Caratateua (Outeiro): Casa Escola da Pesca – CEPE;	• Os alunos da Casa-Escola da Pesca - CEPE/ Funbosque, participaram de estágios tanto na CEPE, quanto na Fazenda Escola da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), em Castanhal. • A Casa Escola da Pesca (Cepe) completou 15 anos de atividades, beneficiando os moradores da região Insular de Belém, no dia 17 de abril. Celebra curso de Recursos Pesqueiros e técnico em cozinha. • Em 2024 o projeto Cinepesca, da Unidade Casa-Escola da Pesca, exibiu dois filmes de sua produção nas sessões do cineclube da SBPC;
Ilha de Cotijuba: Faveira	• Em alusão ao Dia da Terra, comemorado no dia 22 de abril de 2023, os estudantes do 9° ano, da Unidade Pedagógica Faveira participaram de oficinas de produção de pigmentos naturais produzidos a base de plantas, carvão vegetal e borras de café, e desenhos com a utilização dos pigmentos. • Escola Nacional de Turismo (ENT), junto com o Ministério do Turismo e do Ministério da Educação, o curso de a Unidade da Faveira (ilha de Cotijuba) com curso "Qualidade no atendimento aos turistas de Cotijuba" e "Hospedagem Familiar".
Flexeira	• Exposição de trabalhos na I Feira do Conhecimento. Com o tema "Meio Ambiente como instrumento de tecnologia social e ciência cidadã"
Seringal	• Em 2021 cita-se a unidade do seringal na o projeto Ilhas do Saber foi apresentado durante um evento especial, na Unidade Pedagógica Seringal.

Quadro 01: Informativo de atividades realizadas pela Funbosque no ano de 2021, 2023, 2024 anos que antecedem a extinção em 2025. Fonte: Adaptado de Belém (2024).

Nesta abordagem cabe discutir *identidade ribeirinha* confunde-se com a tríade na Amazônia *sagrado* referente a religiosidade, marcado pelo *catolicismo popular* de culto aos santos na Amazônia, Nossa Senhora de Nazaré, São Benedito, Menino Deus (Jesus Menino) e São Pedro, a relação das populações com o rio e a floresta (natureza) seja econômica e ou subjetiva e presença dos trapiches e da atividade portuária, e como esses elementos sempre foram respeitados na Fundação Escola Bosque. Nos roteiros geo-turísticos e de memória os trapiches são sempre inseridos como a exemplo de Icoaraci.

Segundo Maués (2005; p.262) há elementos na religião do caboclo amazônico que são mais particulares como à pajelança rural ou de origem rural (cabocla), que tem como crença fundamental a construção dos "encantados", influenciada por concepções de origem indígena, de lugares situados "no fundo", ou abaixo da superfície terrestre, e provavelmente também por concepções de entidades de origem africana, como os orixás, seres que não se confundem com os espíritos dos mortos.

A pajelança é marcante por meio da valorização e cultivo de ervas medicinais, comum nos quintais amazônicos e valorização das religiões de matrizes africanas. O xamanismo vem para praticar o bem, sobretudo para curar doenças. É comum na região das ilhas esses canteiros medicinais, sobretudo, cobrindo fragilidades do Estado. A ilha de Caratateua não possui nenhum hospital ou Unidade de Pronto Atendimento–UPA. No Quadro 1, observa-se projetos que valorizam diálogo com conhecimentos tradicionais dos indígenas e quilombolas, e recortes da memória por meio dos roteiros de memória daí trabalhou-se com pressuposto que a Funbosque se fundamentou em uma *educação Ambiental e Patrimonial*.

A atuação da Funbosque valorizou e até mesmo resgatou a *identidade ribeirinha* ou dos povos tradicionais miscigenados. De forma bem empirista pode-se conceituar o ribeirinho como aquele que reside a beira de rios, porém, faz-se necessário ressaltar sua forte ligação com meio natural extraindo recursos para sua sobrevivência, nas terras e nas águas com várias modalidades de subsistência e reprodução por meio da pesca, caça, coleta no extrativismo e no manejo das florestas obedecendo as temporalidades, sazonalidades, urbanidades e ruralidades.



Figura 02: (a) Roteiro Geoturistico no Distrito de Icoaraci e (b) Encontro entre professores da Escola Bosque, Comunidade e grupo de pesquisa de Cartografia social da Amazônia no Sítio de Marés, bairro do Itaiteua ouvindo relatos sobre justiça climática, impactos antropogênicos nas ilhas e representação desses espaços pela comunidade. Fonte: Marcos André (2025); os autores (2025)

De acordo Rodrigues (2024 p.174) como nas ilhas de Caratateua, Cotijuba, Paquetá, Grande e Combu, imbricam-se urbanidades, ruralidades e insularidades diversas, tanto nas práticas de sujeitos de vida cotidiana mais urbanizada (comércio ambulante, bancos, empresas de telefonia, placas solares e internet, transporte coletivo, centros comerciais, franquias, fábricas etc.) quanto nas práticas da vida cotidiana rural-ribeirinha (carroceiros, caseiros, carvoarias, pequena produção rural,

peconheiros, extrativismos, artesanato, condução de embarcação etc.). A autora chama atenção da apropriação desses territórios insulares pelo capital imobiliário e financeiro por meio da acumulação por espoliação conforme apresentado por Harvey (2005).

Em Caratateua observa-se uma complexidade paisagística com condomínios fechados de alto padrão, com monitoramento 24 horas, academia, área privativa de acesso porção fluvial pelo uso de lanchas, além de amplo contato a natureza. Na Avenida Paulo Costa via principal da ilha observa-se um condomínio de Alto Padrão Alfaville, em frente do complexo Automobilístico Veloway primeira pista arrancada do Pará, e convive com sítio com criação de bodes, todos e mais atrás o Sítio de Marés um polo de pesquisa da Escola Bosque. Demonstrando um contraste entre espaços rurais e altamente urbanos alinhados ao grande capital. Costa, Rodriguês e Oliveira (2025; p.1) afirmam que fenômeno de urbanização atravessou os espaços insulares do município de Belém, como a ilha de Caratateua, alterando dinâmicas socioambientais tipicamente ribeirinhas, e criando de novas periferias urbanas da cidade, todavia, não extinguiu alguns elementos identitários que são marcadamente uma herança cultural indígena e a expressão da territorialidade ribeirinha na metrópole amazônica: os quintais que são foco da pesquisa da Funbosque.

Na pesquisa da Monteiro (2023) a importância das áreas portuárias e trapiches na acessibilidade é marcante na cultura ribeirinha, com elementos arquitetônicos e urbanísticos que compõem o cotidiano das populações ribeirinhas, destacando-se as estivas, os portos e os trapiches por serem infraestruturas físicas que carregam significados que transcendem a função de circulação de pessoas e de mercadorias, adentrando-se em dimensões lúdicas, de crenças, de saberes, de identidade e de afetividade no espaço. Essa relação é bastante perceptível no trapiche de Icoaraci que mantem forte relação com as ilha de Cotijuba e até mesmo com a ilha de Caratateua pelo fluxo de mercadorias e pessoas, sendo um ambiente cores, cheiros e experiencias. Esses três elementos estão muito presentes no paradigma educacional da Funbosque, destaco o Roteiro Geoturistico da ilha de Caratateua que fortalece a identidade ribeirinha que se manifesta na valorização dos patrimônios naturais como praias, falésias, igarapés no patrimônio imaterial presente nos cordões de pássaros juninos e o boi misterioso de Caratateua entre outros pontos importantes (Figura 3).

Por outro lado, ns ilha de Caratateua os pontos selecionados foram a escola Bosque pela relação com os movimentos sociais, formação a partir da pressão da comunidade na década de 90, a Biblioteca comunitária Tralhoto leitor com a força cultural dos bois, os quintais agroecológicos conhecidos como quintais ecopoéticos refletir sobre modo de vida ribeirinho, a casa de Mariano Klautau Sociólogo, ambientalista e poeta idealizador da Escola Bosque, e Cordões de Pássaros Juninos colibri cuja guardiã é Laurene da Costa Ataide, Vale ressaltar, que desde a primeira edição do roteiro Geoturistíco em Caratateua, programas institucionais de formação de professores estiveram presentes Residência Pedagógica e atualmente como Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência na Geografia, demonstrando o comprometimento da Fundação com a formação de professores. Curiosamente, discentes vinculados ao MST- Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra compuseram o primeiro grupo de estagiários ou *Student Teachers" Microteaching*".



Figura 03: (a) Mestre Apolo da Biblioteca Comunitária e do boi misterioso em oficina de cordel, (b) Espaço Colibri de Outeiro visitado pelos alunos da Funbosque; (c) Sitio de Maré modelo de quintal agroecológico em Caratateua. Fonte: Os autores (2025)

Ressalta-se, também, o papel do Ecomuseu que é mais do que um projeto na Funbosque (Martins, 2014; 2017), buscando interagir o meio físico (natureza) e sociocultural do município, com experiências no bairro Ilha de Caratateua e Cotijuba (Martins e Pacheco, 2021). O Ecomuseu da Amazônia, criado em 2007, é um Programa tutelado pela Prefeitura Municipal de Belém (PMB), através da Secretaria Municipal de Educação, gerida pela FUNBOSQUE, diferentemente de um museu tradicional, é um museu aberto que vivencia o cotidiano das comunidades, está inserido no território amazônico e demonstra o acervo natural e cultural da região (Martins, 2014; p. 316). O Ecomuseu tem várias iniciativas que merecem destaque como projeto bicicletas douradas cordenadas pelo grupo faveira propos o uso de bicicletas comunitárias na ilha de Cotijuba no contexto das mudanças climáticas. Além disso, implementação de turismo de base comunitária na fazendinha e poção com atrativos como engenho, artesania naval, farinha artesanal, muricizal, curral conforme visualização no biomapa elaborado pelo Ecomuseu descrito em Huffner, Martins e Bastos (2018; p. 245).

Huffner e Martins (2024) em artigo demonstrou a uma importância dos museus de base comunitária, o acervo não está morto, mas vivo, à concepção de seu território, à escuta e ao serviço da comunidade, assim, a obra de Freire aplica-se por meio

da pedagogia da libertação (liberta forças vivas da comunidade) e pedagogia da Autonomia (o homem é dono de seu destino). Neste sentido, compartilha-se as questões propostas por Freire (1996; p.15) "Por que não estabelecer uma necessária "intimidade" entre os saberes curriculares fundamentais aos alunos e a experiência social que eles têm como indivíduos? Refletindo sobre Ensinar que exige respeito aos educandos".

Extinção da Escola Bosque: Na contra mão da Educação pública

Esse tópico reflete avanço de políticas neoliberais, com afastamento do estado de setores estratégicos como saúde e educação. Das observações empíricas na Fundação Escola Bosque (sede) desde 2019 acomponha-se por meio dos projetos Residência pedagógica e PIBID que fortalecem as licenciaturas por meio de estágios durante o curso de geografia. Observou-se uma forte intervenção do municipio no sentido de extinguir ensino médio técnico em meio ambiente, fato interrompido pela intervenção do Ministério público, e um arduo processso de resistencia com apoio da comunidade conforme citado também por Silva, Tapajós e Clarindo (2024; p13).

Após o encerramento do terceiro mandato do ex-prefeito Edmilson Rodrigues, de esquerda, com a vitória do atual prefeito Igor Normando, foi implementado o projeto de Lei nº 10.143, de 10 de fevereiro de 2025, dispondo-se a organização administrativa do Poder Executivo Municipal, e dando outras providências, no artigo 12, § 6º, que resultou na extinção da Fundação Centro de Referência em Educação Ambiental - Escola Bosque Professor Eidorfe Moreira – FUNBOSQUE, que apesar da resistencia de professores e comunidade foi iniciada desrespeitando ignorando a obrigatoriedade da consulta livre, prévia e informada aos povos tradicionais afetados estabelecida deola Convenção 269 da Organização Internacional do Trabalho-OIT.

Concomitante a esse retrocesso na política educacional ainda houveram duas outras a Lei Estadual 10.820/2024 no Pará gerou grande mobilização em janeiro de 2025 por permitir, na prática, a substituição do ensino presencial por Educação a Distância (EAD), , substituindo o ensino presencial do Sistema Modular de Ensino Indígena (SOMEI) em aldeias, porém foi revorada em função do forte mobilização que conduziu a ocupação da dependencias da Secretaria da Educação do Estado do Pará (SEDUC) e por fim, com tentativa das Leis 10.266/26 e 10.277/26 impactos a conquistas trabalhistas históricas como licenças e progressões funcionais automáticas.

Considerações Finais

Das considerções finais resgato o titulo do presente artigo, "Na contramão da educação: Funbosque do reconhecimento como referência na educação ambiental e patrimonial na América Latina a extinção". No artigo procurou-se apresentar aspectos teóricos que tornaram a Fundação em um modelo a ser estendido a outras escolas como a relação com os rios e florestas, a circilação por meio das áreas portuárias e trapiches e com o sagrado na Amazônia representando pela pajelança e pelas religiões de matrizes africanas e das festas de santo. Metodologicamnete, a valorização dos saberes locais e dos patrimonios material e imaterial foram fortalecidos pela presença do EcoMuseu da Amazônia e de projetos transdisciplinares permitiram uma atuação respeitosa entre a instituição e a comunidade. Os movimentos sociais foram e são essenciais na história da Funbosque o Consilha na fundação e o Funbosque Fica durante a extinção. A Fundação Escola Bosque transformou essa porção insular como verdadeiros territórios educativos por meio do Turismo de Base Comunitária, horta do conhecimento, roteiro geoturístico entre outros. A extinção da Fundação representa um forte impacto a educação das regiões insulares que eram atendidos diretamente pela instituição conferindo grave violação dos direitos humanos, em um contexto de austeridade do Estado e política de desvalorização dos professores e dos povos originários.

Agradecimentos

Meus agradecimentos a "Funbosque", as Universidades UFPA e a UNEMAT pela especialização em educação no campo..

Referências Bibliográficas

BELÉM, Fundação Escola Bosque. **Informativo Escola Bosque - FUNDAÇÃO ESCOLA BOSQUE COMEMORA 27 ANOS COM 2.300 ALUNOS E 8 UNIDADES DE ENSINO EM 4 ILHAS DE BELÉM**. Belém, PA: Prefeitura Municipal de Belém, Funbosque, abr. 2023. Edição 01. Disponível em: >https://funbosque.belem.pa.gov.br/wp-content/uploads/2023/09/Informativo-Escola-Bosque-1a-Edicao-1.pdf<. Acesso em: 27 abr. 2026.

BELÉM. **Lei nº 10.143, de 10 de fevereiro de 2025**. Dispõe sobre a organização administrativa do Poder Executivo Municipal, e dá outras providências. Diário Oficial do Município de Belém, Belém, PA, n. 15.130, 10 fev. 2025. Disponível em: https://pgm.belem.pa.gov.br/wp-content/uploads/2025/07/LEI-ORDINARIA-10143.pdf. Acesso em: 27 abr. 2026.

COSTA, A. D.; RODRIGUES, E. T.; OLIVEIRA R.D. de; NOGUEIRA, L.F. de S. O "habitar" ribeirinho da cidade de Belém / Pa: a construção de uma periferia insular. **REVISTA ARACÊ**, São José dos Pinhais, v.7, n.7, p. 35390-35408, 2025. Disponível: em: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/download/6291/8807/24942.

DAMASCENO, V. L. **História Local e Educação Patrimonial: A feira livre de Bragança do Pará como espaço de aprendizagem histórica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Mestrado Profissional em Ensino de História, Ananindeua, 2023. 132p.

.

FREIRE, P. **Extensão ou comunicação?** Tradução de Rosisca Darcy de Oliveira. Prefácio de Jacques Chonchol. 8. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1983. 93 p. Disponível em: >https://fasam.edu.br/wp-content/uploads/2020/07/Extensao-ou-Comunicacao-1.pdf<. Acesso em: 26 de abr. 2026.

FREIRE, Paulo. Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

FURTADO, A. M. M. Problemas geomorfológicos urbanos da Ilha de Caratateua e suas implicações com expansão urbana de Belém. **Sociedade & Natureza**, *[S. l.]*, v. 8, n. 15, 2021. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/sociedadenatureza/article/view/61947. Acesso em: 11 nov. 2025.

HARVEY, D. **O novo imperialismo**. São Paulo: Loyola, 2005.

HUFFNER, J. G. P.; MARTINS, M. T. R. Ecomuseu de Belém e o Turismo Comunitário enquanto instrumentos pedagógicos para a educação e salvaguarda patrimonial, in "**Educazione Aperta**" (www.educazioneaperta.it), 15/2024.

MARTINS, M. T. R. Ecomuseu da Amazônia: uma experiência ao serviço do desenvolvimento comunitário no Município de Belém – PA. **Cadernos do CEOM**, n.41, Julho, 2014. Disponível em: https://bell.unochapeco.edu.br/revistas/index.php/rcc/article/view/2610. Acesso em 18 de novembro de 2025.

MARTINS, M. T. R. **Inventário e Gestão de Coleções: Instrumentos de Valorização e Apropriação Responsável do Patrimônio no Ecomuseu da Amazônia/Ilha de CotijubaPA-BR**. Universidade Fernando Pessoa, Pós-Doutoramento em Museologia e Documentação, Portugal, 2017. 111p.

MARTINS, M.T. R.; PACHECO, V. de A. **Ecomuseu da Amazônia: o patrimônio local da representatividade dos biomapa**s. In História, Arqueologia e Educação Museal: patrimônio e memórias– Teresina-PI: EDUFPI , 2021. 753p.

MAUÉS, R. H.. Um aspecto da diversidade cultural do caboclo amazônico: a religião ESTUDOS AVANÇADOS 19 (53), 2005. 259- 274p.

MONTEIRO, E. C. Trapiches e portos: vida urbana e acessibilidade espacial na orla sul de Belém do Pará. **ENANPUR**. 2023. Belém – Pará. Disponível em: http://anpur.org.br/wp-content/uploads/2023/05/st04-50.pdf.

RODRIGUES, Á. F. A. C. **Os Espaços Insulares De Belém: usos e consumos da natureza na Amazônia metropolitana e suas contradições socio-espaciais**. Tese de doutorado apresentada ao PPDS do Trópico Úmido, do NAEA -UFPA. 2024. 512p.

SILVA, J. B. da; TAPAJÓS, M. C.; CLARINDO, K. T. O subsistema de educação para o desenvolvimento sustentável em Belém do Pará: processos e aspectos conjunturais (1993-1996). **Revista HISTEDBR On-line**, Campinas, SP, v. 24, p. 1-27, 2024. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/histedbr/article/view/8670111. Acesso em: 11 abr. 2024.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM RESÍDUOS SÓLIDOS E FORMAÇÃO SUSTENTÁVEL NO AMBIENTE ESCOLAR

1 José Antônio Dias Barbosa, 2 José Guilherme das Neves, 3 Maria Cristina Rizk, 4 Renata Ribeiro de Araújo e 5 Marlon Vinícius Ferreira dos Santos[5]

1FCT - UNESP, e-mail: jose.dias-barbosa@unesp.br; 2FCT - UNESP, e-mail: jg.neves@unesp.br; 3FCT – UNESP, e-mail: mc.rizk@unesp.br; 4FCT - UNESP, e-mail: renata.r.araujo@unesp.br, 5FCT -UNESP, e-mail: marlon.santos@unesp.br

Palavras-chave: Educação Ambiental; Resíduos sólidos; Metodologia participativa.

Resumo

O aumento da geração de resíduos sólidos e o descarte inadequado de resíduos têm intensificado os impactos ambientais, evidenciando a necessidade de ações educativas voltadas à conscientização e à formação de cidadãos ambientalmente responsáveis. Nesse contexto, a educação ambiental em ambiente escolar desempenha papel fundamental, especialmente quando associada a metodologias participativas que favoreçam o protagonismo dos estudantes. Deste modo, o presente artigo tem como objetivo relatar e analisar uma experiência de educação ambiental desenvolvida com estudantes do terceiro ano do ensino médio da E.E.E.I. Coronel Francisco Whitacker, de Anhumas – SP. A metodologia adotada foi organizada em etapas, incluindo a aplicação de um questionário diagnóstico, a realização de uma apresentação sobre resíduos sólidos e o desenvolvimento de uma atividade lúdica por meio de um jogo de tabuleiro educativo. Os resultados evidenciaram o engajamento dos estudantes, ampliação da compreensão de conceitos relacionados à gestão adequada de resíduos sólidos e participação nas discussões propostas. A utilização do jogo de tabuleiro como ferramenta pedagógica contribuiu para a redução do receio de errar e para a construção coletiva do conhecimento, tornando o processo de aprendizagem mais acessível e significativo. Conclui-se que a adoção de metodologias ativas e lúdicas no ensino da educação ambiental favoreceu a sensibilização dos estudantes e contribuiu para a incorporação de práticas sustentáveis no cotidiano escolar e social.

Introdução

O crescimento populacional e a produção em massa, aliados à falta de conscientização sobre os recursos naturais, têm agravado a geração de resíduos sólidos. Frequentemente descartados de forma incorreta, esses resíduos geram impactos ambientais negativos ao ambiente (HAUENSTEIN; ISMAIL, 2024).

A gestão adequada dos resíduos sólidos configura-se como um elemento central da agenda global de desenvolvimento sustentável, definida pela Organização das Nações Unidas (ONU) a partir dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esses objetivos têm como finalidade orientar as nações na promoção de práticas que contribuam para um futuro ambientalmente sustentável, socialmente justo e economicamente equilibrado (CAMÕES; SILVA, 2023).

O conceito de educação ambiental advém da Conferência em Educação na Universidade de Keele, na Grã-Bretanha, em 1965, com a proposta de atribuir valores sustentáveis, acompanhada da compreensão de que sua realização devia ser parte do processo de formação do cidadão (SANTOS; ARAÚJO, 2025; SPECKHAHN; CHUEIRI 2024).

Em meados da década de 1980, a educação ambiental tornou-se alvo de debates e processos de institucionalização na sociedade brasileira, tendo como marco regulatório a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), lei nº 6.938/81, na qual determinou-se a educação ambiental como obrigatória a todos os níveis de ensino (CARVALHO; FRIZZO, 2016; SPECKHAHN; CHUEIRI, 2024). Atribuiu-se, deste modo, às instituições de ensino a função de ensinar e desenvolver o pensamento crítico sobre temáticas ambientais (BRASIL; 1999, SANTOS; ARAÚJO, 2025).

Contudo, a institucionalização da educação ambiental defrontou-se com problemáticas institucionais e pedagógicas. As problemáticas institucionais foram em razão da Política Nacional de Educação Ambiental, lei nº 9.795/99, e outras normativas legais, determinarem em primeiro lugar a transdisciplinaridade. Em outras palavras, o diálogo entre as mais diversas áreas do saber com um determinado tema, tendo em vista não reconhecer a educação ambiental como uma disciplina própria no currículo escolar como as tradicionais disciplinas, acarretando em sua negligencia nas instituições de nível básico. Em segundo lugar, a complexidade legal quanto à adesão a cada realidade regional e local em um país tão grande quanto o Brasil (CARVALHO; FRIZZO, 2016; SPECKHAHN; CHUEIRI, 2024).

Apesar das problemáticas institucionais, houve a adoção e implementação da educação ambiental, tanto que o número de matrículas ofertadas pelas instituições de ensino aumentou de 2001 a 2004, passando de 25,3 milhões para 32,3 milhões, e o número de instituições registradas com educação ambiental de 115 mil para quase 152 mil (BRASIL, 2006). Ainda, 34,2% das escolas ainda permanecem sem ações de educação ambiental (SOUZA; ALVES, 2025) e persiste-se a existência de disparidades regionais quanto à pesquisa e extensão voltadas a prática de educação ambiental (MELO; CHAGAS; GINESTA, 2023) e a escassez de dados institucionais limitar análises comparativas nos avanços obtidos.

Por outro lado, as problemáticas pedagógicas colocaram-se em razão da metodologia de ensino do docente para com os estudantes, isto é, o conflito entre o ensino tradicional verticalizado em sala e as novas necessidades e realidade impostas (SANTOS; ARAÚJO, 2025; LAÉRCIO; FONSECA, 2022). Sendo assim, a metodologia tradicional de ensino, na qual unicamente o professor possuía o conhecimento e os estudantes somente captariam e internalizariam, mostrava-se defasada às necessidades das temáticas presentes na educação ambiental.

No atual contexto do sistema de ensino brasileiro, a metodologia que coloca-se como alternativa é a metodologia ativa, baseada nos trabalhos de Freire (1987) e Freire (1996), voltada a "ferramentas que priorizem o protagonismo dos educandos no desenvolvimento de seu processo crítico-reflexivo" (LAÉRCIO; FONSECA, 2022, p. 12) posicionando os estudantes como o centro no processo de ensino-aprendizagem e o docente como mentor para o suporte e "possibilitando utilizar experiências reais ou simuladas, que busquem condições de solucionar desafios advindos das atividades essenciais da prática social, em seus diferentes e possíveis contextos" (SPECKHAHN; CHUEIRI, 2024, p. 6). Tratando-se, em suma, de uma metodologia que prioriza os conhecimentos dos estudantes, considera as suas condições nos mais diversos âmbitos e adapta o conhecimento a ser transmitido para que o mesmo seja coerente com a realidade posta.

A gamificação, seja digital ou não digital, a tecnologia e as oficinas são os recursos de metodologia ativa no ensino de maior destaque e recorrência, como nos trabalhos de Barbalho, Soares e Gomes (2026), Laércio e Fonseca (2022), Santos *et al.* (2025) e Lima *et al.* (2024), transpondo o campo do entretenimento em concomitância à manutenção da familiaridade com os estudantes, tornando o conteúdo e seu domínio mais acessível.

Os trabalhos mencionados apresentaram resultados positivos tanto na formação dos docentes, quanto dos estudantes, com a realização de ações de educação ambiental como um processo de ensino-aprendizagem de mão dupla, onde os estudantes passam a ter contato e domínio com um conteúdo e os profissionais aperfeiçoam sua capacidade na transmissão de conhecimento e imaginação/criatividade na elaboração de atividades (SANTOS *et al.*, 2025).

Diante desse contexto, o presente artigo teve como o objetivo apresentar e analisar as ações de educação ambiental realizadas com estudantes do terceiro ano do ensino médio da E.E.E.I. Coronel Francisco Whitacker, Anhumas – SP.

Material e Métodos

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em três etapas principais. Na primeira etapa, realizou-se a elaboração de um questionário diagnóstico com o objetivo de avaliar o conhecimento prévio dos estudantes acerca do tema resíduos sólidos. O instrumento foi aplicado de forma presencial, em formato impresso, junto à turma do terceiro ano do ensino médio da E.E.E.I. Coronel Francisco Whitacker. O questionário foi composto por 10 questões de múltipla escolha, cujas alternativas de resposta foram organizadas conforme apresentado na Tabela 01.

Perguntas	**Alternativas**			
	a	b	c	d
Qual é o nome do processo que torna as empresas responsáveis pelos produtos que fabrica, mesmo depois de descartados, ajudando a reduzir os impactos dos resíduos gerados?	Aterro sanitário	Coleta seletiva	Logística Reversa	Lixão
O "chorume" de aterro é um líquido poluente formado na decomposição dos resíduos orgânicos. Qual a melhor solução para evitar que ele contamine a água e o solo?	Deixar que ele escorra para um rio	Usar a queima do lixo para secá-lo	Instalar um sistema para coletar e tratar esse líquido	Cobrir todo o lixo com terra
A compostagem é uma técnica que transforma resíduos orgânicos, como restos de comida, em:	Gás tóxico	Plástico reciclado	Adubo para plantas	Lixo eletrônico
De acordo com a hierarquia da gestão de resíduos sólidos, qual das seguintes ações é considerada a mais prioritária após a ação de "não gerar"?	Reutilizar	Reciclar	Tratar	Reduzir
O que faz do lixo eletrônico um tipo de resíduo perigoso, exigindo seu descarte especial?	Ocupa pouco espaço nos aterros	Contém materiais tóxicos como chumbo e mercúrio	É muito fácil de reciclar em casa	Atrai muitos animais e insetos

A queima de resíduos sólidos em usinas de incineração apresenta os benefícios de:	Geração de energia elétrica	Eliminação total da poluição do ar	Baixa necessidade de investimento financeiro	Criação de novos tipos de materiais
Qual é o principal objetivo da coleta seletiva de recicláveis (plástico, papel, vidro, metal, etc.)?	Facilitar a reciclagem e o tratamento adequado de cada tipo de material.	Evitar que a lixeira da casa fique cheia.	Fazer com que o resíduo desapareça mais rápido.	Proibir o uso de sacolas plásticas no mercado.
O modelo de "economia circular" é um modelo que se opõe ao da "economia linear" ("extrair-produzir-descartar"). O que a economia circular busca?	Aumentar a quantidade de produtos de curta duração	Usar os recursos por mais tempo, consertando e reutilizando	Concentrar a produção em poucas fábricas	Descartar todos os produtos no lixão
Em um aterro sanitário, o gás metano (CH4) é coletado e queimado. Por que fazer isso com o gás metano?	Para atrair mais insetos e aves	Para ajudar a fertilizar o solo	Para aumentar a umidade do lixo	Para evitar o risco de explosões
Qual técnica usa microrganismos (como bactérias) para limpar solos e águas que foram contaminados por substâncias poluentes?	Reciclagem	Incineração	Compostagem	Biorremediação

Tabela 01: Questionário aplicado com os estudantes.
Fonte: Autores (2025)

O questionário foi aplicado de forma individual, sem interferência dos pesquisadores e sem comunicação entre os participantes, a fim de evitar influência nos resultados. No final da pesquisa, o mesmo questionário foi reaplicado, permitindo a comparação dos dados e a análise do progresso na aprendizagem dos estudantes.

Em seguida, foi realizada uma apresentação expositiva-dialogada, na qual foram abordados conceitos relacionados aos resíduos sólidos, incluindo definição, classificação, logística reversa, coleta seletiva, reutilização e reciclagem, conforme ilustrado na Figura 01.



Figura 01: Apresentação. Apresentação expositiva-dialogada com os estudantes.
Fonte: Autores (2025)

Durante essa etapa, os estudantes foram incentivados a participar de forma ativa por meio de diálogos e exemplos do cotidiano, promovendo maior interação e a construção coletiva do conhecimento.

Essa etapa foi planejada de modo a abordar os questionamentos levantados pelos próprios estudantes, incorporando informações bibliográficas e aspectos da legislação ambiental brasileira, de forma adequada ao nível de compreensão do ensino do terceiro ano do ensino médio. Buscou-se garantir que os conteúdos apresentados fossem compreendidos e assimilados pelos estudantes, possibilitando sua aplicação tanto nas atividades propostas quanto em situações do cotidiano.

Posteriormente, foi desenvolvida uma atividade lúdica por meio de um jogo de tabuleiro (Figura 02), elaborado especificamente para esta pesquisa.



Figura 02: Jogo dos Resíduos Sólidos. Tabuleiro desenvolvido pelo projeto para aplicação lúdica.
Fonte: Autores (2025)

O jogo, intitulado "O Jogo dos Resíduos Sólidos", teve como objetivo reforçar, de maneira dinâmica e interativa, os conteúdos previamente abordados, contribuindo para a consolidação do processo de aprendizagem dos estudantes.

A turma foi organizada em grupos, e os estudantes participaram do jogo utilizando as perguntas como instrumento de revisão e aplicação dos conceitos previamente discutidos. A dinâmica adotada favoreceu a cooperação, a troca de conhecimentos e a participação ativa dos estudantes, evitando-se a ênfase em um caráter excessivamente competitivo.

Ao longo de todas as atividades, a equipe de pesquisadores acompanhou e mediou as discussões, observando o envolvimento dos participantes e a compreensão dos conteúdos trabalhados, o que possibilitou uma avaliação qualitativa da metodologia aplicada no contexto da educação ambiental escolar.

Resultados e Discussão

Durante a realização das atividades, observou-se elevada participação e interesse dos estudantes do terceiro ano do ensino médio. Desde a aplicação do questionário diagnóstico até a realização das atividades lúdicas, os estudantes demonstraram envolvimento nas discussões, realizando perguntas, compartilhando experiências do cotidiano e interagindo entre si, o que evidenciou receptividade em relação à temática dos resíduos sólidos.

A aplicação do questionário diagnóstico permitiu identificar que os estudantes possuíam conhecimentos básicos sobre resíduos sólidos, porém, apresentavam dificuldades em diferenciar conceitos específicos, como logística reversa, hierarquia da gestão de resíduos sólidos e o benefício da geração de energia pela reciclagem. As respostas da turma podem ser observadas na Figura 03.

Questão 1	Quantidade
A	10
B	3
C	4
D	0
Sem resposta	0

Questão 2	Quantidade
A	0
B	1
C	17
D	0
Sem resposta	0

Questão 3	Quantidade
A	0
B	0
C	18
D	0
Sem resposta	0

Questão 4	Quantidade
A	5
B	0
C	5
D	8
Sem resposta	0

Questão 5	Quantidade
A	0
B	17
C	1
D	0
Sem resposta	0

Questão 6	Quantidade
A	3
B	5
C	3
D	7
Sem resposta	0

Questão 7	Quantidade
A	0
B	0
C	16
D	1
Sem resposta	1

Questão 8	Quantidade
A	1
B	17
C	0
D	0
Sem resposta	0

Questão 9	Quantidade
A	0
B	6
C	11
D	1
Sem resposta	0

Questão 10	Quantidade
A	0
B	3
C	12
D	3
Sem resposta	0

Figura 03: Resultados do questionário aplicados no início da pesquisa.
Fonte: Autores (2025)

A análise dos resultados evidenciou variações no desempenho dos estudantes entre as diferentes questões do instrumento aplicado. Observou-se que as questões 2, 3, 5, 16 e 17 apresentaram os maiores índices de acerto, indicando maior domínio dos conteúdos nelas abordados, possivelmente relacionados a conceitos mais familiares ou já previamente assimilados pelos participantes. Por outro lado, as questões 4, 9 e 10 apresentaram distribuição mais equilibrada entre acertos e erros, sugerindo um nível intermediário de compreensão. Em contraste, as questões 1 e 6 concentraram os maiores índices de erro, evidenciando lacunas mais expressivas no conhecimento dos estudantes acerca dos temas abordados nesses itens, podendo indicar a presença de conceitos mais complexos, menos trabalhados no contexto escolar ou ainda pouco compreendidos, reforçando a necessidade de abordagens pedagógicas mais direcionadas a esses conteúdos.

A apresentação expositiva-dialogada desempenhou papel fundamental no desenvolvimento das atividades, funcionando como um momento de organização e aprofundamento dos conhecimentos. Observou-se que, durante essa etapa, os estudantes participaram ativamente por meio de questionamentos, comentários e exemplos relacionados à realidade vivenciada no ambiente escolar e familiar (Figura 04). Essa interação favoreceu a compreensão dos conceitos trabalhados, permitindo que os estudantes estabelecessem relações entre o conteúdo teórico e situações do cotidiano, o que contribuiu para um melhor aproveitamento das atividades posteriores.



Figura 04: Diálogo com os estudantes durante a apresentação de conteúdo teórico.
Fonte: Autores (2025)

A aplicação do jogo de tabuleiro “O Jogo dos Resíduos Sólidos” mostrou-se como um momento central do estudo, pois possibilitou que os estudantes aplicassem os conhecimentos adquiridos de forma prática. Observou-se que a dinâmica em grupo favoreceu a cooperação e o diálogo, permitindo que os próprios estudantes contribuíssem com as respostas coletivamente, relacionando as situações apresentadas no jogo com experiências vivenciadas em seu cotidiano, conforme ilustrado na Figura 05.



Figura 05: Partida do jogo de tabuleiro.
Fonte: Autores (2025)

Outro aspecto relevante refere-se à redução do receio de errar durante a realização da atividade lúdica. Diferentemente de avaliações tradicionais, o ambiente proporcionado pelo jogo mostrou-se mais acolhedor e menos formal, o que favoreceu a participação espontânea dos estudantes. Nesse contexto, o erro passou a ser compreendido como parte do processo de aprendizagem, e não como um elemento punitivo, contribuindo para o aumento da autoconfiança e do engajamento dos participantes.

Adicionalmente, a mediação realizada pela equipe ao longo da atividade permitiu a problematização das respostas e o aprofundamento dos conteúdos, potencializando os momentos de aprendizagem. Dessa forma, o jogo não se limitou a uma estratégia de revisão, mas constituiu-se como um recurso didático capaz de promover a aprendizagem ativa, colaborativa e contextualizada, em consonância com os princípios da educação ambiental crítica.

A comparação entre os resultados obtidos no questionário diagnóstico inicial e aqueles registrados no questionário final permitiu observar a evolução dos estudantes em relação aos temas abordados, evidenciando mudanças na compreensão dos conceitos relacionados à gestão adequada dos resíduos sólidos. Os resultados foram de maior assertividade nas respostas e reforçam a eficácia das estratégias pedagógicas adotadas, ao demonstrar um aumento no percentual de respostas corretas e maior clareza conceitual após a intervenção educativa.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a utilização de metodologias ativas participativas e lúdicas no ambiente escolar contribui para a sensibilização dos estudantes em relação à gestão adequada dos resíduos sólidos. A experiência evidenciou que a aproximação entre teoria e prática favorece a compreensão dos conteúdos e estimula reflexões sobre práticas sustentáveis que podem ser incorporadas ao cotidiano dos estudantes, tanto no ambiente escolar quanto fora dele.

Considerações Finais

A experiência desenvolvida evidenciou a importância da educação ambiental no ambiente escolar como ferramenta para a sensibilização dos estudantes em relação à gestão adequada dos resíduos sólidos. As atividades realizadas possibilitaram a abordagem de conceitos fundamentais de forma acessível, contribuindo para a ampliação do conhecimento e para o estímulo à reflexão sobre práticas sustentáveis.

A utilização de metodologias participativas, aliadas a atividades lúdicas, mostrou-se eficaz para promover maior engajamento dos estudantes, favorecendo a participação ativa, o diálogo e a construção coletiva do aprendizado. A aproximação entre teoria e prática contribuiu para tornar o processo educativo mais significativo, permitindo que os conteúdos trabalhados fossem relacionados ao cotidiano dos participantes.

Dessa forma, o estudo reforçou o potencial de ações educativas baseadas em metodologias ativas no contexto escolar, podendo ser replicado e adaptado a outras realidades educacionais. Espera-se que iniciativas como essa contribuam para a formação de estudantes mais conscientes e comprometidos com a adoção de práticas ambientalmente responsáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Pró-Reitoria de Graduação (PROGRAD) e da Pró-Reitoria de Extensão Universitária e Cultura (PROEC) da UNESP, ao Centro de Estudos em Educação, Trabalho, Ambiente e Saúde (CEETAS) da FCT/UNESP, e a E.E.E.I. Coronel Francisco Whitacker, de Anhumas – SP, para a realização do presente estudo.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 abr. 1999. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm. Acesso em: 6 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Continuada, Alfabetização e Diversidade (SECAD). Educação na diversidade: o que fazem as escolas que dizem que fazem educação ambiental/Organização: Rachel Trajber; Patrícia Ramos Mendonça. Brasília: MEC/SECAD; UNESCO, 2006. (Coleção Educação para Todos, Série Avaliação, n. 6, v. 23).

BARBALHO, D. de C.; SOARES, F. P. de A.; GOMES, B. S. Quiz da trilha ambiental: o jogo como metodologia ativa de ensino e aprendizagem em educação ambiental. Revista C&Trópico, v. 47, n. 2, p. 83–100, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33148/CETRO-Pv47n2(2023)art6.> Acesso em: 26 fev. 2026.

CAMÕES, Felizardo B.; SILVA, Rodrigo F. Gestão de resíduos sólidos e seu impacto na qualidade de vida: Caso de estudo do Bairro Torrone Velho (Quelimane–Moçambique). Revista Brasileira de Meio Ambiente, v. 11, n. 3, p. 17-32, 2023.

CARVALHO, Isabel Cristina de Moura; FRIZZO, Tais Cristine Ernst. Environmental education in Brazil. In: PETERS, Michael A. (ed.). *Encyclopedia of educational philosophy and theory*. Singapore: Springer Nature, 2016.

FREIRE, Paulo. Pedagogia do oprimido. 17ª ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1987.

FREIRE, Paulo. Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1996.

HAUENSTEIN, Geovanna R. P.; ISMAIL, Alvez L. Influência da política nacional de resíduos sólidos na gestão ambiental e no gerenciamento de resíduos. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 8, n. 4, p. 288–296, 2024.

LAÉRCIO, Francisco Giovani Souza; FONSECA, Letícia Rodrigues da. Proposta de jogo educativo para a educação ambiental no ensino básico. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), São Paulo, v. 17, n. 1, p. 09–27, 2022.

LIMA, Jéssica, Tavares de; CAVALINI, Michel Zandomingue; MARVILA PEÇANHA, Rodrigo; BERGER ANDRADE, Mariella; LYRA SILVA PASSOS, Marize. Jogo interativo "O lixo e suas consequências" com uso de metodologia ativa de aprendizagem: um tema transversal por meio da sala de aula invertida. Revista Eletrônica Sala de Aula em Foco, v. 13, n. 2, p. 39–47, 2024. ISSN 2316-7297.

MELO, João Paulo de; CHAGAS, Kadyja Karla do Nascimento; GINESTA, Josyanne Pinto. Análise da realização de práticas em educação ambiental e sustentabilidade na educação básica. *Revista Brasileira de Educação Ambiental*, São Paulo, v. 18, n. 6, p. 13–27, 2023. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/An%C3%A1lise-da-realiza%C3%A7%C3%A3o-de-pr%C3%A1ticas-em-Educa%C3%A7%C3%A3o-e-na-Melo-Chagas/601216517b4f97f19e73d6638adebd63bbd24c85.> Acesso em: 26/fev/20262026.

SANTOS, Adma Viana et al. Didactics and environmental education: pedagogical workshops as a strategy for sustainability-oriented learning. *Caderno Pedagógico*, Lajeado, v. 22, p. e18184, 2025.

SANTOS, Leonardo; ARAÚJO, Patrício Câmara. O uso de jogos como ferramenta didática no ensino da educação ambiental: uma revisão sistemática da literatura. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), [S. l.], v. 20, n. 7, p. 403–422, 2025. Disponível em: https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/20234. Acesso em: 25 fev. 2026.

SOUZA, Deivid; ALVES, Giovana. Sede da COP, Brasil tem 1/3 das escolas sem educação ambiental. Metrópoles, Brasília, 26 abr. 2025. Disponível em: < https://www.metropoles.com/brasil/brasil-escolas-sem-educacao -ambiental>. Acesso em: 26 fev. 2026.

SPECKHAHN, Izabel da Silva Liberato; CHUEIRI, Débora Mury Alves. Educação ambiental através de metodologias ativas: uma revisão bibliográfica. *Revista Valore*, Volta Redonda, v. 9, e-9024, 2024.

GAMIFICAÇÃO APLICADA AO TEMA RESÍDUOS SÓLIDOS EM AMBIENTE ESCOLAR

1 Larissa Cristina Araujo de Souza, 2 Bianca Queixada de Andrade Marques, 3 Maria Cristina Rizk, 4 Renata Ribeiro de Araújo e 5 Amanda Trindade Amorim

1FCT - UNESP, e-mail: cristina.araujo@unesp.br; 2FCT - UNESP, e-mail: bq.marques@unesp.br; 3FCT – UNESP, e-mail: mc.rizk@unesp.br; 4FCT - UNESP, e-mail: renata.r.araujo@unesp.br, 5FCT -UNESP, e-mail: amanda.amorim@unesp.br

Palavras-chave: Resíduos Sólidos; Gamificação; Metodologias ativas.

Resumo

O crescimento contínuo na geração de resíduos sólidos configura-se como um dos principais desafios ambientais contemporâneos, especialmente em contextos urbanos, exigindo a implementação de estratégias que promovam não apenas a gestão adequada desses resíduos, mas também a conscientização e a mudança de comportamento da sociedade. Nesse sentido, a educação ambiental no âmbito escolar destaca-se como uma ferramenta fundamental para a formação de cidadãos críticos, capazes de compreender e intervir de forma responsável nas questões socioambientais. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo promover o aumento da conscientização acerca da gestão adequada de resíduos sólidos entre estudantes do terceiro ano do ensino médio da Escola Estadual de Ensino Integral Coronel Francisco Whitacker, localizada no município de Anhumas (SP). Para tanto, adotou-se uma abordagem metodológica baseada em práticas pedagógicas ativas, com ênfase na gamificação como estratégia de ensino-aprendizagem. As atividades desenvolvidas incluíram dinâmicas lúdicas, como a "Corrida da Coleta Seletiva" e a aplicação de um quiz ambiental, estruturadas de modo a estimular a participação, o engajamento e a aprendizagem significativa dos estudantes. Tais estratégias favoreceram a interação entre os participantes, a problematização de situações do cotidiano e a aplicação prática dos conceitos relacionados à separação, destinação e responsabilidade no manejo dos resíduos sólidos. Os resultados evidenciaram envolvimento dos estudantes nas atividades propostas, bem como avanços na compreensão dos conteúdos trabalhados, especialmente no que se refere à importância da segregação correta dos resíduos e ao papel individual e coletivo na promoção da sustentabilidade. Conclui-se, portanto, que a inserção de estratégias pedagógicas inovadoras e participativas no contexto escolar pode contribuir significativamente para a formação de sujeitos mais conscientes e comprometidos com práticas sustentáveis, reforçando o papel da escola como espaço estratégico para a promoção da educação ambiental.

Introdução

A Lei nº. 9.795, de 27 de abril de 1999, "dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências". O art. 1º da referida Lei estabelece que: "Entendem-se por educação ambiental os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade" (BRASIL, 1999).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos reconhece a Educação Ambiental como um dos seus principais instrumentos, sendo necessário estimular ações em educação ambiental, para uma gestão adequada dos resíduos sólidos, sensibilizando sobre os problemas ambientais e a necessidade de preservação ambiental (MARCHI, PIMENTEL e NASCIMENTO, 2022).

A educação ambiental pode contribuir para a construção da cidadania, evidenciando que a sensibilização sobre questões ambientais está diretamente ligada ao desenvolvimento de valores sociais. Além disso, as práticas escolares relacionadas ao gerenciamento de resíduos sólidos fortalecem a consciência ecológica dos estudantes, demonstrando que ações concretas no cotidiano escolar são essenciais para a efetividade da aprendizagem (OLIVEIRA; OLIVEIRA; CARVALHO, 2021).

Segundo Isidoro-Gonçalves, Unger e Carvalho (2024), trabalhar o tema resíduos sólidos no contexto da educação básica contribui para o desenvolvimento da consciência ambiental dos estudantes, permitindo que compreendam melhor os impactos ambientais e sociais relacionados à produção e ao descarte de resíduos. Nesse sentido, a escola desempenha um papel fundamental na formação de cidadãos mais conscientes e responsáveis em relação ao meio ambiente, evidenciando a importância de integrar a educação ambiental de forma sistemática ao currículo escolar.

No estudo de Isidoro-Gonçalves; Unger; Carvalho (2024) desenvolvido numa escola sobre o descarte correto dos resíduos sólidos, foi possível perceber que os estudantes passaram a demonstrar maior interesse pelo tema e maior consciência sobre os impactos ambientais causados pelos resíduos, mostrando que o ambiente escolar é um espaço estratégico para fomentar práticas de sustentabilidade e estimular a reflexão crítica nos estudantes.

Análises de práticas educacionais ressaltam o valor de elementos lúdopedagógicos utilizados em jogos educativos, incluindo jogos de tabuleiro, para apoiar o ensino em diferentes áreas do currículo. Tais práticas não apenas estimulam o raciocínio e a participação ativa, mas também favorecem a reflexão crítica e o desenvolvimento de competências socioemocionais nos estudantes ((MESSEDER NETO; MORADILLO, 2017).

A integração entre teoria e prática é outro ponto relevante, já que a integração de conteúdos teóricos e práticos favorece o aprendizado sobre a preservação ambiental, permitindo que os estudantes compreendam e apliquem os conceitos estudados (TOMAZELLO; FERREIRA, 2001).

Projetos contínuos de educação ambiental transformam o ambiente escolar e promovem hábitos sustentáveis, evidenciando que mudanças duradouras dependem de iniciativas permanentes e planejadas no contexto escolar (TOMAZELLO; FERREIRA, 2001).

Deste modo, o presente artigo tem como objetivo apresentar e analisar a aplicação de uma metodologia participativa sobre educação ambiental em resíduos sólidos com estudantes do terceiro ano do ensino médio da E.E.E.I. Coronel Francisco Whitacker, localizada em Anhumas (SP).

Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida com uma metodologia que se fundamentou em abordagem participativa, tanto qualitativa quanto quantitativa, e em práticas de educação ambiental que envolveram estratégias lúdicas. A intervenção ocorreu de forma presencial na E.E.E.I. Coronel Francisco Whitacker, Anhumas (SP), e envolveu estudantes do terceiro ano do ensino médio da Escola. A metodologia foi estruturada em diagnóstico, sensibilização e práticas sobre a gestão de resíduos sólidos por meio de abordagens de aprendizagem ativa.

Previamente à aplicação das atividades na Escola, a equipe de pesquisadores planejou e confeccionou os materiais didáticos que foram utilizados na pesquisa. Um ponto central desse processo foi a adaptação da linguagem e das estratégias ao perfil dos estudantes, garantindo que o conteúdo técnico fosse apresentado de forma acessível à realidade local.

O processo priorizou o uso de metodologias ativas com ênfase na gamificação, transformando conceitos teóricos em dinâmicas de grupos para maximizar o engajamento. As atividades foram planejadas para ocorrer em espaços abertos da Escola, como a quadra poliesportiva e o pátio, favorecendo a interação física e o trabalho em equipe.

A intervenção iniciou com uma contextualização sobre a importância da coleta seletiva e da destinação correta dos resíduos, estabelecendo a base necessária para as práticas de identificação e separação de resíduos que ocorreram na sequência.

A atividade prática intitulada "Corrida da Coleta Seletiva" usou diversos tipos de resíduos que foram previamente escolhidos, separados e higienizados pela equipe de pesquisadores.

Foram levados para a Escola diferentes resíduos das categorias plástico, metal, papel/papelão, vidro, orgânico, rejeito e resíduos da logística reversa. Os resíduos foram “escondidos” na quadra poliesportiva e no pátio da Escola. Para promover a segurança dos participantes, itens potencialmente perigosos, como o vidro, foram substituídos por representações simbólicas em papel, possibilitando manter o caráter formativo sem exposição a perigos.

Os estudantes foram organizados em cinco grupos distintos. A dinâmica se deu em rodadas: inicialmente, os pesquisadores do estudo anunciavam uma categoria de resíduo a ser localizada e um representante de cada grupo deveria rapidamente encontrá-lo e trazer até o local de partida da corrida. O primeiro a entregar o item correto no local de partida da corrida marcava ponto para o seu grupo. Esse processo se repetiu até que todas os resíduos fossem encontrados, promovendo o pensamento sobre a diversidade de resíduos e a colaboração interna das equipes para tomada de decisão rápida.

A Tabela 01 apresenta as categorias de resíduos e a relação dos resíduos que foram levados para a Escola.

CATEGORIA DE RESÍDUOS	RESÍDUOS SELECIONADOS PARA A "CORRIDA DA COLETA SELETIVA"
PLÁSTICO	Embalagem plástica de hambúrguer (PP – nº 5) Embalagem plástica de achocolatado (PP – nº 5) Garrafa plástica de água (PET – nº 1) Frasco de shampoo (PET colorido – nº 1) Frasco de detergente (PEAD – nº 2)
METAL	Lata de refrigerante Lata de atum Embalagem aerosol de desodorante Tampa metálica de vidro de azeitona Lata de salsicha em conserva
PAPEL / PAPELÃO	Caixa de papel de hambúrguer Cartela de ovo Caixa de suco de papelão Rolo de papel toalha (bobina interna) Caixa de papel de cápsula de café
VIDRO	Frasco de vidro de remédio Vidro de azeitona Garrafa de vidro retornável de cerveja Caco de vidro quebrado Xícara de porcelana quebrada
RESÍDUO ORGÂNICO	Casca de ovo Maçã estragada Resíduos de folhas Borra de café Casca de laranja

REJEITO	Escova de dente Esponja de louça Pano velho Sachê de molho de tomate (Outros – nº 7) Marmita de isopor
LOGÍSTICA REVERSA	Blister de medicamento Spray de óleo lubrificante Cabo de carregador de celular Pilhas Headset

Tabela 01: Resíduos selecionados para o jogo da "Corrida da Coleta Seletiva".
Fonte: Autores (2025)

Posteriormente, os resíduos deram origem ao "Desafio de Perguntas" (Quiz Ambiental). Os resíduos foram sorteados por representantes de cada grupo e os estudantes deveriam responder questões técnicas sobre o resíduo sorteado. Os temas abordaram a reciclabilidade, tempo de decomposição, destino correto e impactos ambientais da destinação irregular de resíduos sólidos. Respostas corretas garantiam pontos e erros abriam a possibilidade para os adversários responderem, promovendo um ambiente de debate e reforço do conteúdo teórico pela vivência prática.

A Tabela 02 apresenta as categorias de resíduos e as perguntas e respostas para os resíduos do "Desafio de Perguntas".

CATEGORIA DE RESÍDUOS	PERGUNTAS E RESPOSTAS PARA OS RESÍDUOS DO "DESAFIO DE PERGUNTAS"
PLÁSTICO	**1. Embalagem plástica de hambúrguer** P.: Como saber se a embalagem plástica deve ir para a reciclagem ou para o lixo comum? R.: Verificar o símbolo de reciclagem (1 a 7). PP nº 5 é reciclável se estiver limpo e conforme coleta local. **2. Embalagem plástica de achocolatado** P.: Como reutilizar a embalagem de achocolatado? R.: Pode ser reutilizada como organizador, vaso, recipiente ou objeto artesanal. **3. Garrafa plástica de água** P.: Como é feita a reciclagem da garrafa PET (Polietileno Tereftalato – número 1)? R.: É lavada, triturada e transformada em grânulos para novos produtos. **4. Frasco de shampoo** P.: Garrafas PET coloridas podem ser recicladas junto com as garrafas PET transparente? Sim ou não e por quê? R.: Não. Devem ser separadas por cor; as coloridas têm menor reaproveitamento.
METAL	**1. Lata de refrigerante** P.: O alumínio é 100% reciclável? Sim ou não e por quê? R.: Sim. Pode ser reciclado inúmeras vezes sem perder qualidade. **2. Lata de atum** P.: Se eu colocar uma lata de atum vazia na reciclagem e ela não estiver 100% limpa e enxaguada, isso é ruim? Sim ou não e por quê? R.: Sim. Resíduos atraem pragas e contaminam materiais recicláveis. **3. Embalagem aerossol de desodorante** P.: Quais cuidados devemos tomar para descartar uma embalagem aerossol para a coleta seletiva e posterior reciclagem? R.: Deve estar completamente vazia para evitar riscos e permitir reciclagem. **4. Tampa de metal de vidro de azeitona** P.: Como descartar tampas de metal para a coleta seletiva? R.: Remover do vidro, limpar e descartar na coleta de metais.
PAPEL / PAPELÃO	**1. Caixa de papelão de hambúrguer** P.: Que cuidados devemos ter ao descartar para a reciclagem uma embalagem de papel/papelão suja com alimentos/gordura? R.: Retirar o excesso de sujeira; se muito contaminada, descartar no lixo comum. **2. Cartela de ovo** P.: Como as cartelas de ovos podem ser reutilizadas de forma sustentável? R.: Pode ser usada para mudas, artesanato ou organização. **3. Caixa de suco de papelão** P.: Qual o destino do papel da caixa Tetra Pak? R.: O material é separado em papel, plástico e alumínio para reaproveitamento.

VIDRO	1. Frasco de vidro de remédio P.: Qual a diferença entre descartar o frasco de vidro vazio e o frasco de vidro com remédio vencido dentro dele? R.: Vazio é reciclável; com medicamento vencido deve ir a ponto de coleta específico. **2. Vidro de azeitona** P.: Como é feita a reciclagem do vidro? R.: É separado por cor, triturado, fundido e moldado novamente. **3. Garrafa de vidro retornável de cerveja** P.: Quais as vantagens de comercializar garrafas de vidro retornáveis? R.: Reduz resíduos, economiza recursos e pode ser reutilizada várias vezes.
RESÍDUO ORGÂNICO	**1. Borra de café** P.: Como podemos aproveitar a borra de café? R.: Pode ser usada como adubo, repelente, eliminador de odores ou em artesanato. **2. Maçã estragada** P.: Quais ações de consumo consciente devemos adotar para reduzir a geração de resíduos de alimentos? R.: Planejamento de compras, armazenamento correto e reaproveitamento. **3. Casca de laranja** P.: Que ações sustentáveis podem ser adotadas para os resíduos de cascas, folhas, talos, sementes de alimentos? R.: Compostagem e aproveitamento integral em receitas. **4. Casca de ovo** P.: O que fazer com a casca de ovo? R.: Pode ser usada como fertilizante natural ou em artesanato.
REJEITO	**1. Escova de dente** P.: Escovas de dentes podem ser recicladas? Sim ou não e por quê? R.: Não, pois são feitas de materiais mistos. **2. Esponja de louça** P.: Cite uma forma reutilizar uma esponja de louça usada antes da sua disposição final em aterros. R.: Pode ser reaproveitada em limpezas mais pesadas. **3. Sachê de molho de tomate** P.: Como reduzir a geração de embalagens em sachês de uso único, que não são recicláveis (embalagens multicamadas que contêm plástico e metal na composição)? R.: Evitar sachês e optar por embalagens reutilizáveis ou sustentáveis. **4. Pano velho** P.: Por que os resíduos têxteis causam impacto ambiental? R.: Demoram a decompor e podem liberar microplásticos.
LOGÍSTICA REVERSA	**1. Blister de medicamento** P.: Por que o blister de remédio pode ser trocado por cadeiras de roda? R.: A reciclagem gera recursos para compra e doação de equipamentos. **2. Headset** P.: Por que não podemos jogar eletroeletrônicos no lixo comum? R.: Contém materiais tóxicos e metais valiosos. **3. Pilhas** P.: Por que devolver as pilhas usadas em ecopontos e o que se faz com elas depois da devolução? R.: Evita contaminação e permite recuperação de metais por logística reversa.

Tabela 02: Perguntas e respostas do "Desafio de Perguntas".
Fonte: Autores (2025)

No final das dinâmicas, a classificação foi feita para definir a equipe vencedora, embora a prioridade tenha sido o processo de aprendizagem coletiva e o diálogo gerado.

Resultados e Discussão

A "Corrida da Coleta Seletiva" teve como principal objetivo consolidar, de forma prática e dinâmica, o conhecimento dos estudantes acerca da identificação dos diferentes tipos de resíduos. Ao propor uma abordagem lúdica e interativa, buscou-se estimular a participação ativa, o trabalho em equipe e a tomada de decisões rápidas em situações cotidianas relacionadas à sustentabilidade.

Os estudantes foram desafiados a identificar e coletar corretamente os resíduos, conforme a classificação solicitada. Observou-se que os participantes demonstraram agilidade no processo de identificação, evidenciando a internalização dos conhecimentos abordados previamente. Além disso, a dinâmica favoreceu o desenvolvimento de habilidades cognitivas e socioemocionais, como cooperação e organização.

A rapidez na identificação e localização dos resíduos indicaram que os estudantes não apenas memorizaram informações, mas compreenderam sua aplicação prática, o que é fundamental para a formação de cidadãos conscientes e comprometidos com práticas sustentáveis.

Dessa forma, a atividade mostrou-se eficaz como estratégia pedagógica, ao integrar teoria e prática em um contexto significativo, contribuindo para o fortalecimento da educação ambiental no ambiente escolar.

A Figura 01 ilustra um dos momentos da atividade, no qual os estudantes realizaram a identificação dos resíduos de maneira eficiente e colaborativa.



Figura 01: Estudantes participando "Corrida da Coleta Seletiva".
Fonte: Autores (2025)

Apesar dos alunos terem apresentado um bom desempenho na "Corrida da Coleta Seletiva", a dinâmica evidenciou incertezas com alguns resíduos, como, por exemplo, a lata de spray de óleo lubrificante. O grupo associou esse resíduo à categoria metal, devido à composição metálica da lata. No entanto, a atividade possibilitou esclarecer que, por ser um resíduo inflamável e tóxico, ele deve ser classificado na categoria de resíduos da logística reversa, e não como metal reciclável comum. Esses erros pontuais foram essenciais para o processo pedagógico, uma vez que as lacunas de conhecimento detectadas durante a prática permitiram intervenções imediatas.

A segunda atividade prática realizada na Escola foi o "Desafio de Perguntas" (Figura 02), que teve como propósito incentivar os estudantes a mobilizarem seus conhecimentos prévios com as novas experiências vivenciadas ao longo das atividades.



Figura 02: Estudantes participando do "Desafio de Perguntas".
Fonte: Autores (2025)

As questões abordaram temas essenciais relacionados à gestão de resíduos, como a identificação da reciclabilidade de diferentes materiais, possibilidades de reutilização criativa no cotidiano e orientações específicas para um descarte ambientalmente adequado e seguro dos resíduos sólidos. Os estudantes foram instigados a justificar suas respostas, explicar seus raciocínios e propor alternativas viáveis, considerando impactos ambientais, sociais e até econômicos.

Devido à natureza discursiva do instrumento, observou-se um maior engajamento dos estudantes, que demonstraram autonomia ao elaborar respostas diversificadas. Muitos apresentaram soluções inovadoras para a reutilização de materiais, evidenciando não apenas a compreensão conceitual, mas também criatividade e senso de responsabilidade socioambiental.

As dúvidas não foram tratadas de forma isolada, mas incorporadas ao debate, permitindo que fossem exploradas sob diferentes perspectivas. Esse processo contribuiu para a construção de uma aprendizagem mais significativa, pois possibilitou que os estudantes compreendessem práticas adequadas para a gestão de resíduos sólidos.

O formato da dinâmica favoreceu a participação ativa dos estudantes, que se sentiram à vontade para expor suas ideias, questionar e complementar as falas dos colegas. Além disso, a presença dos pesquisadores do projeto, como mediadores do diálogo, ampliou as discussões, trazendo contribuições técnicas que enriqueceram ainda mais o processo formativo. Dessa forma, a integração entre escuta, fala e reflexão foi fundamental para a consolidação dos conceitos abordados.

Isidoro-Gonçalves, Unger e Carvalho (2024) realizaram um panorama das experiências educativas sobre resíduos sólidos na educação básica. Os autores destacaram que os temas mais debatidos foram “como separar corretamente os resíduos para a coleta seletiva, como fazer a reciclagem e como reutilizar materiais para a confecção de jogos e brinquedos”. Em geral, as práticas educativas foram tratadas como ações isoladas, com fim em si mesmas, sendo necessário estudos que articulem a educação ambiental com as demais disciplinas do currículo da educação básica.

Behling et al. (2020) observaram que as oficinas de educação ambiental realizadas em duas escolas foram bem-sucedidas, com interesse e cooperação dos estudantes nas atividades, destacando a importância do processo educativo construído pela troca de conhecimentos. Além disso, os autores verificaram que o uso de ferramentas como as oficinas, na união de conceitos estudados em sala de aula com a realidade, possibilitou aos educandos a visualização de práticas pertencentes ao seu dia a dia de forma lúdica, pois ao utilizar-se de uma atividade integradora e participativa, as crianças se enxergaram inseridas no contexto, começando a compreender seu papel social no meio ambiente, possibilitado a construção de valores éticos e de respeito aos outros seres e ao meio.

Em síntese, as atividades desenvolvidas, como a “Corrida da Coleta Seletiva” e o “Desafio de Perguntas”, demonstraram-se eficazes na articulação entre teoria e prática, promovendo uma aprendizagem significativa e participativa sobre a gestão de resíduos sólidos, fundamental para a formação de cidadãos conscientes, capazes de compreender seu papel social e ambiental.

Considerações Finais

A intervenção demonstrou que o uso de metodologias ativas, particularmente as baseadas em gamificação, é uma abordagem pedagógica eficiente para o ensino de educação ambiental no ambiente escolar.

As dinâmicas empregadas, ao incorporarem elementos lúdicos, desafios e atividades colaborativas, permitiram que os estudantes experimentassem na prática os conteúdos teóricos ligados à gestão de resíduos sólidos, o que facilitou uma melhor compreensão e assimilação dos conceitos.

Atividades como a “Corrida da Coleta Seletiva” e o “Desafio de Perguntas” ajudaram a desenvolver o pensamento crítico, o trabalho em equipe e a reflexão sobre a destinação adequada dos resíduos. Ademais, as dúvidas identificadas durante as atividades se mostraram como oportunidades de aprendizado, possibilitando o esclarecimento de conceitos e o aprofundamento da discussão sobre a relevância da gestão de resíduos e dos seus impactos ambientais.

Por fim, é possível concluir que práticas pedagógicas fundamentadas em metodologias participativas e interativas podem ter um impacto significativo no fortalecimento da consciência socioambiental dos estudantes. Ao integrar o conhecimento científico à vida cotidiana dos estudantes, ações como essa aumentam as chances de formar cidadãos mais conscientes, críticos e dedicados à criação de práticas sustentáveis e à gestão responsável dos resíduos sólidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Pró-Reitoria de Graduação (PROGRAD) e da Pró-Reitoria de Extensão Universitária e Cultura (PROEC) da UNESP, ao Centro de Estudos em Educação, Trabalho, Ambiente e Saúde (CEETAS) da FCT/UNESP, e a E.E.E.I. Coronel Francisco Whitacker, de Anhumas – SP, para a realização do presente estudo.

Referências Bibliográficas

BEHLING, Greici Maia; CORRÊA, Luciara Bilhalva; DOBKE, Denise; GOMES, Atila Martins Gomes; GONÇALVES, Carolina da Silva; KRÜGER, Márcio Francisco Denzer et al. Extensão e educação ambiental: Relato de experiência de uma turma do curso de pós-graduação em ciências ambientais em escolas nas cidades de Pelotas e Capão do Leão. *Revista Conexão UEPG*, v. 16, p. 1-17, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.5212/Rev.Conexao.v.16.14257.029. Acesso em 02 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 abr. 1999. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm. Acesso em: 6 abr. 2026.

ISIDORO-GONÇALVES, Lorrayne; UNGER, Roberto José Gervásio; CARVALHO, Anna Cristina Calçada. Resíduos sólidos na educação básica brasileira à luz da educação ambiental crítica: uma revisão integrativa. *SciELO Preprints*, 2024. Disponível em: https://preprints.scielo.org/index.php/scielo/preprint/view/9348. Acesso em: 17 mar. 2026.

MARCHI, Cristina Maria Dacach Fernandez; PIMENTEL, Patrícia Carla Barbosa; NASCIMENTO, Márcia Cristina Pinheiro. Os resíduos sólidos no contexto da educação ambiental, do ecossistema manguezal e da fotografia. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 25, p. 1-23, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/asoc/a/PwzdHbpWPvmN8f8fRL5QqtK/?lang=pt&format=pdf. Acesso em: 07 abr. 2026.

MESSEDER NETO, Hélio da Silva; MORADILLO, Edilson Fortuna de. O jogo no ensino de química e a mobilização da atenção e da emoção na apropriação do conteúdo científico: aportes da psicologia histórico-cultural. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 23, n. 2, p. 523-540, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ciedu/a/pdKYqFTNDWY3fwKK6B7Q4pr/. Acesso em: 07 abr. 2026.

OLIVEIRA, Neyla Cristiane Rodrigues de; OLIVEIRA, Francisca Carla Silva de; CARVALHO, Denis Barros de. Educação ambiental e mudanças climáticas: análise do Programa Escolas Sustentáveis. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 27, e21068, 2021. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ciedu/a/tNK3jw3zjzP9b8mkRmSt79s/. Acesso em: 07 abr. 2026.

TOMAZELLO, Maria Guiomar C.; FERREIRA, Tereza Raquel das Chagas. Educação ambiental: que critérios adotar para avaliar a adequação pedagógica de seus projetos? *Ciência & Educação*, Bauru, v. 7, n. 2, p. 199-207, 2001. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ciedu/a/nkMhjmWTYQ7zF67QHkytDJQ/. Acesso em: 07 abr. 2026.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL COMO FERRAMENTA DE TRANSFORMAÇÃO: PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS EM ESCOLAS DO ENSINO INFANTIL E FUNDAMENTAL

1 Diogo Pereira Soria, 2 Cassio Luiz Vellani, 3 Cristiane Aparecida da Silva Panari, 4 Mariene Coutinho Rodrigues, 5 Lyandra Mamede Cavecchia, 6 Lorenzo Calabrese Circelli, 7 Marília Vasconcellos Agnesini, 8 Isadora Alves Lovo Ismail

1 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: diogo.soria@sou.unaerp.edu.br; 2 Universidade de Ribeirão Preto / Instituto Federal de São Paulo, e-mail: cassio.vellani@sou.unaerp.edu.br; 3 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: cristiane.apanari@sou.unaerp.edu.br; 4 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: mariene.rodrigues@sou.unaerp.edu.br; 5 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: lyandra.cavecchia@sou.unaerp.edu.br; 6 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: lorenzo.circelli@sou.unaerp.edu.br; 7 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: magnesini@unaerp.br; 8 Universidade de Ribeirão Preto / Universidade de São Paulo, e-mail: iismail@unaerp.br.

Palavras-chave: Educação ambiental; Resíduos sólidos; Sustentabilidade.

Resumo

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos configura-se como um dos principais desafios ambientais contemporâneos, especialmente em países em desenvolvimento, exigindo a adoção de estratégias eficazes de educação e conscientização desde a educação básica. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo implementar e avaliar um conjunto de ações integradas de educação ambiental com foco na gestão de resíduos sólidos em escolas do ensino infantil e fundamental localizadas na região de Ribeirão Preto – SP. A pesquisa caracterizou-se como aplicada, de abordagem quali-quantitativa e caráter descritivo-exploratório, sendo estruturada a partir de um diagnóstico inicial das práticas de manejo de resíduos nas unidades escolares. A partir disso, foram desenvolvidos diferentes eixos de intervenção, incluindo atividades educativas (palestras e oficinas), elaboração de materiais didáticos, desenvolvimento de jogos virtuais educativos, implantação de sistemas de compostagem e vermicompostagem e ações de coleta seletiva com participação ativa dos alunos e da comunidade escolar. Os resultados evidenciaram elevado engajamento dos participantes e melhorias significativas no processo de ensino-aprendizagem. Observou-se aumento expressivo no nível de conhecimento dos estudantes sobre a correta separação de resíduos, passando de cerca de 20% para, aproximadamente, 80% após as intervenções. No âmbito ambiental, a implantação dos sistemas de compostagem e vermicompostagem possibilitou o desvio de, aproximadamente, 120 a 180 kg de resíduos orgânicos do descarte convencional, representando uma redução de 35% a 50% do volume gerado nas escolas avaliadas, além da produção de composto orgânico e biofertilizante utilizados em atividades pedagógicas. Adicionalmente, o uso de recursos lúdicos e tecnológicos demonstrou ser uma estratégia eficaz para ampliar o engajamento e a retenção do conhecimento, favorecendo a aprendizagem significativa. Apesar dos resultados positivos, foram identificados desafios relacionados à continuidade das ações, necessidade de capacitação docente e manutenção da infraestrutura. Conclui-se que a integração entre práticas ambientais e metodologias pedagógicas inovadoras constitui uma abordagem eficiente para a formação socioambiental dos estudantes, apresentando elevado potencial de replicação em outras instituições de ensino e contribuindo para o avanço de práticas sustentáveis no contexto educacional.

Introdução

O crescimento acelerado da geração de resíduos sólidos urbanos configura-se como um dos principais desafios socioambientais contemporâneos, especialmente em países em desenvolvimento. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, o Brasil gerou mais de 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos em 2022, sendo que uma parcela significativa ainda possui destinação inadequada (ABRELPE, 2023). Esse cenário resulta em impactos ambientais relevantes, como contaminação do solo e das águas, emissão de gases de efeito estufa e agravamento de problemas de saúde pública.

Dentre os resíduos gerados, os resíduos orgânicos representam mais de 50% do total, o que evidencia a importância de estratégias sustentáveis para sua gestão, como a compostagem e a vermicompostagem. Esses processos permitem a transformação da matéria orgânica em insumos agrícolas, como húmus e biofertilizantes, promovendo a valorização dos resíduos e reduzindo sua disposição em aterros (EDWARDS; ARANCON; SHERMAN, 2011; KIEHL, 2002). Além disso, quando aplicadas no ambiente escolar, essas práticas contribuem para o desenvolvimento de competências socioambientais e aprendizagem interdisciplinar.

Nesse contexto, a educação ambiental assume papel estratégico na construção de uma sociedade mais sustentável. De acordo com Sauvé (2005), a educação ambiental deve ir além da transmissão de conhecimentos, promovendo a formação de valores, atitudes e práticas voltadas à conservação ambiental. No Brasil, a Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999) e a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) reforçam a necessidade de incorporar a temática ambiental como eixo transversal no ensino, especialmente na educação básica (BRASIL, 2018).

A inserção da educação ambiental desde o ensino infantil é fundamental, uma vez que a infância constitui um período decisivo para a formação de hábitos e valores. Tilbury (1995) destaca que experiências práticas e contextualizadas são essenciais para a internalização de comportamentos sustentáveis. Nesse sentido, ações como coleta seletiva, compostagem e projetos escolares contribuem diretamente para a construção de uma consciência crítica e participativa.

Paralelamente, observa-se o avanço das tecnologias digitais no contexto educacional, o que tem transformado as práticas pedagógicas tradicionais. Segundo Prensky (2001), as novas gerações, denominadas "nativos digitais", apresentam maior engajamento em ambientes interativos e dinâmicos. Nesse cenário, os jogos digitais educativos emergem como ferramentas promissoras, capazes de integrar ludicidade e aprendizagem. Estudos indicam que a gamificação pode aumentar significativamente o engajamento e a retenção do conhecimento (GEE, 2003; CLARK; TANNER-SMITH; KILLINGSWORTH, 2016), sendo particularmente eficaz na abordagem de temas complexos, como sustentabilidade e gestão de resíduos (LOZANO et al., 2017).

Além disso, iniciativas que integram educação ambiental, práticas sustentáveis e tecnologias educacionais estão diretamente alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 4 (Educação de Qualidade) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) (ONU, 2015). Essas diretrizes reforçam a importância de promover mudanças comportamentais por meio da educação, preparando as novas gerações para enfrentar os desafios ambientais globais.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe a integração de diferentes estratégias de educação ambiental aplicadas ao contexto escolar, incluindo compostagem, vermicompostagem, coleta seletiva, desenvolvimento de materiais didáticos e utilização de jogos educativos digitais. A pesquisa foi desenvolvida em escolas do ensino infantil e fundamental da região de Ribeirão Preto – SP, buscando avaliar o impacto dessas ações na formação socioambiental dos professores, estudantes e na promoção de práticas sustentáveis no ambiente escolar.

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quali-quantitativa, com caráter descritivo e exploratório, desenvolvida a partir da implementação de um conjunto de ações integradas de educação ambiental em escolas do ensino infantil e fundamental localizadas em municípios da região de Ribeirão Preto – SP. A proposta metodológica foi estruturada de forma interdisciplinar, envolvendo práticas de gestão de resíduos sólidos, estratégias pedagógicas participativas e o uso de tecnologias educacionais.

O estudo foi realizado nas cidades de Ribeirão Preto – SP (cinco escolas municipais), Pradópolis – SP (uma escola municipal e uma escola particular) e Orlândia – SP (duas escolas municipais).

Inicialmente, foi realizado um diagnóstico situacional nas unidades escolares participantes, com o objetivo de identificar as práticas existentes relacionadas à geração, segregação e destinação de resíduos sólidos. Esse diagnóstico incluiu observações *in loco*, entrevistas informais com gestores e docentes, além da caracterização qualitativa dos resíduos gerados, com ênfase nos resíduos orgânicos provenientes da merenda escolar e nos resíduos recicláveis, especialmente plásticos.

A partir desse diagnóstico, foram implementadas ações estruturadas em diferentes eixos metodológicos complementares.

Atividades de Educação Ambiental

O primeiro eixo contemplou a realização de atividades de educação ambiental, incluindo palestras, oficinas e ações de sensibilização voltadas aos alunos e professores do ensino infantil e fundamental. Os temas abordados incluíram conceitos básicos de meio ambiente, gestão de resíduos sólidos, importância da reciclagem, uso racional da água e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). As atividades foram desenvolvidas de forma interativa, utilizando recursos audiovisuais e metodologias participativas, buscando estimular o pensamento crítico e a reflexão sobre práticas cotidianas.

Desenvolvimento de Materiais Didáticos e Jogos Virtuais Educativos

Esse eixo consistiu no desenvolvimento de materiais didáticos educativos, incluindo a elaboração de cartilhas voltadas ao público infantil e adolescente, bem como para professores das áreas de Ciências Ambientais. Uma das cartilhas foi dedicada à temática de resíduos sólidos, abordando conceitos como classificação dos resíduos e processos de compostagem e vermicompostagem em escolas. Outra foi dedicada à contextualização e classificação de resíduos sólidos com foco em reciclagem, tratamento, destinação, disposição final e impactos ambientais. E, por fim, uma outra cartilha foi desenvolvida com foco em educação ambiental de forma mais ampla, incluindo conceitos fundamentais, evolução histórica e a importância da sustentabilidade. Os materiais foram elaborados com linguagem acessível, elementos visuais e abordagem lúdica, visando facilitar a compreensão pelos professores e estudantes.

Adicionalmente, foi desenvolvido um projeto voltado à criação de jogos virtuais educativos como ferramenta de apoio à educação ambiental. Os jogos foram concebidos com base em princípios de gamificação, incorporando elementos como desafios, recompensas e progressão de fases. Os conteúdos abordados incluíram separação de resíduos, reciclagem, compostagem e práticas sustentáveis. O desenvolvimento dos jogos envolveu etapas de planejamento pedagógico, design de interface e programação, sendo posteriormente aplicados em atividades piloto com alunos do ensino fundamental.

Implantação de Sistemas de Compostagem e Vermicompostagem

O terceiro eixo consistiu na implantação de sistemas de compostagem e vermicompostagem em algumas escolas. Foram utilizados sistemas compostos por caixas plásticas empilháveis de polipropileno, organizadas em níveis: caixas superiores destinadas à degradação da matéria orgânica (sendo uma para vermicompostagem com minhocas da espécie *Eisenia fétida* e as demais para compostagem convencional) e uma caixa inferior destinada à coleta do biofertilizante líquido. As caixas superiores foram perfuradas para permitir a drenagem do líquido percolado. O substrato inicial foi composto por solo e material orgânico seco, como serragem, visando garantir condições adequadas de aeração e equilíbrio carbono/nitrogênio.

A implantação dos sistemas de compostagem e vermicompostagem foi realizada em duas escolas: CEEEF Egydio Pedreschi (Ribeirão Preto – SP) e Instituto Educacional Pradópolis – IEP Anglo (Pradópolis – SP. Na CEEEF Egydio Pedreschi, os resíduos orgânicos utilizados foram provenientes da merenda escolar, incluindo cascas de frutas, restos de legumes e verduras, sendo previamente segregados e armazenados em recipientes adequados. No Instituto Educacional Pradópolis – IEP Anglo, os resíduos orgânicos utilizados foram provenientes das residências dos alunos do 9º ano do ensino fundamental da instituição, tais como cascas de frutas e ovos, verduras e legumes, sendo previamente segregados e armazenados em recipientes adequados.

A alimentação dos sistemas foi realizada de forma gradual, com cobertura de material seco para controle de umidade e prevenção de odores. Durante a operação, foram monitorados parâmetros como temperatura e umidade, garantindo condições ideais para o desenvolvimento do processo biológico. O biofertilizante líquido gerado foi coletado periodicamente e utilizado em atividades pedagógicas, como hortas escolares e jardins.

Ressalta-se que no IEP Anglo, a atividade de compostagem e vermicompostagem estava englobada no projeto denominado “Salvar o planeta começa na lixeira da sua casa”, conforme imagem de divulgação apresentada na Figura 1, em parceria com a empresa Agnesini & Ismail e a Universidade de Ribeirão Preto, que parte do princípio de que pequenas atitudes no dia a dia têm grande impacto na preservação ambiental, incentivando a conscientização sobre a correta separação e destinação dos resíduos sólidos. A iniciativa buscou promover mudanças de comportamento por meio da educação ambiental, mostrando que a prática da coleta seletiva, a redução do consumo e o reaproveitamento de materiais são ações simples, mas fundamentais para diminuir a poluição, conservar recursos naturais e fortalecer a sustentabilidade. Ao envolver famílias, escolas e a comunidade, o projeto contribuiu para a formação de cidadãos mais responsáveis e comprometidos com o meio ambiente, reforçando que a transformação global começa com atitudes locais dentro de cada lar.



Figura 1: Imagem de divulgação do Projeto de Educação Ambiental “Salvar o planeta começa na lixeira da sua casa” desenvolvido no presente trabalho.
Fonte: Autores (2026).

Coleta Seletiva de Resíduos Recicláveis

O último eixo metodológico envolveu a implementação de ações de coleta seletiva de resíduos recicláveis. Em uma das unidades escolares (IEP Anglo) a ação foi desenvolvida dentro do projeto denominado “Salvar o planeta começa na lixeira da sua casa” (mencionado anteriormente), no qual os alunos foram incentivados a trazer resíduos recicláveis de suas residências, com foco em materiais plásticos. Foram disponibilizados pontos de coleta na escola e realizadas orientações sobre a correta segregação dos resíduos. Os materiais coletados foram posteriormente destinados a cooperativas de reciclagem da região, promovendo também a integração com a cadeia de gestão de resíduos sólidos.

Avaliação das Ações

A avaliação das ações implementadas foi realizada por meio de abordagem quali-quantitativa. Foram realizadas observações diretas durante as atividades, considerando aspectos como engajamento, participação e mudanças de comportamento. Também foram coletadas percepções de professores e gestores escolares sobre a efetividade das ações.

Os dados obtidos foram analisados de forma integrada, combinando análises descritivas dos resultados quantitativos com interpretação qualitativa das observações e relatos, permitindo uma avaliação abrangente do impacto das ações de educação ambiental no contexto escolar.

Todas as atividades foram conduzidas respeitando princípios éticos, garantindo a participação voluntária dos envolvidos e a confidencialidade das informações coletadas.

Resultados e Discussão

A implementação integrada das ações de educação ambiental nas escolas participantes evidenciou resultados expressivos tanto do ponto de vista ambiental quanto pedagógico, reforçando o potencial transformador de práticas interdisciplinares no ambiente escolar.

Atividades de Educação Ambiental

As atividades educativas, incluindo palestras e oficinas, apresentaram alto nível de aceitação e participação. Observações qualitativas indicaram aumento do interesse dos professores e alunos por temas ambientais e maior envolvimento em discussões relacionadas à sustentabilidade. Segundo a literatura, abordagens participativas e contextualizadas são mais eficazes na promoção da aprendizagem ambiental, pois estimulam o pensamento crítico e a reflexão (MORAN, 2018).

A Figura 2 traz algumas das atividades de educação ambiental desenvolvidas no presente trabalho, tais como apresentações relacionadas ao "Dia Mundial da Água" e oficinas de treinamento de compostagem e vermicompostagem.



Figura 2: Palestras e oficinais de treinamento realizadas no presente projeto de Educação Ambiental.
Fonte: Autores (2026).

Desenvolvimento de Materiais Didáticos e Jogos Virtuais Educativos

No que se refere aos materiais didáticos desenvolvidos, as cartilhas educativas mostraram-se ferramentas eficazes de apoio ao ensino, especialmente por utilizarem linguagem acessível e recursos visuais. Professores relataram que os materiais contribuíram para a continuidade das discussões em sala de aula, ampliando o alcance das ações do projeto.

A Figura 3 apresenta algumas páginas do "Manual de Compostagem e Vermicompostagem para Escolas", que foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar a implantação desses sistemas de tratamento de resíduos sólidos orgânicos em unidades escolares, contando com a participação de alunos e professores. A cartilha traz vários conceitos relacionados aos resíduos sólidos, com foco nos resíduos sólidos orgânicos, componentes de uma composteira e etapas de tratamento. Além do mais, também conta com conteúdos educativos, tais como vídeos relacionados aos assuntos abordados, atividades e jogos.



Figura 3: Temas abordados no "Manual de Compostagem e Vermicompostagem para Escolas" desenvolvido no presente projeto de Educação Ambiental.
Fonte: Autores (2025).

A Figura 4 mostra algumas páginas dos assuntos abordados na "Cartilha de Educação Ambiental", tais como evolução história, uso consciente da água e informações sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

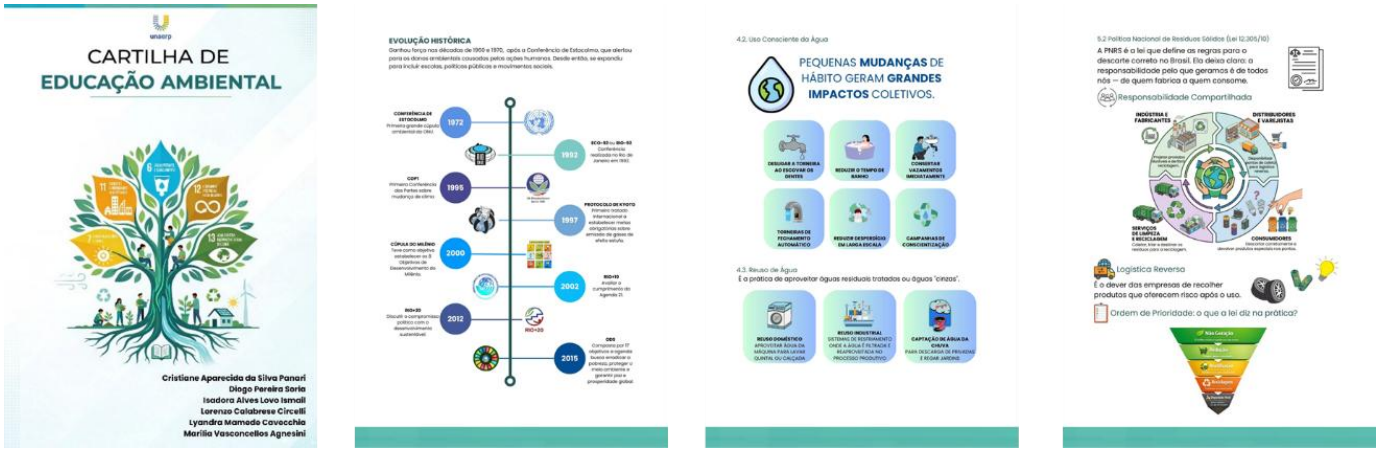


Figura 4: Assuntos abordados na "Cartilha de Educação Ambiental" desenvolvida no presente projeto.
Fonte: Autores (2026).

Destaca-se, ainda, o papel dos jogos virtuais educativos como ferramenta inovadora de ensino. A Figura 5 apresenta a tela inicial do jogo "Guardiões do Planeta" desenvolvido no presente projeto. Durante as aplicações piloto, verificou-se elevado nível de engajamento dos alunos. A comparação entre avaliações pré e pós-intervenção indicou um aumento no desempenho dos alunos em questões relacionadas à educação ambiental, evidenciando a efetividade do uso de recursos digitais no processo de aprendizagem. Esses resultados corroboram estudos de Clark, Tanner-Smith e Killingsworth (2016), que apontam ganhos significativos de aprendizagem associados ao uso de jogos digitais em contextos educacionais. Além disso, Lozano et al. (2017) destacam que ferramentas digitais podem contribuir para mudanças comportamentais sustentáveis, especialmente quando associadas a contextos reais, como o ambiente escolar, o que reforça os resultados do presente estudo.



Figura 5: Tela inicial do jogo "Guardiões do Planeta" desenvolvido no presente projeto.
Fonte: Autores (2026).

Implantação de Sistemas de Compostagem e Vermicompostagem

No que se refere à gestão de resíduos orgânicos, a implantação dos sistemas de compostagem e vermicompostagem demonstrou elevada eficiência operacional. Durante o período de monitoramento, estimou-se que, aproximadamente, 120 a 180 kg de resíduos orgânicos provenientes da merenda escolar foram desviados do descarte convencional, sendo reaproveitados nos sistemas implantados. Esse resultado representa uma redução estimada de cerca de 35% a 50% do volume de resíduos orgânicos gerados nas unidades escolares avaliadas, evidenciando o potencial da técnica como estratégia de minimização de resíduos.

A Figura 6 mostra alunos participantes do presente projeto preparando e organizando as composteiras para implantação dos sistemas de compostagem e vermicompostagem e a Figura 7 apresenta os sistemas de compostagem e vermicompostagem instalados na escola CEEEF Egydio Pedreschi.



Figura 6: Participantes do projeto preparando e organizando os sistemas de compostagem e vermicompostagem.
Fonte: Autores (2025).



Figura 7: Sistemas de Compostagem e Vermicompostagem instalados na escola CEEEF Egydio Pedreschi.
Fonte: Autores (2025).

Os parâmetros operacionais monitorados apresentaram comportamento adequado ao longo do processo, com temperaturas mantidas na faixa mesofílica (entre 18 °C e 30 °C) e umidade média entre 60% e 70%, condições consideradas ideais para o desenvolvimento da espécie *Eisenia fetida* e para a atividade microbiológica. Esses resultados corroboram estudos clássicos da área, que indicam que a estabilidade desses parâmetros é essencial para a eficiência do processo de vermicompostagem (EDWARDS; ARANCON; SHERMAN, 2011).

A produção de biofertilizante líquido atingiu volumes aproximados de 8 a 12 litros em cada sistema de compostagem, totalizando de 50 a 70 litros por ciclo operacional em uma unidade escolar, sendo aplicado em hortas e jardins escolares após sua diluição, promovendo o fechamento do ciclo de nutrientes no próprio ambiente educacional. Esse resultado é consistente com Colombari Filho et al. (2023), que destacam a viabilidade da vermicompostagem como fonte de insumos agrícolas em pequena escala.

A Figura 8 apresenta, respectivamente, o adubo orgânico produzido pela vermicompostagem (húmus), pela compostagem e o biofertilizante líquido proveniente dos sistemas.



Figura 8: Adubo orgânico proveniente dos sistemas de compostagem e vermicompostagem, sendo o composto produzido pela vermicompostagem, pela compostagem e o biofertilizante líquido, respectivamente.
Fonte: Autores (2025).

Do ponto de vista pedagógico, observou-se que a participação direta dos alunos nas atividades de manejo dos sistemas favoreceu a aprendizagem significativa, uma vez que permitiu a associação entre teoria e prática. De acordo com Loureiro e Layrargues (2014), a vivência prática é um elemento fundamental para a consolidação da educação ambiental crítica, o que foi evidenciado no presente estudo.

Coleta Seletiva de Resíduos Recicláveis

Em relação à coleta seletiva, o projeto "Salvar o planeta começa na lixeira da sua casa" apresentou resultados relevantes no engajamento dos alunos e na mobilização da comunidade escolar. Observou-se um aumento progressivo na participação dos estudantes ao longo das primeiras semanas de implementação.

A mudança de comportamento dos alunos também foi evidenciada por meio de avaliações diagnósticas. Antes das intervenções, apenas cerca de 20% dos alunos demonstravam conhecimento adequado sobre separação de resíduos. Após as atividades, esse percentual aumentou para, aproximadamente, 80%, indicando ganho significativo de aprendizagem. Esses resultados estão em consonância com estudos que apontam a eficácia de programas de educação ambiental na modificação de atitudes e comportamentos (SAUVÉ, 2005; TILBURY, 1995).

Avaliação das Ações

De forma integrada, os resultados evidenciam que a combinação de práticas ambientais concretas (como compostagem e reciclagem) com estratégias pedagógicas inovadoras (como jogos e materiais didáticos) potencializa o processo de aprendizagem e promove mudanças comportamentais mais consistentes. Essa abordagem sistêmica está alinhada aos princípios da educação para o desenvolvimento sustentável e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015).

Entretanto, alguns desafios foram identificados, como a necessidade de manutenção contínua dos sistemas de compostagem, capacitação permanente dos professores e garantia de infraestrutura adequada para a implementação das atividades. Esses fatores são frequentemente apontados na literatura como limitações para a consolidação de projetos de educação ambiental em larga escala (LOUREIRO; LAYRARGUES, 2014).

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos indicam que o modelo proposto apresenta elevada viabilidade técnica e pedagógica, com potencial de replicação em outras instituições de ensino. A integração entre teoria e prática, aliada ao uso de tecnologias educacionais, mostrou-se uma estratégia eficaz para promover a formação de cidadãos mais conscientes e comprometidos com a sustentabilidade.

Considerações Finais

O presente estudo evidenciou que a integração de diferentes estratégias de educação ambiental no contexto escolar constitui uma abordagem eficaz para a promoção da sustentabilidade e para a formação de cidadãos mais conscientes e comprometidos com as questões socioambientais. A implementação conjunta de ações como compostagem, vermicompostagem, coleta seletiva, desenvolvimento de materiais didáticos e utilização de jogos virtuais educativos mostrou-se capaz de potencializar o processo de ensino-aprendizagem, tornando-o mais dinâmico, participativo e significativo.

Os resultados demonstraram avanços expressivos tanto no engajamento dos estudantes quanto na assimilação de conhecimentos relacionados à gestão de resíduos sólidos, refletindo em mudanças concretas de comportamento, como a correta segregação de resíduos e maior conscientização ambiental no ambiente escolar e familiar. Destaca-se, ainda, a relevância das metodologias ativas e do uso de tecnologias educacionais como ferramentas facilitadoras da aprendizagem, especialmente quando associadas a práticas reais e contextualizadas.

Do ponto de vista ambiental, a adoção de sistemas de compostagem e vermicompostagem contribuiu significativamente para a redução do volume de resíduos orgânicos destinados ao descarte convencional, além de promover o reaproveitamento desses materiais na forma de insumos agrícolas, fortalecendo a lógica da economia circular dentro das escolas.

Apesar dos resultados positivos, o estudo também evidenciou desafios relacionados à necessidade de manutenção contínua das ações, capacitação permanente dos professores e de infraestrutura adequada, aspectos essenciais para a consolidação e expansão dessas iniciativas.

Dessa forma, conclui-se que o modelo proposto apresenta elevada viabilidade técnica, pedagógica e ambiental, podendo ser replicado e adaptado a diferentes realidades educacionais. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a ampliação do período de monitoramento das ações e a inclusão de indicadores quantitativos mais robustos, visando aprofundar a avaliação dos impactos a longo prazo. Por fim, reforça-se que a educação ambiental, quando aplicada de forma integrada e prática, desempenha papel fundamental na construção de uma sociedade mais sustentável.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Bolsas de Iniciação Científica da Universidade de Ribeirão Preto (PIBIC-UNAERP), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) PROSUP (bolsa número 88887.830910/2023 00), aos cursos de graduação em Engenharia Química (UNAERP) e de pós-graduação em Tecnologia Ambiental (UNAERP), ao Laboratório de Processos e Materiais – ProMat (UNAERP), à Cooperativa de Reciclagem de Ribeirão Preto (CRRP), ao Instituto Educacional Pradópolis – IEP Anglo, à Agnesini & Ismail Ambiental e à Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto.

Referências Bibliográficas

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023*. São Paulo: ABRELPE, 2023.

BRASIL. *Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999*. Dispõe sobre a educação ambiental e institui a Política Nacional de Educação Ambiental. Brasília, DF: Presidência da República, 1999.

BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Presidência da República, 2010.

BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: MEC, 2018.

CAMPOS, A. L. de O.; BLUNDI, C. E. Avaliação de matéria orgânica em compostagem: metodologia e correlações. In: *Gestión ambiental en el siglo XXI*. Lima: APIS, 1998. p. 1–17.

CLARK, D. B.; TANNER-SMITH, E. E.; KILLINGSWORTH, S. S. Digital games, design, and learning: A systematic review and meta-analysis. *Review of Educational Research*, v. 86, n. 1, p. 79–122, 2016.

COLOMBARI FILHO, D. et al. Utilização da vermicompostagem e da compostagem para tratamento de resíduos sólidos orgânicos gerados em uma instituição de ensino superior privada. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 16, n. 12, p. 32709–32727, 2023.

DIAS, N. S. et al. Biofertilizantes líquidos: composição e aplicação na agricultura. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 12, n. 3, p. 409–415, 2017.

EDWARDS, C. A.; ARANCON, N. Q.; SHERMAN, R. *Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management*. Boca Raton: CRC Press, 2011.

EDWARDS, C. A.; BOHLEN, P. J. *Biology and ecology of earthworms*. 3. ed. London: Chapman & Hall, 1996.

GEE, J. P. *What video games have to teach us about learning and literacy*. New York: Palgrave Macmillan, 2003.

KARMEGAM, N.; DANIEL, T. Effect of vermicomposting on the growth and yield of crops. *Journal of Environmental Biology*, v. 30, n. 5, p. 697–701, 2009.

KIEHL, E. J. *Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto*. 4. ed. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2002.

LOUREIRO, C. F. B.; LAYRARGUES, P. P. *Educação ambiental: repensando o espaço da cidadania*. 5. ed. São Paulo: Cortez, 2014.

LOZANO, R. et al. Teaching sustainability in higher education: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, p. 1–13, 2017.

MORAN, J. *Metodologias ativas para uma educação inovadora*. Campinas: Papirus, 2018.

NOGUEIRA, M. A. et al. Compostagem e vermicompostagem: fundamentos e aplicações. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 9, p. 1001–1008, 2013.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. Nova York: ONU, 2015.

PRENSKY, M. Digital natives, digital immigrants. *On the Horizon*, v. 9, n. 5, p. 1–6, 2001.

SAUVÉ, L. Currents in environmental education: Mapping a complex and evolving pedagogical field. *Canadian Journal of Environmental Education*, v. 10, p. 11–37, 2005.

SENA, L. M. et al. Compostagem e vermicompostagem como alternativa para tratamento de resíduos orgânicos. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 14, n. 2, p. 266–272, 2019.

PLANTAS MEDICINAIS COMO FERRAMENTA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL: SABERES TRADICIONAIS E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE NO CONTEXTO AMAZÔNICO

1 Silvana Heloísa Ferreira Cruz, 2 Aurilene Sales de Carvalho, 3 Davi Cruz Fernandes

1 Dra., UFAM, Brasil, Centro de Ciências do Ambiente/Universidade Federal do Amazonas, silvanaheloisa@ufam.edu.br, 2 Professora especialista, SEMED, Brasil, aurilene19@hotmail.com, 3 Engenheiro SEMMAS, dcfmetal@gmail.com

Palavras-chave: Plantas Medicinais; Tradições Populares; Saúde.

Resumo

As plantas medicinais têm sido utilizadas ao longo da história como recursos terapêuticos no tratamento e na prevenção de diversas enfermidades, constituindo um importante patrimônio cultural e científico. Este artigo tem como objetivo apresentar, analisar e refletir sobre o uso terapêutico das plantas medicinais por moradores do bairro Colônia Terra Nova na cidade de Manaus visando a interação entre homem, natureza e sociedade, tão necessária para a sustentabilidade. A metodologia adotada baseia-se em pesquisa bibliográfica, com levantamento de dados em livros, artigos científicos e documentos oficiais relacionados à fitoterapia e à saúde pública e a pesquisa de campo com abordagem qualitativa e caráter exploratório. A originalidade deste artigo está na investigação do potencial terapêutico de espécies medicinais. Sua relevância reside na possibilidade de contribuir de forma sustentável e acessível a medicação caseira, valorizando a biodiversidade e o saber tradicional das comunidades locais.

Os resultados evidenciam a importância do uso terapêutico das plantas medicinais na comunidade fortalecendo a conscientização sobre a necessidade de conservar as espécies. As contribuições teóricas/metodológicas baseiam-se na revisão bibliográfica que permitiu uma análise ampla e fundamentada sobre uso terapéutico das plantas medicinais, e em documentos oficiais como: A Lei 9.795/99 da Política Nacional de Educação Ambiental, Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 1998), Organização Mundial de Saúde (OMS), Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, ODS 3 – Saúde e Bem-Estar, Organização das Nações Unidas (ONU**)** e autores como: Boff (2012), Minayo (2001), Gil (2010), entre outros.

Introdução

A diversidade biológica abrange diversas formas de organismos vivos e vários ecossistemas (DIEGUES, 2000). Entre os componentes que fazem parte dessa biodiversidade, estão as plantas medicinais as quais são administradas ao homem ou animal, por qualquer via ou forma que exerça atividade terapêutica (ALMASSY et al.2005). Este artigo tem como objetivo apresentar, analisar e refletir sobre o uso terapêutico das plantas medicinais por moradores do bairro Colônia Terra Nova na cidade de Manaus visando a interação entre homem, natureza e sociedade, tão necessária para a sustentabilidade. Manaus é a capital do Amazonas, está localizada à margem esquerda do rio negro na região norte do Brasil. "Ambientes ricos em biodiversidade costumam abrigar uma grande variedade de espécies vegetais com potencial terapêutico, muitas das quais são utilizadas pela população local no tratamento de diversas enfermidades". Na região amazônica as comunidades tradicionais detêm vasto conhecimento sobre o uso de plantas medicinais, porém, essas práticas vêm sofrendo interferência direta da medicina ocidental moderna, e da falta de interesse da população jovem em relação aos usos desses saberes, ameaçando o desaparecimento da transmissão oral transgeracional (AMOROZO, 2002). A biodiversidade também é uma questão de educação, porque apesar do Brasil ter a maior floresta tropical do mundo ainda não tivemos condições de incluir os ecossistemas nas práticas de educação formal e não formal (JOHN, 2006), os quais serviriam de base para contextualização do ensino a partir da realidade. Educar a partir da biodiversidade é educar para a sustentabilidade, através de um projeto de educação que valorize as interrelações entre homem e natureza (GADOTTI, 1998).

Referencial Teórico

A Amazônia constitui um dos ecossistemas mais ricos em biodiversidade do planeta, reunindo inúmeras espécies de plantas com propriedades medicinais utilizadas há séculos por comunidades tradicionais e povos indígenas. Essa riqueza natural representa, segundo Boff (2012), um dos maiores patrimônios da Terra e é fundamental para a manutenção da vida e do equilíbrio ecológico.

1. Saberes Tradicionais e Conhecimento Científico

O conhecimento tradicional sobre as plantas medicinais amazônicas tem sido transmitido ao longo das gerações por meio da oralidade e da prática cotidiana. Comunidades ribeirinhas e indígenas fazem uso dessas plantas para tratar diversas doenças, demonstrando uma relação harmoniosa e sustentável com a natureza. A ciência moderna tem reconhecido a relevância desse conhecimento, realizando pesquisas que comprovam a eficácia de muitas espécies. De acordo com a Organização Mundial de Saúde, 80% da população mundial usa algum tipo de planta medicinal (OMS, 2019). Este enfoque

ampliado não apenas oferece opções terapêuticas, mas também empodera os indivíduos, capacitando-os a participar ativamente de seu processo de cura. Nesse cenário, é crucial promover a pesquisa e a educação continuada sobre o uso seguro e eficaz das plantas medicinais, garantindo a qualidade e a efetividade dessas práticas no contexto da Atenção Primária à Saúde. Assim, a integração entre saberes tradicionais e o conhecimento científico pode fortalecer a educação ambiental ao demonstrar a interdependência entre a preservação da biodiversidade e o bem-estar humano. Assim, como preconiza. A Lei 9.795/99 da Política Nacional de Educação Ambiental, que define a Educação Ambiental como sendo:

> Processos que constroem valores e conhecimentos voltados à conservação do meio ambiente, buscando uma relação mais harmônica entre os indivíduos e a natureza. nesse contexto, visa não apenas conscientizar sobre a importância da floresta, mas também valorizar as práticas culturais das populações locais (BRASIL,1999).

A referida lei amplia o papel da educação ao integrar dimensões sociais, culturais, éticas e ambientais, reconhecendo a indissociabilidade entre ser humano e natureza. Além disso, ao enfatizar a participação social e a valorização dos saberes locais, a Política Nacional de Educação Ambiental contribui para a construção de uma consciência crítica e cidadã, essencial para o enfrentamento dos desafios socioambientais contemporâneos e para a promoção do desenvolvimento sustentável (BRASIL, 1999).

2. A Importância da Educação Ambiental na Conservação da biodiversidade

A educação ambiental desempenha um papel fundamental na formação de indivíduos conscientes sobre a importância da biodiversidade e dos recursos naturais. Projetos educacionais podem incluir a criação de hortas escolares com espécies medicinais, oficinas com práticas sustentáveis e visitas a comunidades tradicionais para aprender diretamente com seus moradores. De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 1998), a transversalidade permite a articulação entre o conhecimento científico e as questões sociais, possibilitando uma abordagem integrada do saber.

Essas iniciativas não apenas incentivam o respeito à cultura local, mas também promovem a conservação dos recursos naturais ao sensibilizar os estudantes sobre os impactos do desmatamento e da exploração predatória. Dessa forma, o ensino sobre plantas medicinais pode ser um caminho para despertar o interesse pela sustentabilidade e pelo uso racional dos recursos naturais da Amazônia.

3. O uso e a importância das Plantas Medicinais

As plantas medicinais desempenham um papel crucial na saúde e no bem-estar Tal perspectiva dialoga diretamente com a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, especialmente com a ODS 3 – Saúde e Bem-Estar, que visa assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em toda as idades, ao reconhecer que fatores ambientais, sociais e educacionais são determinantes para a saúde humana (ONU, 2015). E as comunidades amazônicas não apenas fornecem remédios naturais, mas também preservam o conhecimento ancestral das populações indígenas e ribeirinhas da região. Além disso, a utilização dessas plantas promove a sustentabilidade e a conservação da biodiversidade. Assinala a Política Nacional do Meio Ambiente Lei nº 6.938/1981 que define instrumentos para a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental, princípios que também orientam o manejo sustentável das espécies vegetais medicinais (BRASIL,1981).

Assim, a (Lei nº 6.938/1981) foi criada com o objetivo de preservar, melhorar e recuperar a qualidade ambiental, assegurando condições para o desenvolvimento sustentável e para a saúde e bem-estar das populações. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) ao definir saúde, desde 1948, como um estado de completo bem-estar físico, mental e social, e não apenas a ausência de doenças ou enfermidades. Este conceito holístico abrange a qualidade de vida, fatores socioeconômicos e ambientais, e não apenas o aspecto biológico. Portanto é fundamental a propagação desse conhecimento entre os cidadãos. De acordo com a pesquisa realizada pode - se observar de forma mais evidente o uso de algumas plantas medicinais conforme a tabela abaixo:

Tabela 1- Plantas medicinais mais citadas durante a pesquisa.

Arruda- Nome científico (Ruta graveolens L. Família: Rutaceae Juss  Parte utilizada- folha; Principais usos medicinais: Cólicas, dor de ação calmante, anti-inflamatória auxilia na digestão; Forma de uso comum: Chá, ou suco	**Boldo– Nome científico (Peumus boldus)**  Parte utilizada- folha; Principais usos medicinais: Problemas digestivos, fígado, má digestão Forma de uso comum: Chá.

Capim santo– Nome científico (Cymbopogon citratus (DC.) Stapf., Poaceae



Parte utilizada- folha
Principais usos medicinais: Problemas digestivos, fígado, má digestão
Forma de uso comum: Chá**.**

Erva-cidreira – Nome científico (Melissa officinalis)



Parte utilizada- folha
Principais usos medicinais: Ansiedade e estresse, insônia, má digestão, gases e cólicas, dores de cabeça, anti-inflamatório. Pode ser usada em produtos cosméticos.
Forma de uso comum: Chá.

Elixir-paregórico- Nome científico (Papaver somniferum L. e Ocimum selloi Benth.)



Parte utilizada- folha
Principais usos medicinais: Dores estomacais e intestinais, Cólicas gastrointestinais e espasmos. Excesso de gases intestinais.
Forma de uso comum: Chá.

Hortelã- Nome científico ((Mentha spicata)



Parte utilizada- folha
Principais usos medicinais: Má digestão, cólicas, gases e inchaço, gripes e resfriados.
Forma de uso comum: Chá.

Mastruz – Nome científico (Dysphania ambrosioides)



Parte utilizada- folha
Principais usos medicinais: Problemas respiratórios), má digestão, vermes intestinais, cicatrização de feridas e fortalecer o sistema imunológico.
Forma de uso comum: Chá, suco.

Malvarisco- Nome científico (*Malva* ou *Plectranthus amboinicus*)



Parte utilizada- folha
Principais usos medicinais: inflamações uterinas e ginecológicas devido às suas propriedades anti-inflamatórias, analgésicas e antimicrobianas.
Forma de uso comum: Chá, suco.

Açafrão- Nome científico (*Curcuma longa* L.)



Parte utilizada- folha e raiz
Principais usos: anti-inflamatório, dores articulares (artrite), digestão, fortalecer o sistema imunológico, fígado
Forma de uso comum: chás, sopas, molhos e como tempero.

Pobre-velho- Nome científico (*Costus spicatus* (Jacq.) Sw)



Parte utilizada- folha
Principais usos medicinais: infecções urinárias e inflamações,
Forma de uso comum: Chá,

Autores: (Carvalho& Cruz & Fernandes (2026).

Material e Métodos

O referencial teórico foi construido através de pesquisas em livros, artigos científicos, relatórios institucionais e documentos técnicos publicados por organizações, publicações eletrônicas confiáveis, dissertações, teses e periódicos. Após a realização do levantamento da bibliografía deu-se início à pesquisa bibliográfica, com abordagem qualitativa e caráter exploratório. Segundo Gil (2010). A pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, visando torná-lo mais explícito ou construir hipóteses. E para Minayo (2001) a abordagem qualitativa, valoriza a interpretação dos fenômenos e atribui significado às ações e relações humanas, considerando a complexidade do contexto estudado.

Assim, este trabalho utilizou a pesquisa bibliográfica e a pesquisa de campo, tendo como objetivo, apresentar, analisar e refletir sobre o uso terapêutico das plantas medicinais por moradores do bairro Colônia Terra Nova na cidade de Manaus visando a interação entre homem, natureza e sociedade tão necessária para a sustentabilidade.

A investigação foi conduzida por meio da leitura crítica de fontes selecionadas, com ênfase em autores reconhecidos na área de estudo. Foram utilizados como critérios de seleção: relevância para o tema e confiabilidade das fontes.

A análise das obras selecionadas permitiu identificar conceitos centrais, debates acadêmicos, lacunas de pesquisa e possíveis contribuições para o aprofundamento do tema proposto. A abordagem adotada permitiu compreender o fenômeno estudado a partir da interpretação dos conteúdos encontrados na literatura.

Resultados e Discussão

As entrevistas foram realizadas com sessenta e cinco participantes moradores do bairro Colônia Terra Nova.

Tabela 2- Faixa etária e sexo dos entrevistados.

FAIXA ETÁRIA	15 - 21 anos	22 – 30 anos	31 - 40 anos	41 – 59 anos	Acima de 60 anos
Homens	02	03	02	03	05
Mulheres	05	08	10	12	15

Autores: (Carvalho& Cruz & Fernandes (2026)

Tabela 3 - Distribuição dos participantes da pesquisa quanto ao exercício da atividade profissional.

Exercício da atividade profissional	Quantidade de participantes
Aposentado (a)	15
Recebe auxílio-doença	08
Empregado (a)	30
Desempregado (a)	12

Autores: (Carvalho& Cruz & Fernandes (2026)

Tabela 4 – Distribuição dos participantes da pesquisa quanto ao grau de instrução.

Grau de instrução	Quantidade de participantes
Ensino Fundamental I (incompleto)	07
Ensino Fundamental I (completo)	08
Ensino Médio (incompleto)	05
Ensino Médio (completo)	12
Superior (incompleto)	10
Superior (completo)	12
Curso Técnico Profissionalizante	06
Especialista	03
Mestrado	02

Autores: (Carvalho& Cruz & Fernandes (2026)

De acordo com a pesquisa realizada foi possível compreender percepções, práticas e significados atribuídos ao uso terapêutico das plantas medicinais. A análise qualitativa das respostas permitiu a construção de três categorías temáticas: **(1) Conhecimento tradicional e transmissão cultural**, **(2) Uso terapêutico e práticas de cuidado**, **e (3) Sustentabilidade e legislação ambiental**.

1. Conhecimento tradicional e transmissão cultural

As falas dos entrevistados evidenciam que o uso das plantas medicinais é fortemente influenciado pela transmissão oral de saberes, principalmente entre gerações familiares. Esse conhecimento é percebido como uma forma legítima e eficaz de cuidado com a saúde. Conforme as respostas dos moradores, a seguinte pregunta: Como ocorre a transmissão do conhecimento sobre o uso de plantas medicinais entre as gerações na sua casa e de que forma esse processo contribui para a melhoria da saúde entre os familiares?

(M1) “Contribui positivamente pois, aprendi com minha avó a fazer chá de boldo e hortelã, e até hoje uso quando estou com dor de estômago e na maioria das vezes não preciso ir comprar remédios.

(M2) “Essas receitas passaram das nossas avós, para nossa mãe que nos ensina hoje e a gente confia porque sempre funcionaram

Os depoimentos comprovam o que afirma Diegues (2000**)**, ao reconhecer o saber popular como um importante patrimônio cultural e ecológico, transmitido de forma empírica e adaptado ao contexto local. Nesse sentido, a Política Nacional de Plantas Medicinais e Fitoterápicos (Decreto nº 5.813/2006) enfatiza a valorização e a preservação dos conhecimentos tradicionais como parte integrante das ações de promoção da saúde.

A presença desse saber tradicional no cotidiano dos participantes demonstra que o uso das plantas medicinais não se limita a uma prática curativa, mas constitui também uma forma de resistência cultural e de manutenção da identidade comunitária.

2. Uso terapêutico e práticas de cuidado

As entrevistas revelaram que o uso de plantas medicinais é amplamente difundido entre os participantes, tanto para o tratamento de sintomas leves quanto como medida preventiva. Conforme as respostas dos moradores, a seguinte pregunta: Qual a importância do uso terapêutico de plantas medicinais na promoção da sua saúde?

(M3) “Aqui a gente usa muito a erva-cidreira pra ansiedade e o mastruz pra gripe, quase todo mundo tem no quintal”.

(M4) “Sim uso chá pois, nem sempre dá pra comprar remédio, e as plantas ajudam bastante.”

(M5) “Ô as plantas medicinais ajudam muito, sempre tomo chá , faço para minhas filhas e continuo cultivando no quintal;



Autores: (Carvalho & Cruz & Fernandes (2026)

Esses relatos indicam que as plantas medicinais são vistas como recursos acessíveis e eficazes, sobretudo em contextos de vulnerabilidade econômica. Segundo Matos (1998), as plantas medicinais representam uma alternativa terapêutica de baixo custo e com potencial para complementar o tratamento alopático, desde que utilizadas de forma racional e com base em conhecimento técnico ou científico.

Além disso, a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2002) reconhece a fitoterapia como prática relevante para a atenção primária à saúde, desde que associada à segurança, à eficácia e à conservação das espécies vegetais. Dessa forma, observa-se que o uso das plantas, entre os entrevistados, está relacionado tanto ao saber empírico quanto à busca por alternativas naturais para o cuidado cotidiano.

3. Sustentabilidade e legislação ambiental

No que se refere à sustentabilidade, parte dos entrevistados demonstrou preocupação com a preservação das espécies e com o uso consciente dos recursos naturais. Para Boff (2012), a sustentabilidade envolve uma nova forma de convivência entre os seres humanos e a natureza. Conforme as respostas dos moradores, a seguinte pregunta: Como a legislação ambiental brasileira influencia o uso sustentável e a conservação das plantas medicinais utilizadas pelas comunidades locais da Amazônia?

(M6) “A gente planta mais do que colhe, para não acabar. Se tirar da natureza, tem que replantar.”

(M7) “Tem planta que o pessoal arranca tudo e depois não acha mais.”

Essas falas refletem práticas de manejo sustentável, em consonância com os princípios estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981), que preconiza o uso racional dos recursos naturais e a proteção da biodiversidade. Contudo, também foi observado o desconhecimento sobre a legislação específica que regula o uso e a proteção das espécies medicinais. Evidenciado na fala do morador (M8) “A gente sabe que tem lei pra proteger as plantas, mas não sabe direito qual é.”

Tal percepção evidencia a necessidade de estratégias educativas que promovam o conhecimento sobre a Lei da Biodiversidade (Lei nº 13.123/2015), a qual dispõe sobre o acesso ao patrimônio genético e ao conhecimento tradicional associado. Segundo Moran (2002), a transversalidade no ensino permite integrar temas como meio ambiente, cultura e saúde, estimulando reflexões críticas sobre práticas sustentáveis e valorização do saber popular.

Dessa forma, se observa que o fortalecimento da educação ambiental pode contribuir para o uso consciente das plantas medicinais e para a conservação dos recursos naturais.

Portanto, os resultados demonstram que o uso das plantas medicinais está fortemente enraizado nas práticas culturais e terapêuticas dos participantes, sendo transmitido entre gerações como forma de cuidado e de pertencimento social. Constata-se, contudo, a necessidade de ampliar o conhecimento científico sobre o uso racional e sustentável dessas espécies.

Assim, este estudo reforça a importância de articular saberes tradicionais e científicos, em uma perspectiva de educação ambiental e saúde coletiva, promovendo a valorização da biodiversidade e o reconhecimento das práticas populares como parte do patrimônio cultural e ecológico brasileiro.

Considerações Finais

Diante dessa revisão integrativa da literatura é possível despertar o leitor a buscar a cura por meio dos segredos milenares da Amazônia, relacionados ao uso tradicional das plantas medicinais. Mostrando que o uso de plantas medicinais ainda é um importante recurso utilizado para a manutenção da saúde de muitas comunidades carentes, onde são utilizadas para tratamentos comuns de saúde, tendo em vista que o custo é mais acessível à população, em comparação aos medicamentos obtidos por síntese química, que são em geral mais caros, devido às patentes tecnológicas envolvidas.

O uso de plantas medicinais no bairro Colônia Terra Nova na cidade de Manaus reflete a rica herança cultural e o conhecimento botânico das populações locais. Enquanto a pesquisa científica continua a explorar o potencial terapêutico dessas plantas, é crucial respeitar e preservar o conhecimento tradicional que já existe. Além disso, a exploração sustentável dessas plantas pode contribuir para a conservação da floresta e o desenvolvimento econômico da região**.**

A relação entre as plantas medicinais da Amazônia e a educação ambiental é um exemplo da importância de integrar o conhecimento tradicional com as práticas pedagógicas modernas. Valorizar e disseminar esses saberes contribui para a preservação da biodiversidade e fortalece a identidade cultural das comunidades locais. A educação ambiental, quando aliada ao uso consciente das plantas medicinais, se torna uma ferramenta essencial para garantir a sustentabilidade da maior floresta tropical do mundo e para incentivar novas gerações a se tornarem agentes ativos na proteção do meio ambiente.

Além disso, o uso de plantas medicinais, pode ser um importante aliado na promoção da saúde na atenção primária. É importante ressaltar que diversos estudos têm sido desenvolvidos para modificar o conhecimento empírico com o intuito de comprovar a ação de fitoterápicos, lançando assim bases para a fitoterapia racional e uma promoção mais segura no uso de fitoterápicos e plantas medicinais

Agradecimentos

Homenagem a Geny Brelaz de Castro *in memoriam*

Prestar homenagem a Geny Brelaz de Castro Professora da UFAM (Universidade Federal do Amazonas) é reconhecer uma trajetória marcada pelo compromisso com o conhecimento, pela dedicação incansável à educação e pela sensibilidade humana que sempre guiou sua atuação. Sua história se confunde com a formação de gerações, inspiradas por seu exemplo de ética, responsabilidade e amor pelo saber.

Geny Brelaz de Castro construiu um legado sólido, pautado na valorização da ciência, da cultura e do desenvolvimento humano. Sua atuação ultrapassou os limites da sala de aula ou da pesquisa, alcançando a vida de colegas, alunos e da comunidade, sempre com palavras de incentivo, escuta atenta e ações transformadoras.

Sua contribuição permanece viva naqueles que tiveram o privilégio de aprender com seus ensinamentos e conviver com sua sabedoria. Mais do que resultados acadêmicos ou profissionais, Geny deixa como herança a certeza de que educar é um ato de esperança e que o conhecimento, quando compartilhado com generosidade, tem o poder de mudar realidades.

Assim, esta homenagem expressa respeito, gratidão e admiração por uma vida dedicada a construir caminhos, fortalecer valores e semear futuros. O nome de Geny Brelaz de Castro seguirá como referência de inspiração, compromisso e amor pela educação.

Referências Bibliográficas

ALMASSY J. A. A. et al. **Folhas de chá: plantas medicinais na terapêutica humana**. Viço- sa: UFV, 2005.

AMOROZO, M, C. **Uso e diversidade de plantas medicinais** em Santo Antônio do Lever- ger, MT, Brasil. Acta Botânica Brasílica. v. 16, n. 2, p. 189-203, 2002.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Assistência Farmacêutica e Insumos Estratégicos. Uso de plantas medicinais por usuários na atenção primária á saúde: uma abordagem complementar ao tratamento convencional www.periodicoscapes.gov.br Revista JRG de Estudos Acadêmicos · 2024;14:e141132 14 Programa Nacional de Plantas Medicinais e Fitoterápicos. Brasília: Ministério da Saúde, 2019. Acesso em: 07 de Outubro de 2025 Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/programa_nacional_plantas_medicinais_fitoterapicos.pdf

BRASIL. Ministério da Educação e do Desporto. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Temas Transversais. Ética.** Brasília: MEC/SEF, 1998.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2 set. 1981.

BRASIL. **Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999**. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 abr. 1999. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm. Acesso em: 30/03/2026.

BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: o que é – o que não é**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2012.

DIEGUES, Antônio Carlos**. O mito moderno da natureza intocada.** São Paulo: Hucitec, 2000**.**

GADOTTI, M**. Pedagogia da terra.** 5. ed. São Paulo: Peirópolis, p. 217, 2000.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

JOHN, L. **Biodiversidade também é uma questão de educação**. In: BENSUSAN, N. et al. (Org.). Biodiversidade: para comer, vestir ou passar no cabelo? Para mudar o mundo! São Paulo: Peirópolis, p. 397-406, 2006.

MINAYO, Maria Cecília de Souza**. Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 19. ed. Petrópolis: Vozes, 2001.

MATOS, Francisco José de Abreu**. Introdução à fitoquímica experimental.** Fortaleza: UFC, 1998.

MORAN, José Manuel**. A educação que desejamos: novos desafios e como chegar lá.** Campinas: Papirus, 2002.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS)**. Traditional Medicine Strategy 2002–2005.** Geneva: WHO, 2002.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU)**. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/3. Acesso em: 30.03.2026.

REVISÃO CRÍTICA DAS PERSPECTIVAS CONTEMPORÂNEAS E DOS DESAFIOS ESTRUTURAIS DA EDUCAÇÃO AMBIENTAL NO BRASIL

1 Renan Zunta Raia, 2 Aline Piaskowski Castelo
1 Centro Universitário Autônomo do Brasil – UniBrasil, renanraia@unibrasil.com.br;
2 Centro Universitário Autônomo do Brasil – UniBrasil

Palavras-chave: Educação ambiental; Sustentabilidade; Políticas públicas

Resumo

A Educação Ambiental (EA) configura-se como um instrumento estratégico na formação de cidadãos críticos e comprometidos com a sustentabilidade socioambiental, especialmente diante da intensificação dos problemas ambientais nas últimas décadas. No Brasil, sua obrigatoriedade foi instituída pela Lei nº 9.795/1999, consolidando-a como componente essencial e permanente em todos os níveis e modalidades de ensino. Este estudo tem como objetivo analisar a influência dessa obrigatoriedade no contexto educacional, considerando seus impactos na formação de comportamentos sustentáveis e seus desdobramentos na sociedade. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica baseada em literatura científica e dados de órgãos oficiais. Os resultados evidenciam que, embora o país possua um arcabouço normativo consolidado e alinhado às diretrizes internacionais, ainda há desafios significativos relacionados à sua implementação, como a fragmentação curricular, a insuficiente formação docente, a escassez de recursos didáticos e a limitada contextualização das práticas educativas. Por outro lado, experiências pedagógicas interdisciplinares, participativas e contextualizadas demonstram maior efetividade, promovendo o engajamento dos estudantes e a adoção de hábitos sustentáveis, como o consumo consciente, a gestão adequada de resíduos e o uso racional da água. Além disso, destaca-se o papel da escola como espaço de transformação social, no qual os estudantes atuam como agentes multiplicadores de práticas ambientais em seus contextos familiares e comunitários. O estudo também aponta que as tendências futuras indicam um fortalecimento da Educação Ambiental, impulsionado pela agenda climática global, pela inovação pedagógica, pela digitalização do ensino e pela crescente exigência por indicadores de impacto. Conclui-se que a efetividade da Educação Ambiental depende de sua consolidação como prática contínua, crítica, interdisciplinar e contextualizada, ultrapassando sua dimensão normativa e integrando-se de forma efetiva aos processos educativos. Nesse sentido, a EA se apresenta como elemento fundamental para a promoção de mudanças comportamentais duradouras e para a construção de sociedades mais sustentáveis.

Introdução

A intensificação dos problemas ambientais nas últimas décadas tem evidenciado, de forma cada vez mais clara, a urgência da adoção de estratégias integradas capazes de articular políticas públicas, inovação tecnológica e transformação social. Fenômenos como o aumento expressivo na geração de resíduos sólidos, a escassez de recursos hídricos e a degradação contínua dos ecossistemas não apenas comprometem a qualidade ambiental, mas também impactam diretamente a saúde, a economia e o bem-estar das populações. Nesse cenário, torna-se indispensável promover mudanças estruturais que ultrapassem soluções pontuais, exigindo uma atuação conjunta entre governo, instituições e sociedade.

Dentro desse contexto, a Educação Ambiental se destaca como um dos principais instrumentos de transformação, ao contribuir para a formação de valores, atitudes e competências voltadas à sustentabilidade. Mais do que transmitir conhecimentos teóricos, ela busca desenvolver uma consciência crítica nos indivíduos, estimulando a participação ativa na resolução de problemas ambientais e na construção de uma relação mais equilibrada entre sociedade e natureza.

No Brasil, entretanto, o cenário da gestão ambiental ainda apresenta desafios significativos. Dados recentes da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2024) indicam que o país gerou aproximadamente 80,96 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2023. Desse total, menos de 10% foi destinado à reciclagem, enquanto cerca de 41% teve destinação inadequada, evidenciando falhas estruturais nos sistemas de gestão e, sobretudo, uma baixa conscientização da população quanto à importância do descarte correto. Complementarmente, informações do IBGE (2023) revelam que 31,9% dos municípios brasileiros ainda utilizam lixões, prática que contraria as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos e reforça a necessidade de avanços na implementação de soluções sustentáveis.

No que diz respeito aos recursos hídricos, a situação também é preocupante. Segundo o Instituto Trata Brasil (2024), o país apresenta perdas de aproximadamente 35% na distribuição de água tratada, índice significativamente superior ao observado em países desenvolvidos. Esse dado reflete não apenas problemas técnicos relacionados à infraestrutura, mas também a ausência de uma cultura consolidada de uso consciente e responsável da água, elemento essencial para a manutenção da vida e dos sistemas produtivos.

Diante desse panorama, a Educação Ambiental, instituída pela Lei nº 9.795/1999, assume um papel estratégico na construção de uma consciência ecológica crítica e participativa. Ao ser integrada de forma transversal ao processo educativo, ela possibilita que indivíduos compreendam a complexidade das questões ambientais e desenvolvam habilidades para atuar de maneira responsável em suas realidades locais e globais. Nesse sentido, a UNESCO (2021) destaca que a educação para o desenvolvimento sustentável é fundamental para capacitar cidadãos a enfrentarem desafios ambientais complexos, promovendo mudanças de comportamento e incentivando práticas mais sustentáveis.

Além disso, pesquisas contemporâneas apontam que experiências educativas vivenciadas na infância exercem influência determinante na formação de comportamentos pró-ambientais ao longo da vida (CHAWLA, 2020). Isso reforça o papel da escola como espaço privilegiado de transformação social, uma vez que suas ações não se restringem ao ambiente escolar, mas se estendem ao contexto familiar e comunitário, ampliando o alcance das práticas sustentáveis.

Dessa forma, compreender a efetividade da Educação Ambiental no contexto educacional brasileiro torna-se essencial para avaliar seu potencial de impacto na sociedade. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar a influência da obrigatoriedade da Educação Ambiental nas instituições de ensino, investigando de que maneira ela contribui para a formação de comportamentos sustentáveis e para o fortalecimento de uma cultura ambiental mais consciente e responsável.

Material e Métodos

A pesquisa caracterizou-se como qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, sendo desenvolvida por meio de revisão bibliográfica. Foram analisadas produções científicas nacionais e internacionais, relatórios técnicos, legislações e documentos institucionais de órgãos como IBGE, ABREMA, Ministério do Meio Ambiente, UNESCO e ONU.

A análise dos dados foi conduzida de forma interpretativa, buscando identificar padrões, convergências e lacunas na literatura acerca da relação entre a Educação Ambiental e a formação de comportamentos sustentáveis.

Resultados e Discussão

A Educação Ambiental e a Sustentabilidade

A institucionalização da Educação Ambiental representa um avanço significativo no campo das políticas públicas educacionais e ambientais. Entretanto, sua efetividade ultrapassa apenas obrigatoriedade legal, estando diretamente relacionada à qualidade de sua implementação.

Diversos estudos evidenciam que a exposição contínua à Educação Ambiental contribui para a internalização de práticas sustentáveis, como a separação de resíduos sólidos e orgânicos, o consumo consciente e a conservação dos recursos naturais (UNESCO, 2021; UNEP, 2022). Além disso, a integração da Educação Ambiental aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) amplia sua relevância no contexto global.

Outro aspecto relevante refere-se ao papel dos estudantes como agentes multiplicadores. Ao assimilarem conhecimentos e valores ambientais, os alunos tendem a replicá-los em seus contextos sociais, promovendo mudanças que extrapolam o ambiente escolar.

A Educação Ambiental favorece o desenvolvimento do pensamento crítico, possibilitando a compreensão das causas e consequências dos problemas ambientais, bem como incentivando a participação ativa na busca por soluções sustentáveis.

Evolução histórica da educação ambiental no brasil

A Educação Ambiental no Brasil apresenta uma trajetória histórica marcada por influências internacionais, avanços normativos progressivos e um processo contínuo de institucionalização no âmbito das políticas públicas e do sistema educacional. Sua consolidação não ocorreu de forma imediata, mas resultou de um conjunto de iniciativas que, ao longo do tempo, ampliaram a compreensão da relação entre sociedade, meio ambiente e desenvolvimento.

Os primeiros indícios de preocupação ambiental no país remontam ao século XIX, ainda que de forma incipiente e com foco predominantemente conservacionista. Nesse período, destacam-se iniciativas como a criação do Jardim Botânico do Rio de Janeiro, em 1808, e as propostas de proteção de áreas naturais apresentadas por André Rebouças, em 1876. No entanto, essas ações não estavam articuladas a uma perspectiva educacional estruturada, nem integravam políticas públicas sistematizadas.

Foi somente ao longo do século XX que a temática ambiental passou a adquirir relevância política e educacional mais consistente. Um marco fundamental nesse processo foi a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972, que inseriu a Educação Ambiental na agenda internacional como instrumento essencial para a conscientização e enfrentamento da crise ambiental. Posteriormente, a Conferência de Tbilisi (1977) consolidou os princípios, objetivos e diretrizes da Educação Ambiental, estabelecendo bases conceituais que influenciam até hoje as políticas educacionais em diversos países, incluindo o Brasil.

No contexto nacional, a década de 1980 representa o início da consolidação normativa da Educação Ambiental. A promulgação da Lei nº 6.938/1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), foi um marco importante ao estabelecer, entre seus princípios, a educação ambiental em todos os níveis de ensino como instrumento para a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental. Essa lei introduziu a ideia de que a educação deveria desempenhar papel estratégico na gestão ambiental.

Outro avanço significativo ocorreu com a Constituição Federal de 1988, especialmente em seu artigo 225, que reconhece o meio ambiente ecologicamente equilibrado como direito fundamental de todos e impõe ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. O inciso VI desse artigo determina explicitamente a promoção da educação ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação do meio ambiente, reforçando seu caráter obrigatório e transversal.

Na década de 1990, observa-se o fortalecimento institucional da Educação Ambiental com a criação do Programa Nacional de Educação Ambiental (PRONEA), que buscou articular ações entre diferentes esferas governamentais e promover a integração da temática ambiental nas práticas educativas. O período também foi fortemente influenciado pela Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), que ampliou o debate sobre sustentabilidade e resultou em

documentos importantes, como a Agenda 21 e o Tratado de Educação Ambiental para Sociedades Sustentáveis, os quais reforçaram a necessidade de incorporar a educação como eixo central das estratégias de desenvolvimento sustentável.

O principal marco legal da Educação Ambiental no Brasil, entretanto, foi a promulgação da Lei nº 9.795/1999, que institui a Política Nacional de Educação Ambiental (PNEA). Essa legislação define a Educação Ambiental como um componente essencial e permanente da educação nacional, devendo estar presente de forma articulada em todos os níveis e modalidades de ensino, tanto na educação formal quanto na não formal. A lei também estabelece princípios fundamentais, como a abordagem interdisciplinar, a participação social e a promoção de valores voltados à sustentabilidade.

No século XXI, o processo de institucionalização da Educação Ambiental foi ampliado por meio de regulamentações e diretrizes complementares. O Decreto nº 4.281/2002 regulamentou a PNEA, detalhando sua implementação e estabelecendo responsabilidades para os órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e para as instituições educacionais. Posteriormente, as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental, instituídas pela Resolução CNE/CP nº 2/2012, reforçaram a obrigatoriedade da inserção da temática ambiental de forma transversal nos currículos escolares, orientando práticas pedagógicas voltadas à sustentabilidade.

Além disso, observa-se a ampliação de redes, fóruns e espaços participativos voltados à Educação Ambiental, bem como sua articulação com agendas globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas em 2015. Esses objetivos reforçam a educação de qualidade e a sustentabilidade como pilares fundamentais para o desenvolvimento global.

Apesar dos avanços normativos e institucionais, a literatura especializada aponta que a evolução das leis e diretrizes não foi acompanhada, na mesma proporção, por sua implementação efetiva nas práticas educacionais. Persistem desafios relacionados à formação de professores, à integração curricular, à continuidade das políticas públicas e à transformação de diretrizes legais em ações concretas no cotidiano escolar, o que evidencia a necessidade de fortalecer os mecanismos de aplicação da Educação Ambiental no país.

Educação ambiental como metodologia pedagógica

A análise da literatura evidencia que a obrigatoriedade da Educação Ambiental possui um potencial significativo para promover a conscientização socioambiental e estimular a adoção de práticas sustentáveis. No entanto, sua efetividade não está garantida apenas pela existência de dispositivos legais, estando diretamente condicionada a fatores estruturais, pedagógicos e institucionais que influenciam sua implementação no contexto educacional.

Nesse sentido, diversos estudos apontam que a simples inserção da temática ambiental nos currículos escolares não assegura, por si só, a formação de uma consciência crítica e transformadora. Para que a Educação Ambiental cumpra seu papel, é necessário que ela seja desenvolvida de forma contínua, articulada e contextualizada, considerando as especificidades sociais, culturais e ambientais de cada realidade.

Entre os principais desafios identificados na literatura, destaca-se, inicialmente, a insuficiência na formação continuada de professores, o que compromete a capacidade de abordar a temática ambiental de maneira crítica, interdisciplinar e atualizada. Muitos educadores ainda não dispõem de suporte teórico e metodológico adequado, o que limita a efetividade das práticas pedagógicas desenvolvidas em sala de aula.

Outro fator relevante é a escassez de recursos didáticos apropriados, tanto em termos de materiais quanto de metodologias inovadoras que favoreçam a aprendizagem significativa. A ausência desses recursos dificulta a construção de experiências educativas mais dinâmicas e participativas, reduzindo o potencial de engajamento dos estudantes.

Além disso, observa-se que a Educação Ambiental frequentemente é tratada de forma fragmentada, restrita a disciplinas específicas ou a atividades pontuais, o que contraria sua natureza interdisciplinar. Essa abordagem limitada impede a compreensão da complexidade das questões ambientais, que demandam uma visão integrada entre diferentes áreas do conhecimento.

A ausência de contextualização com a realidade local também se configura como um obstáculo importante. Quando os conteúdos não dialogam com o cotidiano dos estudantes e com os problemas ambientais de sua comunidade, há uma tendência de distanciamento e desinteresse, comprometendo o processo de aprendizagem e a internalização de valores sustentáveis.

Por outro lado, experiências consideradas exitosas na literatura demonstram que práticas pedagógicas interdisciplinares, participativas e contextualizadas apresentam resultados significativamente mais positivos. Projetos que envolvem a comunidade escolar, promovem a aprendizagem ativa e estabelecem relações entre teoria e prática tendem a gerar maior engajamento dos estudantes, além de favorecer mudanças comportamentais mais duradouras. Essas experiências indicam que a Educação Ambiental, quando bem estruturada, é capaz de extrapolar os limites da sala de aula, influenciando atitudes no âmbito familiar e comunitário e contribuindo para a construção de uma cultura de sustentabilidade.

Dessa forma, a Educação Ambiental deve ser compreendida não apenas como uma exigência normativa prevista na legislação, mas como um instrumento estratégico de transformação social. Sua efetividade depende do fortalecimento de políticas públicas, da valorização da formação docente, da integração curricular e da adoção de práticas pedagógicas inovadoras que possibilitem a formação de sujeitos críticos, conscientes e comprometidos com a preservação ambiental.

Perspectivas da educação ambiental para a próxima década (2026–2036)

A análise das tendências globais e nacionais permite projetar que a Educação Ambiental passará por transformações estruturais significativas nos próximos 10 anos, impulsionadas por demandas socioambientais cada vez mais complexas e pela necessidade de respostas mais efetivas por parte dos sistemas educacionais.

1. Integração com a agenda climática global

Com a intensificação das mudanças climáticas e seus impactos, a Educação Ambiental tende a assumir um papel central nas políticas educacionais, alinhando-se às diretrizes internacionais, como os relatórios do IPCC e as metas da Agenda 2030. Nesse contexto, a temática climática deixará de ser tratada como conteúdo complementar e passará a ser incorporada de forma transversal nos currículos, promovendo a compreensão das causas, consequências e estratégias de mitigação e adaptação, além de estimular a formação de cidadãos mais preparados para lidar com crises ambientais globais.

2. Digitalização e inovação pedagógica

O avanço das tecnologias digitais tende a transformar significativamente as práticas de ensino em Educação Ambiental. Ferramentas como inteligência artificial, plataformas interativas, realidade aumentada e análise de dados em tempo real possibilitam abordagens mais dinâmicas e imersivas, favorecendo a aprendizagem ativa. Essas inovações permitem, por exemplo, simulações de cenários ambientais, monitoramento de indicadores ecológicos e desenvolvimento de projetos colaborativos, ampliando o engajamento dos estudantes e tornando o aprendizado mais significativo.

3. Fortalecimento da educação para cidadania ecológica

Observa-se uma tendência de evolução da Educação Ambiental para uma perspectiva mais voltada à formação da cidadania ecológica. Nesse modelo, o foco não se limita à aquisição de conhecimento, mas à formação de sujeitos críticos, participativos e comprometidos com a transformação social. A escola passa a atuar como agente mobilizador, incentivando práticas que extrapolam o ambiente escolar, como participação em ações comunitárias, projetos socioambientais e engajamento em políticas públicas locais.

4. Pressão por indicadores de impacto

A crescente demanda por efetividade nas políticas públicas tende a impulsionar a criação de métricas mais robustas para avaliar os resultados da Educação Ambiental. Organismos internacionais e instituições governamentais deverão exigir indicadores que vão além da presença curricular, incluindo evidências de mudança comportamental, desenvolvimento de competências socioambientais e impactos concretos na comunidade. Isso implica maior necessidade de monitoramento, avaliação contínua e transparência nas ações educativas.

5. Avanços legislativos e institucionalização

No Brasil, observa-se um movimento contínuo de fortalecimento da Educação Ambiental no campo normativo. Projetos recentes indicam a ampliação de sua obrigatoriedade nos currículos escolares e a criação de mecanismos de certificação para instituições comprometidas com práticas sustentáveis. Esse processo tende a consolidar a Educação Ambiental como elemento estruturante do sistema educacional, promovendo maior integração entre políticas públicas, instituições de ensino e sociedade.

6. Transição para uma abordagem crítica e interdisciplinar

A tendência futura aponta para a superação de modelos tradicionais, caracterizados por abordagens pontuais e desarticuladas, e a consolidação de uma Educação Ambiental baseada em princípios mais integradores. Nesse sentido, destaca-se a necessidade de uma abordagem:

- crítica, ao estimular a reflexão sobre as causas estruturais dos problemas ambientais;
- interdisciplinar, ao integrar diferentes áreas do conhecimento na compreensão da complexidade ambiental;
- orientada para a resolução de problemas, ao promover a aplicação prática do conhecimento na busca por soluções concretas.

Essa mudança de paradigma reforça o papel da Educação Ambiental como instrumento de transformação, capaz de articular conhecimento, ação e responsabilidade social. reais.

Considerações Finais

A Educação Ambiental configura-se como um instrumento essencial para a promoção da sustentabilidade, especialmente diante do agravamento dos problemas ambientais em escala global e nacional. No entanto, sua efetividade no Brasil ainda se mostra limitada por desafios estruturais e pedagógicos, como a fragmentação curricular, a insuficiente formação docente e a dificuldade de integração entre teoria e prática. Apesar da existência de um arcabouço normativo consolidado ao longo das últimas décadas, observa-se um descompasso entre sua institucionalização e sua aplicação efetiva no cotidiano das instituições de ensino.

A análise do cenário atual evidencia que o avanço da Educação Ambiental está diretamente relacionado à sua consolidação como uma prática crítica, interdisciplinar e contextualizada. Mais do que cumprir exigências legais, é necessário que ela esteja integrada aos processos educativos de forma contínua, promovendo a reflexão, o engajamento e a construção de conhecimentos significativos. Nesse sentido, as perspectivas para a próxima década apontam para o fortalecimento de seu papel nas políticas educacionais, impulsionado pela intensificação da agenda climática, pelo uso de metodologias inovadoras e pela crescente demanda por resultados concretos no campo socioambiental.

Dessa forma, conclui-se que a superação dos entraves atuais exige não apenas a presença formal da Educação Ambiental nos currículos, mas sua efetiva incorporação às práticas pedagógicas. Somente assim será possível promover a formação de cidadãos críticos, conscientes e capazes de atuar de maneira ativa na transformação socioambiental, contribuindo para a construção de uma sociedade mais sustentável.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao Centro Universitário Autônomo do Brasil – UniBrasil pelo apoio institucional fundamental à realização desta pesquisa, especialmente pela concessão de bolsa de estudos à estudante participante do projeto, o que contribuiu significativamente para o desenvolvimento das atividades acadêmicas e científicas envolvidas.

Agradecem, igualmente, ao Comitê de Sustentabilidade da instituição, que desempenhou papel relevante no fortalecimento das discussões e reflexões propostas neste estudo. Em especial, manifestam reconhecimento ao professor Renan Zunta Raie e à Beatriz Lima Zanoni, pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições, pela troca de conhecimentos e pelo constante incentivo ao aprofundamento das análises realizadas.

Por fim, os autores reconhecem que o apoio institucional, aliado ao diálogo colaborativo promovido ao longo do processo, foi essencial para o enriquecimento teórico e metodológico da pesquisa, contribuindo de forma significativa para a qualidade e relevância dos resultados apresentados.

Referências Bibliográficas

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024. São Paulo: Abrema, 2024.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1981.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 abr. 1999.

BRASIL. Ministério da Educação. Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental. Brasília, DF: MEC, 2012.

CHAWLA, Louise. Childhood nature connection and constructive hope: a review of research on connecting with nature and coping with environmental loss. People and Nature, v. 2, n. 3, p. 619–642, 2020.

DIAS, Genebaldo Freire. Educação ambiental: princípios e práticas. 9. ed. São Paulo: Gaia, 2004.

GUIMARÃES, Mauro. Educação ambiental: da prática à teoria. Campinas: Papirus, 2004.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa de Informações Básicas Municipais (Munic) 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Perdas de água no Brasil: relatório 2024. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023.

LOUREIRO, Carlos Frederico Bernardo. Educação ambiental crítica: contribuições e desafios. São Paulo: Cortez, 2004.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Nova York: ONU, 2015.

SAUVÉ, Lucie. Environmental education and sustainable development: a critical analysis. Canadian Journal of Environmental Education, v. 1, p. 7–34, 1996.

STERLING, Stephen. Sustainable education: re-visioning learning and change. Totnes: Green Books, 2001.

UNESCO – UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. Education for Sustainable Development: a roadmap. Paris: UNESCO, 2021.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global Environment Outlook 6. Nairobi: UNEP, 2022.

A EDUCAÇÃO AMBIENTAL NO MUNICÍPIO DE PEDREGULHO/SP: ANÁLISE DOCUMENTAL DA LEGISLAÇÃO, PROGRAMAS E INSTRUMENTOS DE GESTÃO PÚBLICA

1 Marcos Martins Pinto Júnior, 2 João Paulo Pereira Duarte

1 Discente na Faculdade Doutor Francisco Maeda – FAFRAM, membro do Grupo de Estudo e Pesquisa em Ciências Agroambientais (GECA), e-mail: marcosjunior@sou.fafram.com.br; 2 Docente na Faculdade Doutor Francisco Maeda -FAFRAM, membro do Grupo de Estudo e Pesquisa em Ciências Agroambientais (GECA), e-mail: joaopaulo.pereira@fafram.com.br

Palavras-chave: Educação Ambiental; Políticas Públicas; Gestão Ambiental.

Resumo

À medida que a sociedade amplia sua exploração dos recursos naturais para atender às crescentes demandas, sobretudo em função do crescimento populacional das grandes metrópoles, surgem conflitos relacionados ao uso e à preservação ambiental. Nesse cenário, a Educação Ambiental se destaca como um instrumento essencial para a formação de cidadãos conscientes e comprometidos com a sustentabilidade. Sua trajetória histórica é marcada por documentos e legislações que reforçam a necessidade de refletir criticamente sobre a relação entre sociedade e natureza (Lopes; Oliveira, 2023). O desenvolvimento de uma consciência crítica acerca do uso responsável dos recursos naturais é fundamental para que indivíduos e comunidades adquiram saberes, estratégias e competências voltadas à gestão sustentável. Esse processo educativo contribui para que o avanço social e o bem-estar coletivo estejam alinhados ao consumo equilibrado e à preservação ambiental (Giraldelo et al., 2023). A prática pedagógica, em suas diferentes dimensões, incluindo a ambiental, alcança maior efetividade quando promove a capacidade reflexiva dos sujeitos, permitindo que alinhem suas ações aos valores que orientam suas vidas. Nesse sentido, a Educação Ambiental deve ser compreendida como um processo permanente e participativo, capaz de estimular a atuação cidadã na busca por soluções que minimizem os impactos ambientais e fortaleçam o controle social sobre o uso dos recursos naturais (Giraldelo et al., 2023).

Introdução

Nas últimas décadas, consolidou-se como um dos pilares para a construção de sociedades sustentáveis. No Brasil, a Política Nacional de Educação Ambiental, instituída pela Lei nº 9.795/1999, estabeleceu diretrizes para que estados e municípios implementem programas voltados à sensibilização, à formação cidadã e à gestão responsável dos recursos naturais. Essa legislação reforça a importância de integrar práticas educativas às políticas públicas, promovendo mudanças culturais e sociais em favor da preservação ambiental (BRASIL, 1999).

Nos municípios de pequeno porte, essa relevância se torna ainda mais evidente. A proximidade entre comunidade, poder público e território favorece a implementação de ações participativas e contextualizadas. Contudo, a gestão ambiental municipal enfrenta desafios específicos, como restrições financeiras, dependência de programas estaduais e federais e a necessidade de equilibrar desenvolvimento econômico com conservação ambiental.

Diante desse panorama, torna-se pertinente analisar como municípios de pequeno porte têm incorporado a Educação Ambiental em suas políticas públicas. O município de Pedregulho/SP, localizado na região nordeste do estado de São Paulo, apresenta características que justificam sua escolha como estudo de caso. Reconhecido por sua vocação agrícola e pela presença de áreas de proteção ambiental, enfrenta pressões relacionadas ao uso do solo, à preservação dos recursos hídricos e à conscientização da população sobre práticas sustentáveis.

A análise documental de sua legislação, programas e instrumentos de gestão pública possibilita compreender como a Educação Ambiental tem sido institucionalizada nas políticas locais, além de identificar avanços e lacunas ainda existentes. Nesse sentido, o estudo contribui para avaliar a efetividade das ações municipais e propor caminhos que fortaleçam a integração entre educação, cidadania e sustentabilidade, evidenciando o papel estratégico da Educação Ambiental para o desenvolvimento sustentável em contextos municipais. Assim, este artigo busca compreender como a Educação Ambiental vem sendo aplicada em Pedregulho/SP, por meio da análise documental de sua legislação, programas e instrumentos de gestão pública, cujos procedimentos metodológicos serão detalhados na seção seguinte.

Material e Métodos

A presente pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, tendo como objetivo compreender de que forma a Educação Ambiental vem sendo incorporada às políticas públicas do município de Pedregulho/SP. Para tanto, adotou-se o método dedutivo, partindo das diretrizes gerais estabelecidas pela Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999) e de outros marcos normativos nacionais, para posteriormente examinar sua aplicação no contexto municipal.

A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisa documental, bibliográfica e de campo. No âmbito documental, foram consultados os portais oficiais da Prefeitura Municipal de Pedregulho/SP, com destaque para legislações, decretos, planos diretores, relatórios e programas ambientais disponíveis ao público. Outrossim, foi utilizado palavras-chaves no levantamento de dados a fim de garantir o direcionamento mais exato das legislações vigentes no município, no qual foram “Programa de Educação Ambiental”, “Meio Ambiente”, “Plano Municipal de Educação Ambiental”.

Esse recenseamento permitiu identificar os instrumentos normativos e administrativos que orientam a gestão ambiental local. Complementarmente, realizou-se pesquisa de campo, que incluiu visitas presenciais à Prefeitura Municipal e à Casa da Agricultura, bem como conversas informais com vereadores e representantes da gestão pública local. Essas interações possibilitaram compreender a percepção dos agentes políticos e técnicos sobre os avanços e desafios da implementação da Educação Ambiental no município, além de fornecer informações adicionais sobre programas e práticas em andamento.

Os dados obtidos foram organizados e analisados por meio da técnica de análise de conteúdo, que permitiu identificar categorias como avanços normativos, lacunas institucionais e desafios práticos. Essa abordagem possibilitou interpretar os documentos e relatos em profundidade, destacando não apenas o conteúdo formal das políticas, mas também suas implicações para a gestão ambiental municipal e para a formação da cidadania ambiental.

Assim, a metodologia adotada buscou integrar análise normativa, levantamento bibliográfico e investigação empírica, de modo a oferecer uma compreensão abrangente sobre como a Educação Ambiental vem sendo institucionalizada em Pedregulho/SP. O resultado esperado é a identificação de limites e potencialidades das políticas locais, bem como a proposição de caminhos que fortaleçam a integração entre educação, cidadania e sustentabilidade. Para tanto, a análise dos materiais privilegiou a densidade hermenêutica, permitindo interpretar os textos legais e programáticos em profundidade e evidenciar suas implicações práticas para a gestão ambiental municipal e para a formação da cidadania ambiental.

Na figura 01, observa-se o processo conduzido do método utilizado e descrito anteriormente.

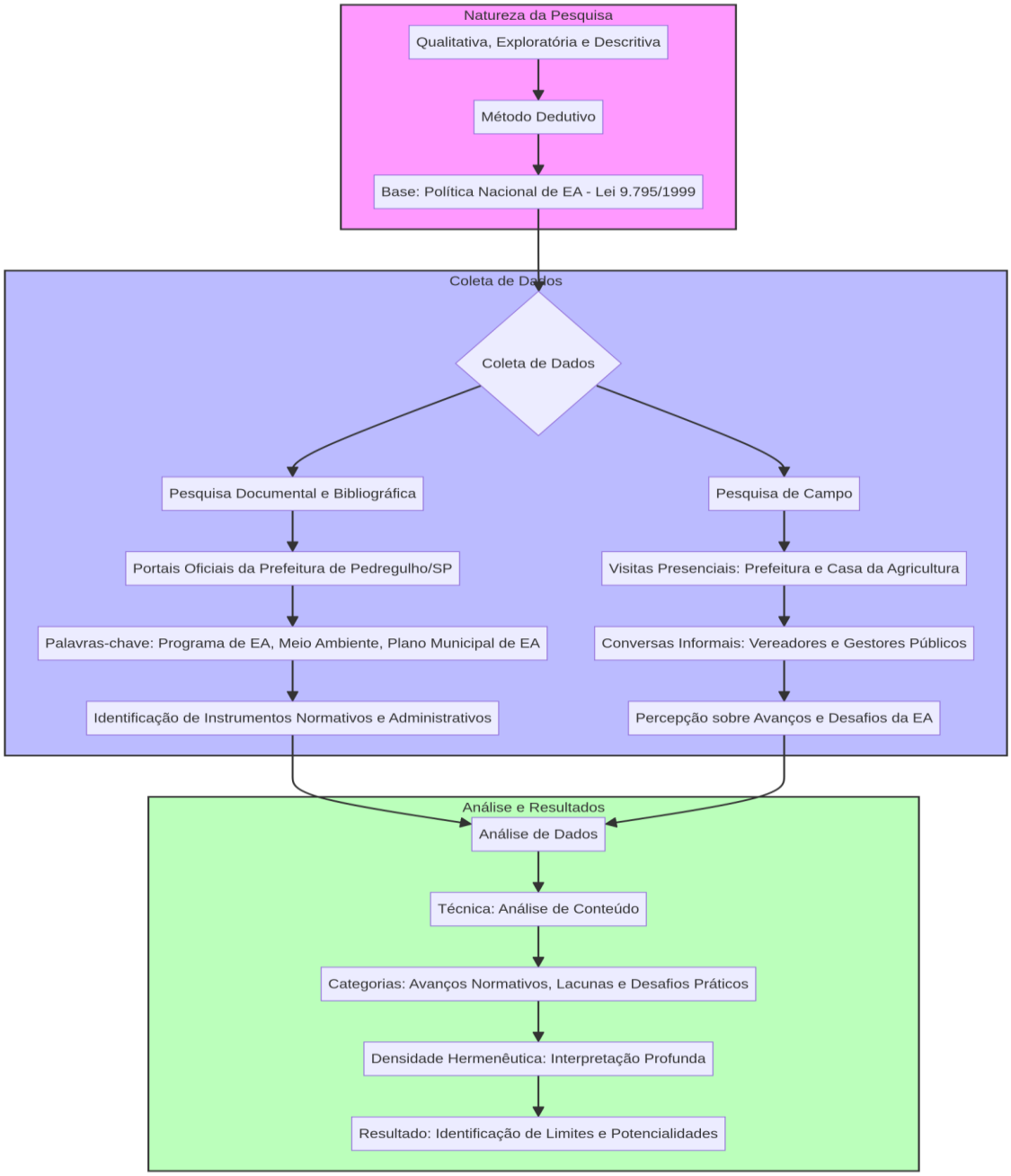


Figura 01: Fluxograma metodológico. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Resultados e Discussão

Ação / Instrumento	Abordagem de EA?	Tipo de EA	Alinhamento com PNEA	Natureza (Execução/ Norma)	Grau de Estruturação	Possui Indicadores?	Integração Intersetorial	Foco Principal	Observações Analíticas
TCRA – Plantio de 7.500 mudas	Parcial (potencial)	Não formal	Médio	Execução (propostos)	Médio	Parcial	Baixa/ Média	Recuperação ambiental	EA aparece como complementar, não central
Programa de Reciclagem	Sim	Não formal	Alto	Execução contínua	Médio/ Alto	Parcial	Média	Resíduos sólidos	Forte potencial educativo, mas sem métricas claras
Visitação ao Parque	Sim	Não formal	Alto	Execução	Médio	Baixo	Alta	Educação ambiental	Ação pedagógica relevante, mas pouco sistematizada
Projeto Fênix	Sim	Formal + Não formal	Alto	Execução	Médio	Não identificado	Alta	Educação ambiental	Indício de política mais estruturada
Lei 9.795/1999 (PNEA)	Sim	Formal + Não formal	—	Norma (referência)	Alto	—	—	Educação ambiental	Base normativa principal
Lei 12.305/2010 (PNRS)	Sim	Não formal	Alto	Norma	Alto	—	—	Resíduos sólidos	Vincula EA à gestão de resíduos
Lei 9.985/2000 (SNUC)	Sim	Não formal	Médio/ Alto	Norma	Alto	—	—	Unidades de conservação	Sustenta visitação educativa
Decreto Estadual 64.456/2019 (TCRA)	Não direto	—	Baixo	Norma	Alto	—	—	Recuperação ambiental	EA não é foco direto
Decreto Estadual 30.591/1989 (Parque)	Sim (indireto)	Não formal	Médio	Norma	Médio	—	—	Conservação	Permite uso educativo
Lei Municipal 2.470/2014 (Nascentes)	Sim	Não formal	Alto	Norma	Médio	Não identificado	Média	Educação ambiental	Forte alinhamento com EA
Lei Municipal 2.142/2012 (Coleta seletiva)	Sim	Não formal	Alto	Norma	Médio	Não identificado	Média	Resíduos sólidos	Base legal da reciclagem
Lei Municipal 1.923/2009 (CONDEMA)	Indireto	—	Médio	Norma	Médio	Não identificado	Alta	Governança ambiental	Importante para participação social

Tabela 01: Análise dos instrumentos de gestão e legislação ambiental em Pedregulho/SP.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A princípio, torna-se notório destacar a introdução da EA nas políticas públicas municipais, consequentemente apresenta um foco parcial. Dessa forma, diretrizes que abordam esse conceito de forma indireta e superficial.

A análise dos dados sistematizados na tabela evidencia que o município de Pedregulho/SP se esforçado para integrar a Educação Ambiental como parte integrante de suas políticas públicas, por meio de legislações específicas, programas e instrumentos de gestão. Esse empenho evidencia a conformidade com as diretrizes definidas pela Política Nacional de Educação Ambiental (Lei n.º 9.795/1999), que orienta estados e municípios a implementarem ações focadas na conscientização e na formação cidadã em prol da sustentabilidade (BRASIL, 1999). No entanto, nota-se que, embora tenham ocorrido progressos normativos, ainda existem deficiências institucionais ligadas à dependência de programas estaduais e federais, além da restrição de recursos financeiros. Esse cenário é comum em cidades pequenas e foi apontado também por Balduino Junior et al. (2025), que ressaltam o desafio de estabelecer políticas de Educação Ambiental de maneira consistente devido à instabilidade administrativa e à pouca visibilidade das políticas em relação a esta dissertação.

A participação social é outro aspecto importante. Em Pedregulho, ela acontece de forma pontual, mas precisa de mais organização e engajamento da comunidade. Essa conclusão está em sintonia com a pesquisa de Maier e Brianezi (2025) acerca da rede municipal de São Paulo, que destaca a relevância de incorporar a Educação Ambiental nos planos de ação climática e de mobilização comunitária como componentes fundamentais para a eficácia das políticas locais. Em contrapartida, a existência de leis e programas específicos em Pedregulho indica um progresso normativo considerável, em consonância com o que Andrade (2025) considera essencial para a institucionalização da Educação Ambiental nos municípios: a elaboração de marcos legais que apoiem práticas educativas contínuas e participativas.

Considerações Finais

A análise dos dados indica que Pedregulho possui um sistema legislativo semelhante ao de outros municípios de pequeno porte: há avanços normativos significativos, porém, desafios práticos e institucionais que comprometem a eficácia das políticas. A análise comparativa com outros estudos publicados demonstra que esses desafios não são únicos, mas representam uma situação comum no país. Isso reforça a urgência de intensificar a conexão entre educação, cidadania e sustentabilidade como fundamentos para o progresso local.

A análise dos instrumentos de gestão revelou que, embora o município possua uma base legal sólida, como as Leis Municipais nº 2.470/2014 e nº 2.142/2012, a Educação Ambiental (EA) ainda é frequentemente tratada como um componente acessório e não como o eixo central das políticas públicas. Observou-se que ações práticas, como o plantio de mudas via TCRA, possuem um forte potencial educativo que permanece subutilizado devido à falta de métricas claras e de uma sistematização pedagógica contínua. Essa característica reforça a necessidade de transitar de uma "EA de execução" pontual para uma "EA estratégica", que integre de forma mais robusta os setores de meio ambiente, educação e agricultura do município.

Por fim, a pesquisa de campo e as interações com os gestores locais evidenciaram que o fortalecimento da cidadania ambiental em Pedregulho/SP depende da superação da dependência técnica e financeira de esferas governamentais superiores. A institucionalização definitiva da Educação Ambiental requer não apenas a manutenção dos marcos normativos já conquistados, mas também o fomento a espaços de governança participativa, como o COMDEMA, garantindo que a comunidade local seja protagonista na gestão dos recursos naturais. Assim, o estudo aponta que o caminho para a sustentabilidade municipal passa pela transformação do conteúdo formal das leis em práticas educativas transversais, capazes de sensibilizar a população e consolidar uma cultura de preservação duradoura.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à Fundação Educacional de Ituverava e à Faculdade Doutor Francisco Maeda – FAFRAM, pelo suporte institucional e pelas condições oferecidas que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho. Reconheço, de maneira especial, a contribuição do docente João Paulo, cuja orientação, dedicação e incentivo foram fundamentais para o aprimoramento metodológico e para a consolidação dos resultados apresentados.

Agradeço também à Prefeitura Municipal de Pedregulho e ao vereador Leonardo Coelho de Almeida, pelo apoio contínuo às iniciativas de pesquisa e extensão, demonstrando compromisso com o fortalecimento da educação, da ciência e do desenvolvimento regional. O suporte concedido por estas instituições e lideranças políticas foi essencial para viabilizar as etapas deste estudo e para promover a integração entre a comunidade acadêmica e a sociedade.

Ademais, expresso meu profundo agradecimento ao Grupo de Estudo e Pesquisa em Ciências Agroambientais (GECA) da FAFRAM e a todos os seus membros, visto que foi no seio de sua estrutura acadêmica que a proposta deste trabalho foi idealizada e amadurecida. Estendo este reconhecimento aos servidores do município de Morro Agudo/SP, cujo apoio técnico e colaboração foram fundamentais para o êxito do alcance metodológico desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, L. N. Educação ambiental como política pública no Brasil. 2025.

BALDUINO JUNIOR, J.; et al. Educação ambiental e políticas públicas: desafios e perspectivas. 2025. Trabalho acadêmico.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 abr. 1999.

GIRALDELO, Leticia Gabrielly Cerqueira; DUTRA, Geice Elen Ravani Catarino; SANTANA, Ana Paula dos Santos; LORETTO, Jessica Arantes. História cronológica da Educação Ambiental. Jales: Centro Universitário de Jales – UNIJALES, 2023.

LOPES; OLIVEIRA. A trajetória da educação ambiental no Brasil: marcos históricos e desafios contemporâneos. Revista Sergipana de Educação Ambiental, v. 1–17, 2023. DOI: 10.47401/revisea.v10.18244.

MAIER, G.; BRIANEZI, T. Educação ambiental e planos de ação climática na rede municipal de São Paulo. 2025.

PEDREGULHO (Município). Prefeitura Municipal de Pedregulho. Leis Municipais. Disponível em: (pedregulho.sp.gov.br). Acesso em: 3 abr. 2026.

PEDREGULHO (Município). Prefeitura Municipal de Pedregulho. Plano Diretor Municipal. Disponível em: (pedregulho.sp.gov.br).

PEDREGULHO (Município). Prefeitura Municipal de Pedregulho. Portal Oficial. Disponível em: (pedregulho.sp.gov.br).

PEDREGULHO (Município). Prefeitura Municipal de Pedregulho. Portal da Transparência. Disponível em: (pedregulho.sp.gov.br).

INTEGRAÇÃO ENTRE CIÊNCIA CIDADÃ E PLUVIÔMETROS ANALÓGICOS COMO SUBSÍDIO À MEDIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO

1 Andrea Sartori Jabur, 2 Luciana de Souza Moraes, 3 Viviane Cristhyne Bini Conte, 4 Paula Fernanda Gomes Vieira, 5 Flavio Avanci de Souza, 6 Maria Luiza Perdigão Lobato

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana, e-mail: jabur@utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana e-mail: lucianasoares@utfpr.edu.br ; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana, e-mail: vivianeconte@utfpr.edu.br , 4 Centro Universitário de Tecnologia de Curitiba- UNIFATECPR, e-mail: paulafernnadagv@gmail.com 5Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana, e-mail: fsouza@utfpr.edu.br , 6Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana, e-mail: maria.160704@alunos.utfpr.edu.br

Palavras-chave: pluviômetro analógico, precipitação, ciência cidadã.

Resumo

Dados de precipitação são primordiais para o cotidiano de uma cidade ou área rural. Porém devido ao alto custo dos equipamentos ou das estações meteorológicas, o uso de pluviômetros analógicos tem sido uma solução de baixo custo, de modo que são fáceis de instalar e podendo ser uma fonte de informação para a comunidade. O presente estudo tem como objetivo analisar dados diários de precipitação obtidos por meio de pluviômetros analógicos, instalados com apoio da comunidade, em diferentes municípios do estado do Paraná, contribuindo para a avaliação da variabilidade espacial da chuva e para a valorização da participação social na produção de dados ambientais (ciência cidadã). Os resultados obtidos foram durante 1 ano de coletada (2005) e apresentou as diferenças sazonais, com Apucarana com dois meses sem precipitação (abril e junho) e as cidades como Maringá, Araucária e Ubiratã apresentam uma distribuição de chuvas durante o ano inteiro.

Introdução

A medição da precipitação pluviométrica é fundamental para a compreensão dos processos hidrológicos, planejamento urbano e gestão de recursos hídricos (Tucci, 2015). Em regiões com menor cobertura de estações automáticas, o uso de pluviômetros analógicos apresenta-se como uma alternativa viável, de baixo custo e fácil aplicação, permitindo ampliar a rede de monitoramento (Costa; Andrade, 2017).

Nesse contexto, iniciativas baseadas na participação comunitária, como o auxílio na coleta de dados e na preservação ambiental, frequentemente associadas à ciência cidadã têm ganhado relevância, pois promovem o engajamento da população na coleta de dados ambientais, contribuindo para a geração de informações locais mais detalhadas (Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT, 2026).

A precipitação é definida como qualquer forma de deposição proveniente da atmosfera, tanto forma líquida como sólida, incluindo chuva, neve, granizo, saraiva, névoa entre outros (Costa; Andrade, 2017, Colischonn; Dornelles, 2015). Existem três tipos básicos de precipitação pluviométrica: Convectiva, ocasionada pelo movimento vertical das massas de ar ascendentes, as quais são mais quentes que o meio ambiente, gerando as chuvas de verão. A ciclônica ou frontal, causada por um movimento vertical em massa de ar em grande escala, associadas a entrada de massa de ar frio, que se chocam com as massas de ar quente (Figura 1), e por último, a precipitação orográfica, definida como a de altitude, devido a elevação do ar úmido sobre o terreno elevado, como as faixas das serras do mar (Ayoade, 1998 apud Costa, Andrade 2017, Tucci; 2015, Colischonn, Dornelles; 2015).



Figura 01: Entrada de massa de ar fria pela região sudeste na cidade de Apucarana no dia 26 de fevereiro de 2023 e 02 de fevereiro de 2026 consectivo. Fonte: Acervo dos autores

Os instrumentos utilizados para a obtenção de precipitação são denominados pluviômetros, e os modelos são variados, desde os mais complexos, como os modelos automatizados, e as opções mais simples, confeccionados como de acrílicos e até os de plásticos rígido, de tamanhos reduzidos e com a leitura manual, encontrados na maioria em áreas rurais (Nietche *et al.*, 2019)

A precipitação é expressa em mm e pode ser registrada diariamente, mensamente e anualmente. A unidade de mm, equivale corresponde 1 L de precipitação em uma área superficial de 1 m^2.

O monitoramento é realizado em estações meteorológicas e/ou climatológicas, por meio de pluviômetros ou pluviógrafos, e atualmente com uso de radares, onde a precisão dos dados são considerados como de melhor precisão. O pluviógrafo é um instrumento dotado de sistema de descarga automática, o que possibilita a medição continua e o registro temporal da precipitação em mm/h. Em contraste, o pluviômetro é um dispositivo de coleta simples, que demanda intervenção humana periódica para o esvaziamento e leitura do volume acumulado. Porém o elevado custo destes equipamentos (pluviógrafos), como sua manutenção, torna-se oneroso para uma criação de monitoramento participativo desta variável, bem como a manutenção (Borges, *et al.*, 2012). O exemplo é que um pluviômetro modelo Cunha representa em torno de 10% de aquisição em comparação ao modelo de um pluviômetro digital (figura 2).

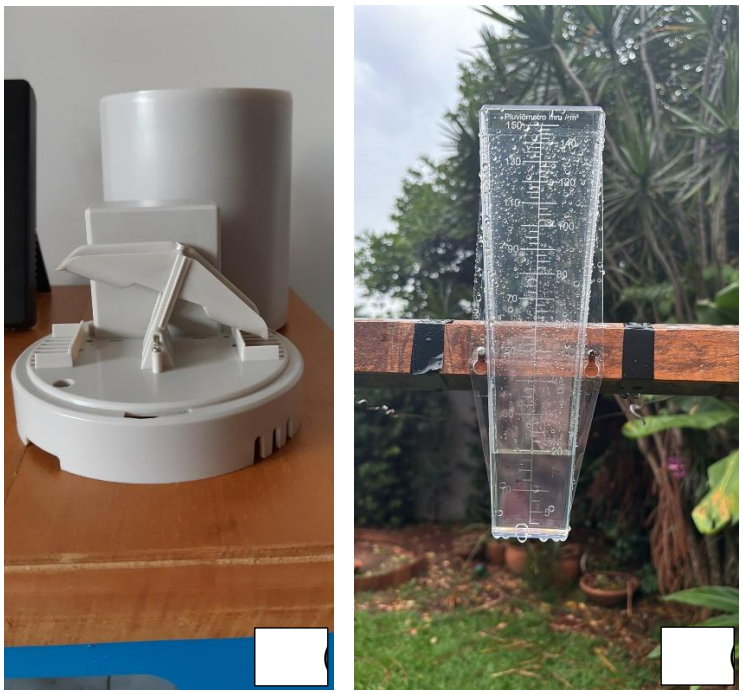


Figura 02: modelos de pluviômetros, digital com sistema automático de esvaziamento (a) e analógicos (b)
Fonte: Acervo dos Autores (2025)

Segundo Ayoade (2007) apud Borges et al (2012), o volume coletado por um pluviômetro em uma localidade, depende de vários fatores, tais como a altura de instalação (em relação ao solo), a velocidade e inclinação do vento e a taxa de evaporação. Tais fatores em conjunto com a inexperiência do observador na mensuração dos dados obtidos, podem ocasionar erros na coleta de dados (Borges, et al., s/d; ANA, 2014).

Logo, para a organização de uma rede de monitoramento de precipitação, é necessário um curso para o observador, desde da instalação, como realizar a leitura, como preencher corretamente a caderneta. Em caso de quando não for possível realizar a leitura, deve-se anotar o sinal de mais +, pois o acumulado ficará registrado para o dia anterior (ANA, 2014) A Organização de Meteorologia Mundial (OMM) e a agência Nacional da Água e Saneamento (ANA, 2016) recomenda que a instalação deve ser em local livre, uma distância de 2 vezes a altura do obstáculo mais próximo, com uma altura de 1,5 m do solo (com gramíneas).

Sendo assim, ciência cidadã aplicada à coleta de dados de precipitação consiste na participação voluntária de indivíduos na medição e registro de chuvas (Santos et al., 2024). Por meio do uso de pluviômetros de baixo custo, confeccionado de acrílicos e do apoio da comunidade para envio dos dados, essa abordagem contribui para a geração de séries históricas mais representativas.

Além de fortalecer estudos hidrológicos, climáticos e de gestão de recursos hídricos, a integração entre ciência cidadã e monitoramento da precipitação promove educação ambiental, engajamento comunitário e maior conscientização sobre eventos extremos e seus impactos (Jesus, Cafofo, Ferracioli, 2023). O exemplo no Brasil é a Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, com o site Cemaden Educação, que desenvolveu um aplicativo de ciência cidadã para smartphones para engajar comunidades e escolas sobre as inundações e alagamentos.

Outro exemplo de ciência cidadã e precipitação é o CoCoRaHs (*Community Colaborative Rain, Hail & Snow Network*), sendo uma rede comunitária única, sem fins lucrativos, formada por voluntários de todas as idades e origens, que trabalham

juntos para medir e mapear a precipitação (chuva, granizo e neve) no Estados Unidos. O projeto utiliza de instrumentos de medição de baixo custo, enfatizando o treinamento e a educação, e através de um site interativo o objetivo é fornecer dados da mais alta qualidade para aplicações em recursos naturais, educação e pesquisa.

Embora existam diversas estações meteorológicas instaladas no Estado do Paraná, com dados disponibilizados gratuitamente, ainda ocorrem falhas na transmissão dessas informações. Além disso, a localização das estações pode gerar discrepâncias nos registros de precipitação. Como exemplo, já foi observada no centro da cidade de Apucarana uma precipitação superior a 60 mm em um único dia, enquanto a estação meteorológica local registrou "zero" de chuva, por estar instalada a aproximadamente 7 km de distância da área central. Este mesmo acontecimento ocorreu com Jabur (2010) que uma inundação registrada na cidade de Pato Branco, sudoeste do estado do Paraná, apresentou uma chuva de 150 mm/dia, com os dados obtidos pela estação meteorológica da universidade, porém a estação meteorológica da IAPAR apresentou "zero" de intensidade no mesmo dia, isto significa que a chuva foi localizada e não distribuída na região. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar dados diários de precipitação obtidos por meio de pluviômetros analógicos, instalados com apoio da comunidade, em diferentes municípios do estado do Paraná, contribuindo para a avaliação da variabilidade espacial da chuva e para a valorização da participação social na produção de dados ambientais.

Metodologia

Área de estudo

O clima do Estado do Paraná possui particularidades distintas. Segundo Baldo (2006) apud Costa, Andrade (2017), o Paraná é classificado como uma área de transição entre dois regimes distintos: o tropical e o subtropical. O regime de pluviométrico se reflete nesta transição, pois no Paraná apresenta as chuvas mais distribuídas durante o ano, com poucos meses de estiagem. Deste modo optou-se na locação de 4 pluviômetros modelos simples, cada um correspondente uma cidade distinta (Apucarana, Maringá, Ubiratã e Araucária) apresentados Tabela 1. Os equipamentos foram distribuídos de forma aleatoriamente no Estado do Paraná, em locais de pontos seguros e de fácil acesso para a coleta de informações. A instalação dos pluviômetros seguiu as diretrizes da OMM e o experimento ocorreu no período de janeiro de 2025 a dezembro de 2025.

Tabela 1 – localização das cidades em estudo

Município	Localização	Região	Característica Climática (Koppen)
Apucarana	23° 33′ 03″ S, 51° 27′ 39″ O	Norte	Cfa
Araucária	25° 35′ 34″ S, 49° 24′ 36″ O	Sul (região metropolitana de Curitiba).	Cfb
Maringá	23° 25′ 30″ S, 51° 56′ 20″ O	Noroeste	Cfa
Ubiratã	24° 32′ 42″ S, 52° 59′ 16″ O	Oeste (microrregião de Goioerê)	Cfa

Fonte: Modificado do Google Earth e https://koppenbrasil.github.io/

Essas localidades apresentam características climáticas subtropicais, com variações na distribuição espacial das chuvas influenciadas por fatores como relevo, urbanização e sistemas atmosféricos regionais. Apenas a Cidade de Araúcária apresenta o clima Cfb - Clima temperado, com verão ameno. Chuvas uniformemente distribuídas, sem estação seca e a temperatura média do mês mais quente não chega a 22ºC. Precipitação de 1.100 a 2.000 mm, enquanto as outras cidades apresentam clima Cfa (Clima subtropical, com verão quente. As temperaturas são superiores a 22ºC no verão e com mais de 30 mm de chuva no mês mais seco) (EMBRAPA, 2016).

Método

Os dados pluviométricos foram obtidos por meio de pluviômetros analógicos instalados conforme as orientações da cartilha da ANA (2016). As leituras foram realizadas diariamente, sempre no mesmo horário, considerando o acumulado de precipitação das últimas 24 horas. A coleta dos dados contou com a participação de moradores locais, previamente orientados quanto ao correto manuseio dos equipamentos e registro das informações. Essa abordagem permitiu ampliar a cobertura espacial da coleta e fortalecer o envolvimento da comunidade com questões ambientais.

Foram utilizados dois modelos de pluviômetros, o modelo Cunha com capacidade de 130 mm e o modelo acrílico semicircular com capacidade de 120 mm. Cada responsável pelo pluviômetro instalado, foi oferecido um treinamento de como realizar com a coleta dos dados diários, além das instruções sobre como preencher as planilhas (seja manualmente ou de forma eletrônica). Em casos de dificuldades da leitura do equipamento, o responsável poderia encaminhar uma foto do pluviômetro mostrando o valor da precipitação do dia pelo grupo de rede social.

As informações coletadas pela equipe de monitoramento eram compartilhadas pelo grupo de rede social e inseridas em planilhas eletrônicas, onde se avaliava a intensidade pluviométrica diária de cada um dos equipamentos. As planilhas foram organizadas e um estudo dos dados mensais e do total valor anual de cada ponto pluviométrico foi realizado. As coletas foram realizadas sempre no período da manhã, considerando a chuva para o dia anterior. Caso em períodos de férias ou outros eventos, os valores pluviométricos eram coletados no máximo após 3 dias, evitando o comprometimento dos dados, como a evaporação.

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas e analisados por meio de: cálculo do acumulado pluviométrico por mês; a somatória anual de cada pluviômetro, comparação entre municípios, identificação de dias com maior intensidade de chuva e dos períodos de estiagem.

Através dos dados obtidos observou-se variabilidade significativa na precipitação entre os municípios estudados. Os valores anuais para cada posto pluviométrico, como os dados mensais estão organizados na tabela 2. Sendo Ubiratã com a maior volume de precipitação anual (1572 mm/ano), seguindo de Apucarana, Maringá e por último Araucária.

Tabela 2: Valores mensais de precipitações (mm/mês)

2025	ARAUCÁRIA	APUCARANA	MARINGÁ	UBIRATÃ
JANEIRO	110	248,6	137	124
FEVEREIRO	70	122	130	136
MARÇO	126	65	42	42
ABRIL	82,5	0	62	63
MAIO	50	47	54	95
JUNHO	123,5	100	62	215
JULHO	32,5	0	71	55
AGOSTO	53,5	7	126	98
SETEMBRO	77,5	13	112	106
OUTUBRO	190	149,5	140	256
NOVEMBRO	117	258,4	97	191
DEZEMBRO	55	265	206	175
TOTAL	1087,5	1275,5	1239	1556

Fonte: Autores 2025

Apesar dos valores apresentados, pode-se perceber que 2025 foi um ano com estiagem, pois as precipitações ficaram com valores inferiores considerando as médias anuas obtidas pela SIMEPAR (Tabela 2), Apucarana ficou com a precipitação superior ao valor média anual, porém a distância da estação meteorológica da SIMEPAR em comparação com o pluviômetro instalado é de 7,5 km de distância, o que ocasiona as diferenças de valores. O mesmo ocorre em outras estações, o qual apresentam o modelo de estação meteorológica automática.

Tabela 2: Valores de precipitação anual e média anual das de algumas cidades.

Cidade	Precipitação anual 2025	Média Anual da cidade (20 anos de dados)
Apucarana	1611,8 mm	1523,5 mm
Cascavel	1772,6 mm	1769,1
Curitiba	1371 mm	1437,9 mm
Pinhais	1111,4 mm	1412,9 mm
Maringá	1371,4 mm	1406,1 mm
Ubiratã	1510,2 mm	1513,6 mm

Fonte: SIMEPAR- 2025

Há sempre a dúvida: Por que o volume de água coletado pelo pluviômetro é diferente dos valores registrados por outras estações meteorológicas na mesma região? Isso acontece porque cada equipamento possui uma área de captação distinta, permitindo a avaliação dos erros de leitura e a influência da direção dos ventos. Pesquisas indicam que o vento interfere na "captação" do volume de precipitação, o que pode ser observado na cidade de Apucarana, onde a frequência de ventos é maior do que em outras regiões. É possível notar variações nos dados de estações meteorológicas, como em exemplo em Maringá, que conta com três instituições com estações: SIMEPAR, IAT e Universidade Estadual de Maringá (UEM), cada uma localizada em regiões diferentes da cidade.

A maior dificuldade reportada pela comunidade foi a leitura dos valores de precipitação. O pluviômetro Cunha, por ser de acrílico todo transparente, dificulta a visualização dos valores. Uma solução encontrada foi a adição de gotas de corante alimentício para auxiliar na leitura e reduzir os erros coletados (figura 3c). Outro fator é a perda da qualidade do acrílico, que ao contato com o sol, vai perdendo a qualidade e dificultando a leitura de dados (figura 3a e 3b).

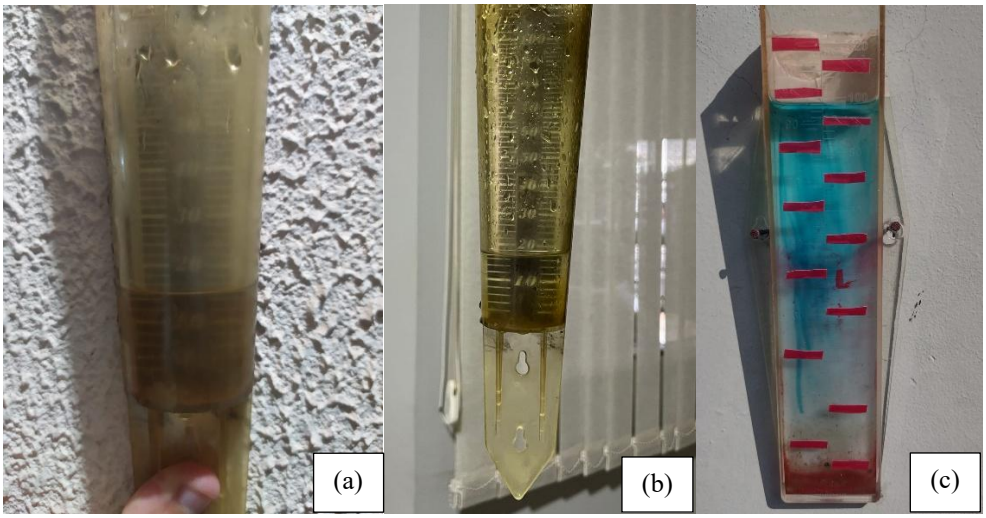


Figura 03: problemas durante a coleta dos dados, escurecimento do acrílico (a) e (b) e uso do corante para auxiliar a leitura (c)
Fonte: Acervo dos Autores (2025)

Com os dados obtidos, realizou-se a elaboração do gráfico, apresentado na figura 4. Pode-se perceber que Apucarana ficou com o maio índice de estiagem, em comparação com as outras cidades (sem chuvas em abril e julho). Sazonalmente em comparação ao mês de janeiro, a cidade de Apucarana se destacou com o maior índice de precipitação, com valor de 248,6 mm/mês, que pode ser justificada por episódios de chuvas locais (convectivas), considerando que a movimentação das entradas de frente frias neste período é baixa, conforme boletim climático para o verão 2024/2025 da SIMEPAR, diferenciando de Maringá, a qual está uma distância de 40 km, e obteve um 137 mm/mês. Segundo o boletim climático que apresentou que o verão seria de precipitações de curta duração, os sistemas frontais (frentes frias) ocorrem com menor frequência, e principalmente aqueles cujo eixo mais instável avança posicionado pela área continental ou sobre o Estado.

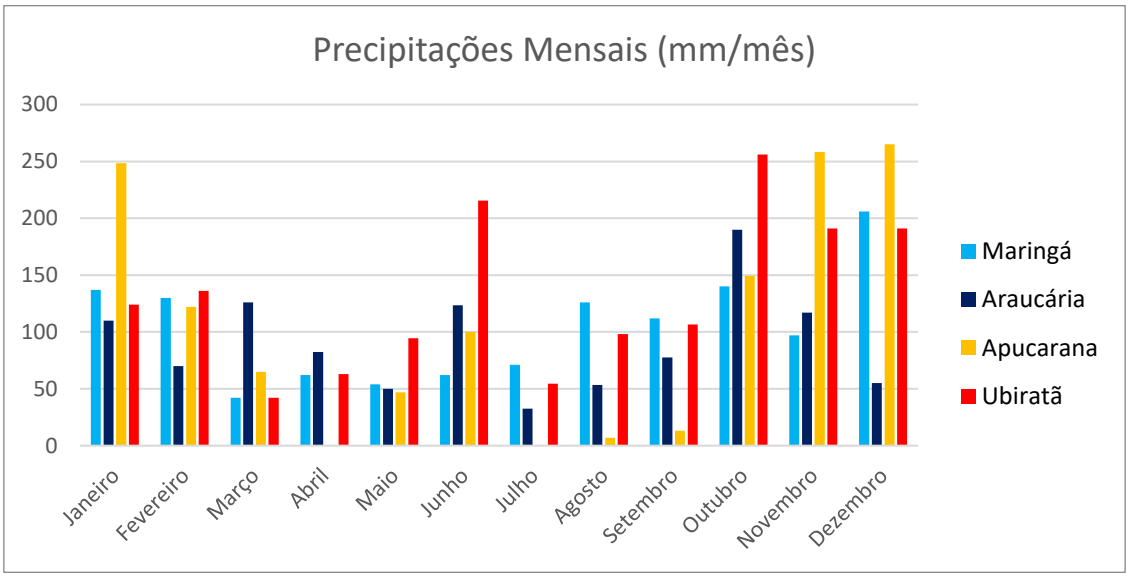


Figura 04: Gráfico com os dados obtidos em nos postos pluviométricos

Em relação a cidade de Araucária, esta apresentou a menor precipitação anual, em comparação as outras cidades, pois devido a sua localização, a jusante da serra do Mar (cadeias montanhosas da região litorânea do estado do Paraná). Logo a maiores precipitações ficam localizadas na região litorânea, e após a entrada da frente fria pelo oceano Atlântico romper a altitudes, a chuva com menor intensidade chega à região metropolitana de Curitiba. Porém observa-se que a chuva foi distribuída durante o ano todo, sem estiagens mensais, o mesmo observado na cidade de Maringá e a cidade de Ubiratã. Apenas Apucarana registrou uma estiagem de 40 dias sem chuvas, como observado na tabela 2, com os meses de abril e julho sem chuva. Outro fator observado, que o mês que mais ocorreu a chuva na cidade de Ubiratã e Araucária foi em outubro, diferente das outras cidades que ocorreram em novembro e dezembro.

Devido ao aumento de interesse da participação do projeto, foi considerado a elaboração de um pluviômetro para ser impresso em impressora 3D. Neste caso, foi utilizado o filamento transparente PLA, para facilitar a leitura da precipitação (figura

5). Serão selecionados mais 5 pontos para ampliar o estudo, sendo mais um ponto em Apucarana, outro na cidade de Cambira (região Norte do Estado), outro ponto em Curitiba (na Ecoville da UTFPR), na UTFPR Campo Mourão, na cidade de Londrina e o último na cidade de Matinhos (litoral do Paraná).

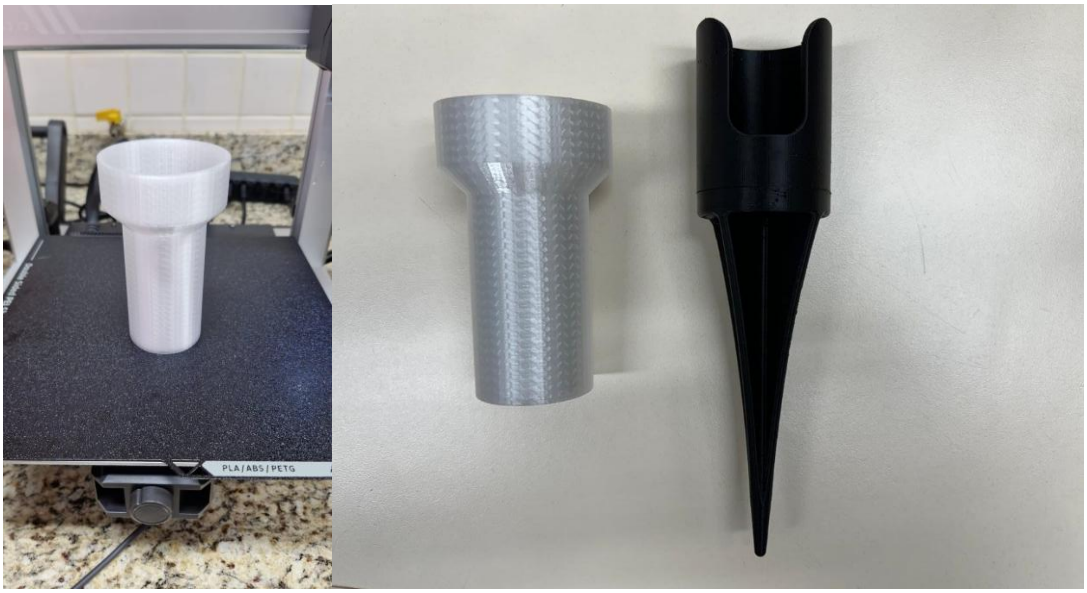


Figura 05: confecção de pluviômetro modelo copo, com suporte de fixação, com uso de impressora 3D

As escolhas dos pontos são devido ao interesse da comunidade ao solicitar o equipamento e participar da comunidade colaborativa de dados de chuva. A comunidade tem sido formada por parentes de professores e até mesmo professores de outras localidades que tiveram o interesse em auxiliar na coleta de dados e participar de um projeto que une a extensão, pesquisa e ensino, para a divulgação da meteorologia.

Conclusão

Os resultados obtidos na pesquisa apresentaram a diferenças regiões em relação a cidades, cada cidade com sua característica climática. Estes valores auxiliaram em pesquisas com a problemática de inundações e alagamentos, para avaliar qual a intensidade pluviométrica que podem ocasionar estes desastres ambientais ou como a impermeabilização do solo interfere no processo de inundações locais. O levantamento de dados do projeto continua para o 2026 mantendo os postos atuais e expandindo para outras cidades. Nos casos dos pluviômetros com baixa visibilidade, devido ao escurecimento do acrílico, este foram trocados para novos pluviômetros. Os dados obtidos serão disponibilizados através de um site, que se encontra em construção, de modo a aumentar a divulgação dos valores e a localização correta de cada posto pluviométrico para comunidade externa.

O interesse no projeto é ampliar os postos, com uma comunidade que auxiliem na divulgação e na coleta dos dados de chuva, visando no aumento de pluviômetros com a confecção destes equipamentos com o uso da impressora 3D.

A participação da comunidade mostrou-se fundamental para a obtenção dos dados, permitindo registros contínuos e ampliando a escala espacial do monitoramento. Apesar disso, ressalta-se a necessidade de padronização rigorosa das leituras, conforme orientado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, para garantir maior precisão e com o passar dos anos, uma maior amplitude de dados nas regiões do Estado do Paraná.

Agradecimentos

Agradecemos a parceria dos colegas que tiveram a paciência e a resiliência em auxiliar a pesquisa, como contribuição dos dados obtidos nas cidades de Araucária e Ubiratã: Sr. Luiz Antônio de Freitas e Sr. José de Moraes.

Referências

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cartilha do Observador – Pluviometria.** 2ª. Edição – Brasília: ANA, SGH, 2014.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de Procedimentos para instalação, operação e manutenção de pluviômetros convencionais.** Brasília: ANA, 2016.

BORGES, E. B. M.; PINA, N. V. M; NASCIMENTO, C. F. do; LATUF, M. O. **Confecção e calibração de pluviômetro alternativo como subsídios à medição de precipitação**. 2012. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/261531592_Confeccao_e_calibracao_de_pluviometro_alternativo_como_subsidio_a_medicao_de_precipitacao. Acesso em 20 de março de 2026.

COCORAHS (Comunity Colaborativy Rain, Hail & Snow Network. Volunteers working together to measure precipitation across the nations. Disponível em https://www.cocorahs.org/.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2015). Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. 2. ed. Porto Alegre, RS: ABRH. (Coleção ABRH ; v. 12), 342 p..

COSTA, C. DA; ANDRADE, A. R. **Dinâmica da precipitação pluviométrica da cidade de Guarapuava, Pr: Condicionantes locais e regionais**. Revista Brasileira de Climatologia. Ano 13, Vol. 21, Jul/Dez de 2017.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Clima: Classificação Koppen. Disponível em https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm. Acesso em 26 de abril de 2026.

Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBIC**T, 2026. Cívis _ plataforma ciencia cidadã. Disponível em < Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT)>.** Acesso em 20 de março de 2026**.**

JABUR, Andrea Sartori. **Alterações hidrológicas decorrentes de mudança do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro, Pato Branco – Pr**. Tese (doutorado). Orientador: Prof. Dr Nivaldo Rizzi. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.2010

JESUS, T. A. C. DE; CAFOFO, E. G.; FERRACIOLI, L. **Monitoramento participativo da precipitação em Santa Teresa: Uma abordagem da ciência cidadã para a gestão de riscos Climáticos**. Experiências em Ensino de Ciências V.18, N.4.

KOPPEN BRASIL. **Classificação climática de Koppen para os municípios brasileiros**. Disponível em <Classificação climática de Köppen para os municípios brasileiros> Acesso em 20 de abril de 2023.

SANTOS, L. N., CABICIERI PROFICE, C., SCHIAVETTI, A., ENRIQUE GRENNO, F. (2024). **Diálogos entre a ciência cidadã e a educação ambiental**. *REMEA - Revista Eletrônica Do Mestrado Em Educação Ambiental*, *41*(2), 209–228. https://doi.org/10.14295/remea.v41i2.15603

SIMEPAR - **Boletim climático para o verão 2024/2025 Período: de 21/12/2024 às 06h20 até 20/03/2025 às 06h01**. Disponível em https://www.simepar.br/simepar/timeline/boletim_climatologico. Acesso em 10/04/2025.

TUCCI, C. E. M.(org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2 ed., v. 4. Porto Alegre: Editora da Universidade, ABRH, 2015.

NITSCHE, P. R., CAROMI, P. H, SILVA, R. W; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do estado do Paraná** [recurso eletrônico]. Londrina (PR): Instituto Agronômico do Paraná, 2019. 210 p. : map. tab. color.

FOMENTANDO A CIÊNCIA CIDADÃ NA EDUCAÇÃO BÁSICA COM PLUVIÔMETROS ARTESANAIS

1 Ana Caroline Fassina, 2 Giancarlo Capistrano, 3Jaqueline Cruz, 4J osiane Cabral, 5 Júlia Campregher Cadore, 6 Gisele Victor Batista, 7 Rogério Simões, 8 João Marcos Bosi Mendonça de Moura

1 Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), e-mail: ana.fassina@edu.udesc.br; 2 Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), e-mail: giancarlo.c@edu.udesc.br; 3 Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), e-mail: jaqueline.cruz@edu.udesc.br; 4 Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), e-mail: josiane.cabral@edu.udesc.br; 5 Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), e-mail: julia.cadore@edu.udesc.br; 6 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: gisele.batista@udesc.br; 7 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: rogerio.simoes@udesc.br; 8 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: joao.moura@udesc.br.

Palavras-chave: Ciência Cidadã; Educação Ambiental; Recursos Hídricos.

Resumo

O presente trabalho aborda o potencial da Ciência Cidadã como estratégia pedagógica para o ensino de recursos hídricos na educação básica, diante do contexto das mudanças climáticas e da intensificação de eventos hidrológicos extremos. O objetivo foi capacitar professores para atuarem como multiplicadores de práticas educativas voltadas ao monitoramento ambiental, por meio da oficina “Professores em Ação: Pluviômetro como Ferramenta para o Ensino de Ciência Cidadã na Educação Básica”, realizada no âmbito da Semana da Água 2025 que se alinha a alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A metodologia adotada consistiu na realização de uma oficina em formato híbrido, envolvendo equipe multidisciplinar das áreas de engenharia, educação e design, com transmissão online síncrona. Foram abordados conceitos básicos de hidrologia, orientações para construção de pluviômetros artesanais com garrafas PET (PluviPet), uso do aplicativo “Dados à Prova d’Água” para registro de dados e elaboração de propostas de planos de aula para diferentes níveis de ensino. Os resultados evidenciaram o interesse da comunidade educacional, com mais de uma centena de visualizações, além da efetiva compreensão dos participantes quanto à construção e utilização do instrumento e à importância do monitoramento pluviométrico. A atividade demonstrou que o uso de tecnologias acessíveis e metodologias participativas favorece a alfabetização científica, o engajamento comunitário e a formação de cidadãos mais conscientes e resilientes frente a riscos hidroclimáticos. Observou-se interesse da comunidade educacional e potencial de replicabilidade da prática em diferentes contextos, concluindo que a integração da Ciência Cidadã ao contexto escolar contribui tanto para a produção de dados ambientais relevantes quanto para o fortalecimento da governança participativa dos recursos hídricos. A iniciativa evidencia o papel da educação básica na construção de sociedades mais sustentáveis, além de constituir uma estratégia acessível, de baixo custo e alto impacto, contribuindo para a alfabetização científica, a participação social e o fortalecimento da resiliência socioambiental.

Introdução

Nas últimas décadas, as mudanças climáticas consolidaram-se como o eixo central das discussões globais sobre desenvolvimento sustentável e segurança humana. Conforme preconiza o sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), a intensificação de eventos hidrológicos extremos é uma realidade implacável que desafia a capacidade de adaptação das sociedades contemporâneas. Nesse cenário, a necessidade de educar, treinar e conscientizar o público torna-se não apenas um imperativo ético, mas uma estratégia técnica de mitigação de riscos, uma vez que o acesso à informação qualificada permite que a população compreenda e interfira positivamente no sistema climático local. A popularização da ciência, defendida por Lamontagne (2002), surge como um pilar fundamental para minimizar os prejuízos socioeconômicos decorrentes de desastres naturais, especialmente no Brasil, onde a dinâmica das águas — manifestada em inundações graduais e bruscas — é a principal protagonista dos cenários de vulnerabilidade urbana e rural.

A Ciência Cidadã, ou *Citizen Science*, define-se pelas parcerias colaborativas entre cientistas profissionais e voluntários da comunidade na coleta e análise de dados para pesquisas de interesse público (Dickinson; Zuckerberg; Bonter, 2010). Esta abordagem participativa transcende a mera coleta de dados, promovendo o que se denomina "ciência aberta", na qual o cidadão deixa de ser um receptor passivo para tornar-se um agente produtor de conhecimento. Tal paradigma alinha-se rigorosamente à Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que estabelece a gestão descentralizada e participativa como um de seus fundamentos. A operacionalização dessa política ocorre por meio do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), que depende de informações granulares para alimentar o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). A descentralização da obtenção de dados, amparada pela Ciência Cidadã, é uma necessidade técnica contemporânea, visto que a rede observacional oficial muitas vezes carece de densidade suficiente para capturar microfenômenos pluviométricos em escala local, os quais são determinantes para o sucesso dos Planos de Recursos Hídricos e para a governança das bacias hidrográficas (Villar; Granziera, 2020).

A precipitação pluviométrica é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para os estudos climáticos. Esta abordagem participativa alinha-se diretamente aos objetivos e instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que instituiu o SINGREH para coordenar a gestão integrada das águas (Villar; Granziera, 2020).

A coleta de dados pluviométricos pela comunidade contribui de forma prática para o fortalecimento do SNIRH, um dos principais instrumentos da PNRH, cujo funcionamento se baseia na descentralização da obtenção e produção de dados. Ao mesmo tempo, a geração de informações locais sobre as chuvas fornece subsídios essenciais para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos, que visam fundamentar a implementação da política hídrica a partir de diagnósticos precisos sobre a disponibilidade e a demanda de água em cada bacia hidrográfica (Villar; Granziera, 2020).

A integração da hidrologia ao cotidiano escolar, conforme sugerido por Kobiyama, Campagnolo e Fagundes (2021), aprimora a aprendizagem social e a gestão de infraestruturas hidráulicas. A educação voltada aos recursos hídricos atua como um catalisador para a melhoria do gerenciamento de bacias, permitindo que diagnósticos sobre demanda e disponibilidade hídrica sejam mais precisos e territoriais. Como reforçam Otto *et al.* (2019) e McKenzie (2021), a comunicação científica e a educação climática são ferramentas de empoderamento que permitem à sociedade civil participar ativamente do monitoramento ambiental, fortalecendo a resiliência comunitária diante de ameaças hidroclimáticas.

No contexto da gestão de recursos hídricos, o monitoramento de dados desempenha um papel crucial pois permite avaliar a qualidade e a quantidade da água, tornando possível identificar impactos ambientais e subsidiar tomada de decisões com base em dados, promovendo gestão e uso mais eficiente e sustentável da água. Com os dados de precipitação, pode-se estudar o impacto sobre o meio ambiente, a agricultura (quando é necessário irrigar, plantar, colher), a frequência e intensidade da chuva em diferentes locais, avaliando padrões climáticos, potencial de erosão do solo, auxiliando na gestão de riscos e desastres (enchentes, alagamentos, deslizamentos) e na disponibilidade de água na bacia hidrográfica, que pode impactar na tomada de medidas preventivas contra secas ou inundações.

Envolver a comunidade na geração de novos conhecimentos acerca do ambiente é o cerne da ciência cidadã (Buytaert *et al.*, 2014), uma vez que a bacia-escola é construída para todos os cidadãos, seu uso é muito apropriado. Assim, o morador local é instruído sobre hidrologia e sua participação nas atividades de coleta de dados é incentivada. Consequentemente, o maior envolvimento da comunidade aumenta a quantidade de informações disponíveis sobre aquela bacia na qual estão inseridos, aumentando o conhecimento do cidadão e auxiliando a comunidade científica em suas pesquisas. Starkey *et al.* (2017) mencionam que esse aumento contribui para a crescente popularidade e relevância da ciência cidadã no âmbito hidrológico. Além de aprimorar a percepção dos cidadãos, essa abordagem pode ajudá-los a reconhecer precocemente os desastres naturais (consciência do risco). De acordo com Buytaert *et al.* (2014), embora o conceito e o potencial da ciência cidadã sejam temas recentes, estes são intrínsecos ao processo de construção do conhecimento científico.

Esta perspectiva está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 6 (Água Potável e Saneamento) da Agenda 2030, na Meta 6.B, que visa apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais para a melhoria da gestão da água, e na Meta 6.5, que busca a implementação da Gestão Integrada de Recursos Hídricos em todos os níveis. Além disso, a proposta dialoga com o ODS 4 (Educação de Qualidade), especialmente a meta 4.7, que visa garantir que todos os alunos adquiram conhecimentos e habilidades necessários para promover o desenvolvimento sustentável, incluindo a educação ambiental para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida sustentáveis, e a cidadania global. Nesse sentido, a inserção da Ciência Cidadã no contexto escolar contribui diretamente para a alfabetização científica e para a formação de sujeitos críticos e participativos. Ademais, a iniciativa também se relaciona com o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), com destaque para a meta 11.C, ao fortalecer capacidades locais para a gestão de riscos e a adaptação a eventos hidrológicos extremos através do uso de materiais sustentáveis e de baixo custo para promoção de conhecimento hidrológico local, promovendo comunidades mais resilientes.

Considerando o potencial transformador dessa abordagem, foi desenvolvida a oficina intitulada "Professores em Ação: Pluviômetro como Ferramenta para o ensino da Ciência Cidadã na Educação Básica". O objetivo central desta iniciativa, vinculada à Semana da Água 2025, foi capacitar educadores para atuarem como multiplicadores do conhecimento técnico-pedagógico. Ao utilizar instrumentos de baixo custo, como os pluviômetros artesanais, a oficina buscou democratizar o acesso à monitoração meteorológica e engajar estudantes na produção de dados reais sobre seus territórios. Portanto, o artigo relata a proposta de uma tecnologia social que auxilia a resolver problemas sociais de forma replicável, sustentável e de baixo custo com potencial de contribuição para o fortalecimento da gestão hídrica e a educação climática de alunos da educação básica.

Material e Métodos

A oficina foi planejada e executada por uma equipe multidisciplinar estratégica, integrando os saberes da Engenharia Civil, com foco em parcelamento do solo e drenagem; da Engenharia Agronômica, voltada à irrigação e captação de água; do Design com foco em gestão de projetos socioambientais e na parte comunicação; e da Educação Básica, representada por uma professora do 5º ano (anos iniciais) e um professor de Biologia (ensino médio). Esta composição permitiu que o conteúdo técnico da hidrologia fosse transposto para uma linguagem didática sem perda de rigor científico. A atividade integrou o plano de ensino da disciplina de Hidrologia e Qualidade da Água do Mestrado Profissional ProfÁgua/UDESC. A execução operacional ocorreu em 26 de setembro de 2025, utilizando um modelo híbrido de interação: a equipe coordenou os trabalhos via Microsoft Teams, enquanto a transmissão ao vivo (ProfÁgua UDESC, 2025) foi realizada pelo YouTube Studio para garantir amplo alcance e acesso assíncrono (Figura 1).

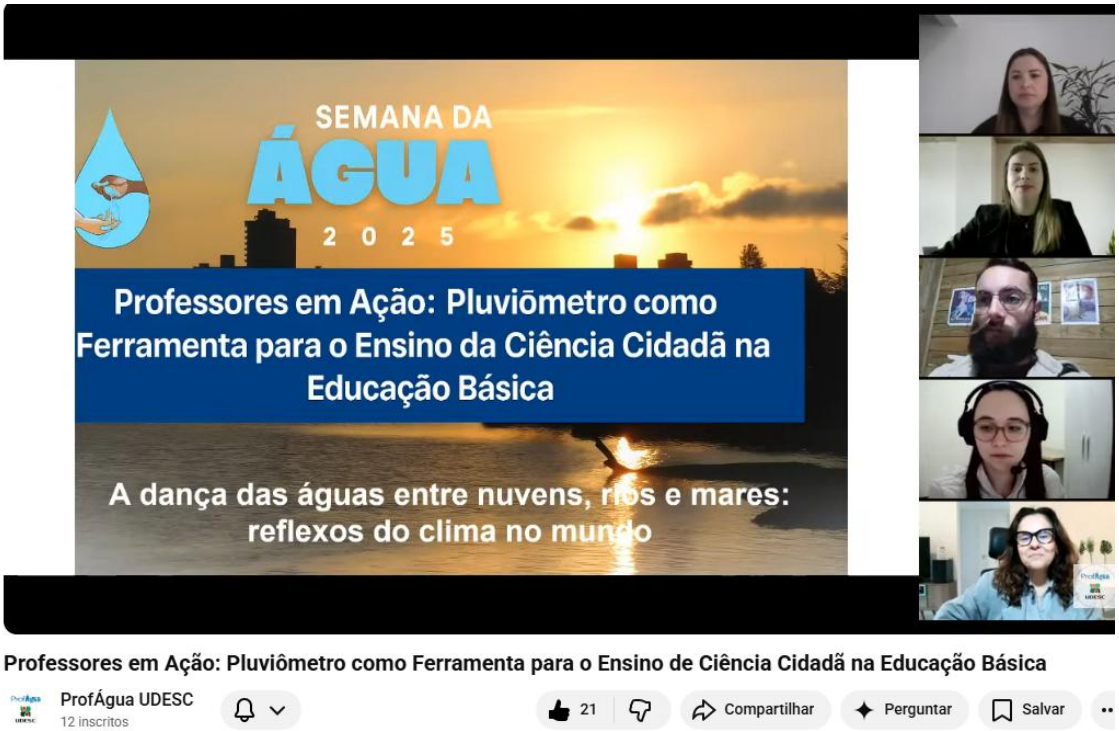


Figura 1: Oficina "Professores em Ação: Pluviômetro como Ferramenta para o ensino da Ciência Cidadã na Educação Básica".Fonte: Autores (2025)

A oficina foi dividida nas seguintes etapas:

- Apresentação de conceitos básicos de hidrologia e Ciência Cidadã;
- Orientações para confecção, instalação e uso do "PluviPet" com base nas orientações do CEMADEN Educação (2021), visando apresentar uma tecnologia social aplicada à gestão hídrica e à educação climática;
- Uso do aplicativo "Dados à Prova D'água" (CEMADEN, 2021) para inserção dos dados produzidos com o "PluviPet";
- Proposta de Plano de Aula com o tema "Medindo a chuva: construção de um pluviômetro com garrafa PET", iniciativa que permitiria a incorporação dos conteúdos anteriormente apresentados em turmas de ensino fundamental;
- Proposta de Plano de Aula com o tema "Pluviômetro caseiro como ferramenta para a prevenção de desastres e planejamento agrícola", instrumento pedagógico que permitiria a incorporação dos conteúdos anteriormente apresentados em turmas de ensino médio.

Resultados e Discussão

A repercussão da oficina foi evidenciada pelas mais de 134 visualizações registradas até 26 de março de 2026, demonstrando o interesse da comunidade educacional por ferramentas práticas de gestão hídrica. A oficina iniciou com a apresentação de conceitos básicos de hidrologia e com a descrição minuciosa do "passo a passo" para a confecção e instalação do "PluviPet", conforme instruções do CEMADEN Educação (2021). A narrativa metodológica iniciou-se pela seleção de uma garrafa PET transparente e estritamente cilíndrica, conforme orientação do CEMADEN Educação (2021). A transparência é vital para a visibilidade do nível d'água, enquanto a geometria cilíndrica é um requisito técnico fundamental para garantir que a medida do volume captado seja linear em relação à altura na escala milimetrada, permitindo leituras diretas em milímetros (mm). O processo de montagem envolveu o corte da parte superior da garrafa para a criação de um funil invertido, o qual foi encaixado na base para minimizar perdas por evaporação. Na lateral externa, fixou-se uma fita métrica milimetrada, protegida por fita adesiva transparente para evitar o desgaste pela umidade. A equipe enfatizou a importância de a área de captação do bocal ser idêntica à área interna do cilindro de leitura, assegurando a precisão do instrumento (Figura 2).

A instalação do PluviPet exigiu orientações técnicas rigorosas quanto à escolha do local. Os participantes foram instruídos a fixar o equipamento em áreas abertas, mantendo uma distância segura de obstáculos como árvores, telhados ou muros, os quais poderiam causar o efeito de "sombra de chuva" ou, inversamente, o gotejamento adicional, falseando os dados coletados. A recomendação de monitoramento diário estabeleceu que as leituras fossem realizadas preferencialmente no mesmo horário todos os dias, seguindo o padrão das redes observacionais oficiais. Após cada registro, orientou-se que o recipiente deve ser esvaziado, preparando o instrumento para o próximo ciclo de 24 horas. Este procedimento não apenas gera dados técnicos, mas instaura uma rotina de observação científica no ambiente escolar, conectando o currículo à realidade fenológica local.

Um ponto central da discussão foi a integração tecnológica através do aplicativo "Dados à Prova d'Água" (Waterproofing Data++). O fluxo narrativo para a utilização desta ferramenta inicia-se pelo cadastro de usuário, estruturado em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). Para criar uma conta, o cidadão deve fornecer obrigatoriamente um apelido, número de telefone, senha, estado, cidade, além de definir uma pergunta de segurança com sua respectiva resposta.

Informações como data de nascimento, gênero e vínculo institucional são opcionais, permitindo maior flexibilidade. Uma vez registrado, o aplicativo habilita o cidadão a gerar quatro tipos essenciais de dados: áreas de alagamento, intensidade da chuva, diário pluviométrico (vinculado ao pluviômetro artesanal) e o nível do rio.

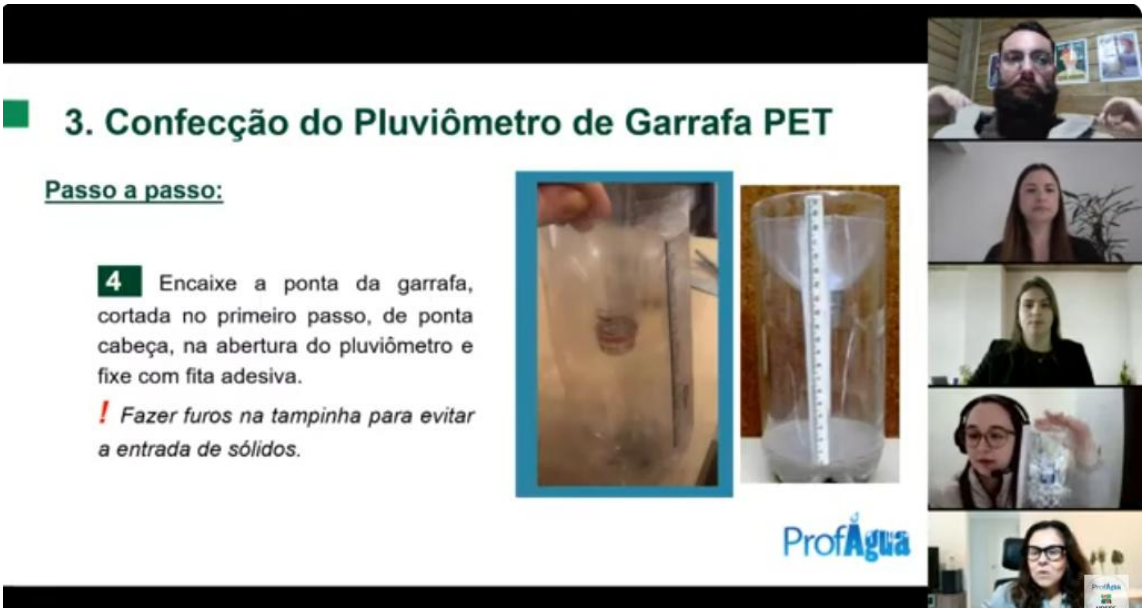


Figura 2: "Apresentação da metodologia e confecção em tempo real de um PluviPet".
Fonte: Autores (2025)

No contexto dos Anos Iniciais do Ensino Fundamental, com foco no 5º ano, a proposta pedagógica "Medindo a chuva" explorou a integração entre alfabetização científica e letramento matemático, em consonância com as competências gerais da Base Nacional Comum Curricular (BNCC). A atividade promove a investigação de fenômenos naturais por meio da observação sistemática e da experimentação, ao envolver os estudantes na construção e utilização do pluviômetro artesanal, transformando a leitura do pluviômetro em um exercício de alfabetização científica. Nesse processo, são mobilizadas habilidades relacionadas à interpretação de dados, comparação de medidas e reconhecimento de padrões climáticos, articulando conteúdos de Ciências da Natureza e Matemática de forma interdisciplinar. Além disso, a prática favorece o desenvolvimento do pensamento crítico e da consciência socioambiental, ao conectar o monitoramento da chuva com situações do cotidiano dos alunos, como enchentes e escassez hídrica. Dessa forma, a atividade transcende o caráter instrumental, constituindo-se como estratégia pedagógica que estimula o protagonismo discente e a compreensão do papel do indivíduo na produção de conhecimento científico.

No Ensino Médio, a abordagem evoluiu para o plano "Pluviômetro caseiro como ferramenta para a prevenção de desastres e planejamento agrícola" o que amplia o nível de complexidade conceitual e analítica, em que os dados coletados foram integrados à discussão sobre gestão de risco municipal e produtividade rural, alinhando-se às competências da BNCC voltadas à investigação científica, à argumentação e à resolução de problemas socioambientais. Nessa etapa, os dados pluviométricos coletados pelos estudantes são incorporados a discussões mais abrangentes sobre gestão de riscos, variabilidade climática e uso sustentável dos recursos hídricos, permitindo a articulação entre conhecimentos das Ciências da Natureza, Geografia e áreas afins. A atividade incentiva a análise crítica de informações, a interpretação de indicadores ambientais e a compreensão de sua aplicação em contextos reais, como o planejamento agrícola e a atuação da Defesa Civil. Ainda, ao utilizar ferramentas tecnológicas para registro e compartilhamento de dados, promove-se o letramento digital e a participação ativa dos estudantes em redes de monitoramento colaborativo. Essa abordagem pedagógica evidencia o potencial da Ciência Cidadã como instrumento formativo para a construção de uma cidadania científica, e demonstra aos estudantes que a hidrologia cidadã pode ser utilizada tanto para o ensino de conceitos básicos quanto para o planejamento territorial avançado.

A discussão técnica integrou conceitos fundamentais para a gestão de riscos, tais como a definição de cota, que representa o nível do rio em metros em relação a um referencial, e vulnerabilidade, entendida como o grau de perda potencial para um grupo ou elemento dentro de uma área passível de impacto. A resiliência foi abordada como a capacidade adaptativa da comunidade para superar obstáculos impostos por eventos extremos. Dentro da funcionalidade de registro de alagamentos do aplicativo, trabalhou-se a distinção entre áreas transitáveis — onde o tráfego de veículos ainda é possível apesar do acúmulo de água — e áreas intransitáveis, onde a altura da inundação impede o fluxo e coloca em risco a segurança. Para o registro da intensidade da chuva, quando o usuário não possui um pluviômetro, o app oferece uma escala qualitativa que varia de "sem chuva" até "chuva forte", alinhada tecnicamente às métricas oficiais em que, por exemplo, a chuva forte é caracterizada por acumulados acima de 40 mm/h.

A integração desses dados gerados por cidadãos à rede observacional do CEMADEN representa um avanço significativo na governança das águas (Villar; Granziera, 2020). Enquanto os pluviômetros automáticos oficiais fornecem uma base de dados robusta, a Ciência Cidadã preenche as lacunas espaciais, oferecendo uma visão capilarizada dos eventos. No aplicativo, o usuário

pode classificar o nível do rio como baixo (próximo ao fundo), normal (metade da profundidade), alto (ocupando todo o leito sem transbordar) ou transbordado (quando excede a calha e atinge o entorno). Esta classificação popular, ao ser compartilhada, alimenta sistemas de alerta antecipado, comprovando que a educação básica é um elo vital na infraestrutura de resiliência das cidades brasileiras.

Considerações Finais

A oficina "Professores em Ação: Pluviômetro como Ferramenta para o ensino da Ciência Cidadã na Educação Básica" consolidou a Ciência Cidadã como uma ponte eficaz entre o rigor da hidrologia e a prática pedagógica na educação básica. A experiência demonstrou que a utilização de materiais de baixo custo e fácil acesso, como as garrafas PET para a construção do “PluviPet”, elimina barreiras econômicas e democratiza o monitoramento ambiental. O pluviômetro artesanal abordado na oficina representa não apenas uma solução de baixo custo e replicável, mas uma oportunidade de transformação social e territorial, especialmente em regiões com pouco investimento em infraestrturura de monitoramento. Nesse contexto, a capacitação de professores como agentes multiplicadores garantiu que o conhecimento técnico sobre as águas chegasse de forma contextualizada aos estudantes, transformando a rotina de medição de chuva em um ato de engajamento cívico e prevenção de desastres.

Quando a escola passa a atuar como ponto de coleta de dados de precipitação, entende-se que ela deixa de ser apenas espaço de transmissão de conhecimento e passa a integrar, ainda que de forma descentralizada, a infraestrutura observacional do território. A oficina proposta capacita os professores para associar o PluviPet a rotinas sistemáticas de medição e ao uso de plataformas digitais que podem contribuir diretamente para o fortalecimento do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Mais do que volume de dados, o que se observa é a qualificação da governança: estudantes e comunidades passam a atuar como produtores e validadores de informação, aproximando ciência, educação e gestão pública. Nesse sentido, a escola não apenas contribui com dados, mas ajuda a construir uma cultura de percepção de risco essencial para sistemas de alerta precoce e para a tomada de decisão em contextos de risco climático.

As limitações identificadas na oferta da oficina decorrem da impossibilidade de obter feedback demográfico detalhado e no acompanhamento imediato, decorrentes do formato online da transmissão. Para reduzir esta lacuna e minimizar a transitoriedade do evento, sugere-se a implementação de redes colaborativas permanentes por meio de aplicativos de mensagens instantâneas. A utilização de grupos nesses aplicativos para coleta de feedback pós-capacitação e compartilhamento de experiências pedagógicas configura-se como uma estratégia eficaz para manter a rede observacional ativa e engajada. A integração da Ciência Cidadã ao currículo escolar contribui tanto para a geração de dados relevantes a instituições como o CEMADEN quanto para a formação de cidadãos mais conscientes e resilientes. Em síntese, a iniciativa destaca que a gestão de recursos hídricos no Brasil deve ser participativa, incentivando cada escola como estação de monitoramento e cada aluno como agente científico local. A consolidação dessas redes é essencial para que a ciência cidadã se torne um componente sistêmico da vigilância socioambiental regional, deixando de ser um evento pontual.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), do Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Grupo de Trabalho de Educação Ambiental da Região Hidrográfica 07 de Santa Catarina (GTEA RH07SC).

Referências Bibliográficas

Buytaert, W. et al. Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. **Frontiers in Earth Science**, v. 2, p. 26, 2014.

CEMADEN EDUCAÇÃO. **Aprenda a fazer um pluviômetro artesanal**. 2021. Disponível em: https://educacao.cemaden.gov.br/midiateca/aprenda-a-fazer-um-pluviometro-artesanal/. Acesso em: 20 abr. 2026.

CEMADEN. **Dados à Prova d’Água**. Aplicativo móvel. Google Play, 2021. Disponível em: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.dadosaprovadagua.wpdmobileapp. Acesso em: 20 abr. 2026.

Dickinson, J.; Zuckerberg, B.; Bonter, D. Citizen science as an ecological research tool. Annual Review of Ecology and Systematics, **Palo Alto**, v. 41, n. 1, p. 149-172, 2010.

IPCC. **Climate Change 2021**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

Kobiyama, M.; Campagnolo, K.; Fagundes, M. R. Ruralization for water resources management in urban area revisited. **Revista Geográfica Acadêmica**, Boa Vista, v. 15, n. 2, p. 68-88, 2021.

Lamontagne, M. An overview of some significant eastern Canadian earthquakes and their impacts on the geological environment, buildings and the public. **Natural Hazards**, v. 26, p. 55-67, 2002.

Mckenzie, M. Climate change education and communication in global review: tracking progress through national submissions to the UNFCCC Secretariat. **Environmental Education Research**, v. 27, n. 5, p. 631-651, 2021.

Otto, D. *et al.* Can MOOCs empower people to critically think about climate change? A learning outcome based comparison of two MOOCs. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 12-21, 2019.

PROFÁGUA UDESC. **Professores em Ação**: Pluviômetro como Ferramenta para o Ensino de Ciência Cidadã na Educação Básica. YouTube, 2025. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=JbS236tH1VY. Acesso em: 20 abr. 2026.

Starkey, E. *et al.* Demonstrating the value of community-based ('citizen science') observations for catchment modelling and characterization. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 801-817, 2017.

Villar, P. C.; Granziera, M. L. M. **Direito de águas à luz da governança**. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2020.

ENTRE A SAÚDE E O MEIO AMBIENTE: DESCARTE CORRETO DE MEDICAMENTOS VENCIDOS E EDUCAÇÃO AMBIENTAL COMO FERRAMENTAS DE TRANSFORMAÇÃO SOCIAL

1 Gisele Aguiar Bauer Passos de Souza, 2 Kelerson Willian da Silva Gomes, 3 Larissa Drummond de Moura Porto, 4 Lívia Maria da Costa Silva

1 Coordenadoria de Saúde Ambiental da Pró-Reitoria de Saúde (PR-5) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, e-mail: grss.hupe@gmail.com; 2 Pró-Reitoria de Saúde (PR-5) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – *UERJ, e-mail: grss.hupe@gmail.com; 3 Pró-Reitoria de Saúde (PR-5) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, e-mail: drummondmoura@hotmail.com; 4 Coordenadoria de Saúde Ambiental da Pró-Reitoria de Saúde (PR-5) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, e-mail:livia.silva@uerj.br*

Palavras-chave: Saúde ambiental; logística reversa; contaminantes persistentes; hospital universitário

Resumo

O descarte inadequado de medicamentos vencidos e em desuso constitui um problema socioambiental relevante, com impactos diretos sobre a saúde pública e o meio ambinte, especialmente pela contaminação de solos e recursos hídricos e pelo agravamento da resistência antimicrobiana. Embora existam normativas que regulamentem a logística reversa desses resíduos, ainda persiste um déficit de informação e adesão da população às práticas adequadas de descarte. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo promover a educação ambiental e ampliar o acesso ao descarte ambientalmente adequado de medicamentos domiciliares no Hospital Universitário Pedro Ernesto (HUPE/UERJ), que é de grande porte e alta complexidade, sendo um dos hospitais do Complex de Saúde da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, descritiva e de abordagem qualiquantitativa, desenvolvida por meio da implantação de cinco pontos de coleta em áreas estratégicas do hospital e da realização de ações educativas voltadas a pacientes, acompanhantes e colaboradores, com orientação verbal e distribuição de materiais informativos. Os resultados evidenciaram a efetividade da integração entre educação ambiental e infraestrutura de coleta, com a destinação ambientalmente adequada de 24,3 kg de medicamentos no período de janeiro a abril de 2026, além de relatos qualitativos que demonstraram ampliação do conhecimento e mudança de percepção sobre os riscos do descarte inadequado. Conclui-se que a articulação entre educação socioambiental e logística reversa constitui uma estratégia eficaz para fomentar práticas sustentáveis, fortalecer a responsabilidade compartilhada e contribuir para a mitigação dos impactos ambientais e sanitários associados aos resíduos farmacêuticos.

Introdução

A Lei nº 5.991/1973 (BRASIL, 1973) define medicamento como todo produto farmacêutico, tecnicamente obtido ou elaborado, com finalidade profilática, curativa, paliativa ou para fins de diagnóstico. Trata-se, portanto, de um insumo essencial à promoção da saúde, mas cuja circulação, armazenamento e disposição final exigem atenção rigorosa em razão dos riscos sanitários e ambientais associados ao seu uso inadequado e ao descarte incorreto.

A falta de informação e o descarte de medicamentos de maneira imprópria no meio ambiente compromete a saúde humana e o meio ambiente como um todo. Diversos estudos (MESCHEDE et al., 2021; PUCKOWSKI et al., 2016; SILVA et al., 2022) mencionam a presença de resíduos farmacêuticos e metais pesados no ecossistema, que geram preocupações sobre a bioacumulação e os riscos à saúde pública, comprovando perturbações à saúde humana e de outras espécies, causando alterações fisiológicas, mutagênicas e patológicas que não apenas interferem negativamente em cada indivíduo afetado, mas também na sociedade que o cerca. Os fármacos da classe dos antibióticos, hormônios e quimioterápicos são os de maior impacto negativo ambiental devido à resistência bacteriana, alterações hormonais em espécies de animais, potencial bioacumulativo, entre outros efeitos na cadeia ecológica (BILA; DEZOTTI, 2003). Como exemplos, podem ser citados os antibióticos, que favorecem o surgimento de bactérias resistentes quando dispostos inadequadamente na natureza, e os hormônios utilizados para reposição ou presentes em anticoncepcionais que afetam o sistema reprodutivo de organismos aquáticos, como, por exemplo, a feminização de peixes machos (EICKHOFF; HEINECK; SEIXAS, 2009). Na saúde humana, pesquisas indicam a possibilidade de que a maior incidência de distúrbios como defeitos de nascimento, alterações comportamentais e neurológicas, deficiência imunológica, puberdade acelerada, qualidade do sêmen e cânceres tenham relação com poluentes emergentes com ação desreguladora endócrina (REIS FILHO, RW, LUVIZOTTO-SANTOS, R., & VIEIRA, EM, 2007). Assim sendo, devido à importância ambiental do descarte dos resíduos, em especial os medicamentos, normativas recentes, federal e estadual, foram editadas, a saber: Decreto Federal nº 10.388/2020 (BRASIL, 2020) e Decreto Estadual nº 48.354/2023 (RIO DE JANEIRO, 2023).

Vale ressaltar que nem todo fármaco presente na natureza foi descartado de maneira incorreta: muitos são ingeridos e excretados sem sequer sofrerem alterações, através de fezes e urina em uma taxa que varia de 50% a 90%, persistindo no meio ambiente.

Nesse cenário, o descarte inadequado de medicamentos deixa de ser uma questão restrita ao domicílio ou às unidades de saúde e passa a configurar um problema coletivo, de interface entre saúde pública, educação ambiental e engenharia ambiental e sanitária. Nesse sentido, a Universidade deve atuar como disseminadora de conhecimento sobre a saúde ambiental, no que tange, por exemplo, ao repensar, ressignificar e destinar os resíduos corretamente, contribuindo para a Agenda 2030, em especial com os

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 4, 11 e 12. A educação ambiental, quando articulada com a extensão universitária, constitui ferramenta estratégica para a transformação social, pois possibilita a aproximação entre conhecimento científico, prática cidadã e responsabilidade coletiva.

Portanto, o presente projeto foi desenvolvido com o objetivo de promover a educação ambiental entre pacientes, acompanhantes e colaboradores do Hospital Universitário Pedro Ernesto (HUPE), com ênfase nas práticas de armazenamento e descarte adequado de medicamentos. Nesse sentido, busca-se contribuir para a mitigação do atual cenário caracterizado pelo descarte inadequado de resíduos medicamentosos e pelo limitado conhecimento acerca de seus impactos ambientais e sanitários, por meio da implementação de ações educativas de caráter coletivo. Adicionalmente, o projeto contempla a instalação de pontos de coleta de medicamentos domiciliares vencidos e/ou em desuso nas dependências do HUPE, assegurando o encaminhamento desses resíduos para destinação final ambientalmente adequada.

Material e Métodos

O projeto de extensão é desenvolvido no Hospital Universitário Pedro Ernesto (HUPE), da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), localizado na cidade do Rio de Janeiro - RJ (Brasil). De natureza aplicada, descritiva e abordagem qualiquantitativa, o projeto implantou cinco pontos de coleta (caixas lacradas, figura 01) para medicamentos vencidos e/ou em desuso, destinados a pacientes, familiares e funcionários. Os locais de instalação - recepção do prédio do Centro de Pesquisa Clínica Multiusuário - CEPEM, entrada dos funcionários do HUPE, entrada da internação do HUPE, farmácia ambulatorial e complexo de ambulatórios (no antigo Colégio Argentina) - foram definidos com base em critérios de fluxo e acessibilidade, visando ampliar o alcance da ação e facilitar o descarte ambientalmente adequado (Figura 1).



Figura 01: Imagem da caixa de coleta para medicamentos vencidos/em desuso cheia, instalada próxima à farmácia ambulatorial do HUPE/UERJ.
Fonte: Acervo pessoal (2026)

A coleta dos resíduos ocorreu conforme a demanda, ou seja, pelo preenchimento das caixas, com posterior encaminhamento para destinação ambientalmente adequada por incineração. Por fim, o monitoramento dos resíduos coletados foi realizado mensalmente, permitindo o acompanhamento contínuo da evolução dos resultados e dos impactos da educação ambiental promovida diariamente pela bolsista do projeto.

Ademais, a abordagem qualitativa foi operacionalizada por meio de orientação verbal (Figura 2), consistindo em explanações diárias conduzidas pela bolsista do projeto. Nessas atividades, o conteúdo foi apresentado em linguagem acessível, com o emprego de exemplos do cotidiano, de modo a favorecer a compreensão por parte de pacientes, acompanhantes e colaboradores, público caracterizado pela heterogeneidade dos níveis de escolaridade. Adicionalmente, a abordagem adotada fundamentou-se na comunicação acessível e na escuta ativa, possibilitando o esclarecimento de dúvidas recorrentes.

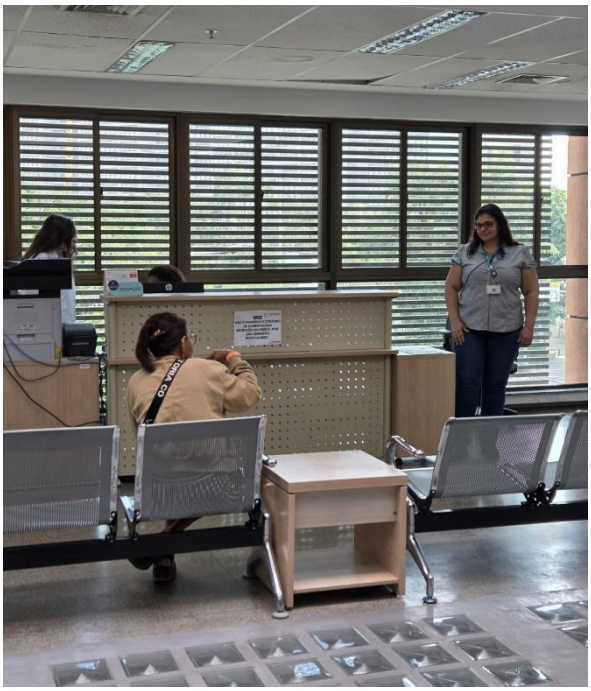


Figura 02: Imagem de uma ação educativa realizada pela bolsista na espera do atendimento ambulatorial do CEPEM-HUPE/UERJ.Fonte: Acervo pessoal (2026)

Complementarmente, foram utilizados materiais educativos de apoio, como cartazes informativos (Figuras 3 e 4), em formato A4, afixados nas proximidades dos pontos de coleta e em áreas de grande circulação do hospital, bem como *folders* informativos distribuídos ao término das orientações (Figura 5).

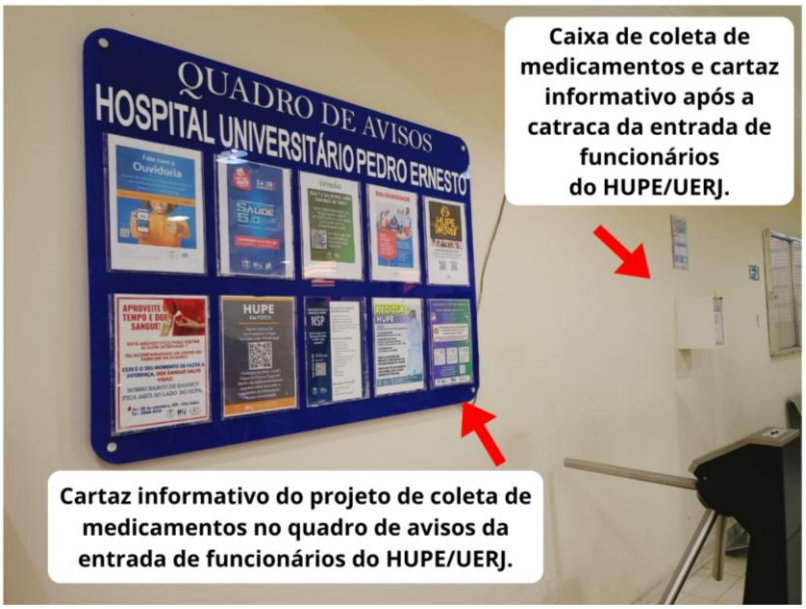


Figura 03: Imagem do informativo afixado nos espaços do HUPE/UERJ.
Fonte: Acervo pessoal (2026)



Figura 04: Imagem do informativo.
Fonte: Acervo pessoal (2026)



Figura 05: Imagens (frente e verso) do folder entregue aos ouvintes após a ação de educação socioambiental nas dependências do HUPE e seus ambulatórios.
Fonte: Acervo pessoal (2026)

Durante as exposições, são abordados aspectos gerais relacionados ao armazenamento adequado de medicamentos no ambiente domiciliar, com vistas a evitar alterações biofísico-químicas em seus componentes, as quais podem comprometer sua eficácia terapêutica e acarretar riscos à saúde, tais como reações adversas não previstas e o desenvolvimento de resistência antimicrobiana (BRASIL, [s.d.]). Adicionalmente, são discutidos os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado, incluindo a contaminação de solos e recursos hídricos, bem como os prejuízos à saúde coletiva associados a essas práticas (ONU, 2019). Por fim, são apresentados os pontos de coleta disponíveis para o descarte de medicamentos, tanto nas dependências do HUPE quanto em outras localidades do Complexo de Saúde da UERJ.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos demonstram que as intervenções educativas promoveram uma reorientação cognitiva e comportamental nos indivíduos alcançados. Observou-se uma participação progressiva da comunidade hospitalar, evidenciada pelo incremento e pela constância do volume de fármacos depositados nos dispositivos de coleta. A Figura 6 ilustra o impacto do projeto, entre janeiro e abril de 2026, tendo havido a coleta de 24,3 kg de medicamentos domiciliares que foram destinados de uma forma ambientalmente adequada.

A oscilação quantitativa mensal (Figura 6) justifica-se pelo comportamento dos usuários, que frequentemente optam pelo armazenamento temporário em domicílio para posterior descarte em lote. Adicionalmente, a retração observada no mês de fevereiro correlaciona-se à redução de dias úteis em virtude do período carnavalesco, o que impactou o fluxo de atendimentos e, consequentemente, a coleta. Paralelamente aos dados quantitativos, a coleta de relatos subjetivos dos participantes forneceu evidências qualitativas sobre a eficácia da sensibilização.

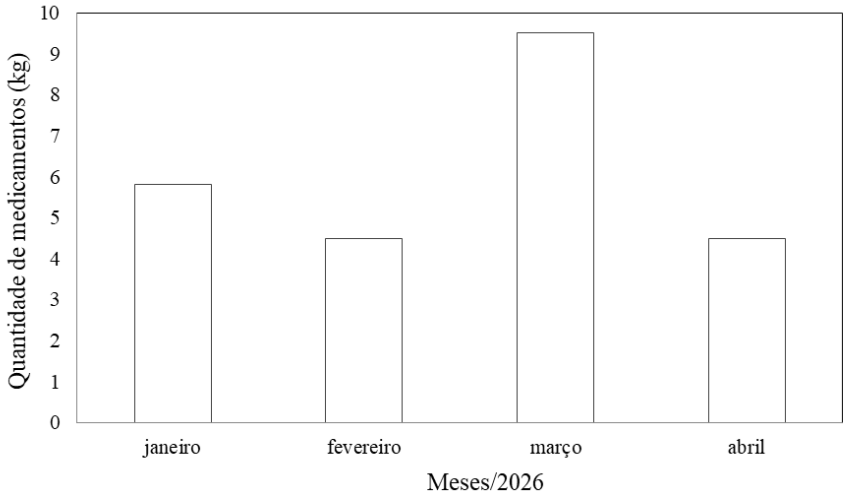


Figura 06: Dados correspondentes à coleta de medicamentos do HUPE/UERJ de janeiro a abril de 2026.
Fonte: Acervo pessoal (2026)

A problemática do manejo inadequado de resíduos medicamentosos é amplamente debatida na literatura científica devido à sua transitoriedade entre riscos à saúde pública e impactos ambientais severos. O descarte em efluentes domésticos ou em resíduos sólidos urbanos contribui para a introdução de micropoluentes em corpos hídricos, expondo biota e seres humanos a princípios ativos farmacologicamente persistentes. Nesse prisma, a logística reversa configura-se como o paradigma central da gestão de resíduos farmacêuticos, amparada normativamente pelas diretrizes da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que preconizam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto.

Sob essa ótica, assim como no presente trabalho, iniciativas extensionistas como a campanha "REMELIXO" ilustram como a integração entre educação em saúde e infraestrutura operacional pode atuar como um dispositivo de transformação socioambiental (SILVA et al., 2023; TODESCHINI et al., 2025). Ademais, como observado no presente projeto, a instalação de pontos de coleta institucionais, assim como ocorre na iniciativa promovida pela FioSaúde (2019), corrobora a premissa de que a acessibilidade geográfica é condição essencial para a viabilização da logística reversa.

Todavia, a literatura adverte que a mera oferta de infraestrutura técnica é insuficiente; urge a implementação de estratégias de educação ambiental que confrontem o déficit informacional e fomentem o engajamento crítico. Ações desenvolvidas em contextos comunitários demonstram que a conscientização é o determinante fundamental para a adesão sustentada aos sistemas de coleta (SANTOS et al., 2020).

A gestão desses resíduos constitui um fenômeno complexo que transcende variáveis meramente técnicas, englobando dimensões educacionais, institucionais e antropológicas. Embora o arcabouço jurídico brasileiro, notadamente o Decreto Federal nº 10.388/2020 e a Lei nº 12.305/2010, estabeleça fundamentos sólidos, os dados empíricos revelam um hiato significativo entre a teoria regulatória e a efetividade operacional. Os achados de Pinto et al. (2014) convergem com a presente investigação ao identificarem a escassez de campanhas educativas permanentes como o principal catalisador do descarte irregular. Santos et al. (2020) reforçam essa perspectiva ao destacar que a existência de dispositivos legais não induz mudanças comportamentais sem a mediação de processos pedagógicos sistêmicos, evidenciando que a lacuna informacional permanece como o maior entrave à eficácia das políticas ambientais no setor.

Ademais, os relatos colhidos durante este estudo sugerem que a informação sobre o descarte correto é frequentemente percebida de forma inédita pelo cidadão, o que denuncia a insuficiência do tema nos currículos acadêmicos e escolares formais. Tal cenário dialoga com a literatura ao apontar que a educação ambiental, quando não institucionalizada, torna-se dependente de esforços isolados, comprometendo sua sustentabilidade.

Perini et al. (2026), por meio de questionário *on-line* realizado com 310 participantes, concluíram que há necessidade urgente de ampliar ações de educação ambiental e de saúde pública, fortalecendo a divulgação e implementação da logística reversa de medicamentos no Brasil, especialmente em grupos menos informados e fora da área da saúde. Ademais, conforme discutido por Leal, Araújo e Mendonça (2026), a crescente demanda por conteúdos digitais curtos exige uma adaptação das estratégias de comunicação ambiental às dinâmicas contemporâneas, marcadas pela fragmentação da atenção e pelo imediatismo informacional.

Em uma escala global, os dados apresentados por Dzekashu, Akoachere e Mbacham (2021) revelam a magnitude da crise, com mais de 3.000 princípios ativos em circulação e uma produção anual estimada em 100.000 toneladas. Esta realidade é agravada pelas projeções da Organização das Nações Unidas (ONU, 2019), que alertam que a resistência antimicrobiana - potencializada pelo descarte incorreto - poderá resultar em 10 milhões de mortes anuais nas próximas décadas.

No contexto brasileiro, segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2025), o Grupo de Acompanhamento de Performance (GAP), criado pelo Decreto Federal nº10.388/2020, o sistema de logística reversa de

medicamentos por meio do programa LogMed, em 2024, recolheu e destinou adequadamente 783 toneladas de medicamentos e embalagens, totalizando mais de 1.500 toneladas desde o início de suas operações, que ocorreu em 2021.

Dessa forma, a análise comparativa entre a literatura e a prática extensionista permite afirmar que a eficácia da gestão de resíduos farmacêuticos depende de uma abordagem holística que harmonize regulação, educação e infraestrutura. A ausência dessa articulação sistêmica condena o sistema à fragmentação. Portanto, a responsabilização puramente individual do cidadão revela-se limitada; é imprescindível enfrentar as falhas institucionais e estruturais que condicionam o comportamento social.

Considerações finais

Os resultados obtidos no âmbito do presente projeto evidenciam impactos positivos, a partir da análise dos dados registrados entre janeiro e abril de 2026, referentes à coleta de medicamentos vencidos e/ou em desuso nas dependências do HUPE, bem como do retorno qualitativo dos participantes das ações educativas realizadas. Tais evidências indicam que a iniciativa vem alcançando o objetivo proposto de promover a conscientização e a educação ambiental, especialmente no que se refere às práticas adequadas de armazenamento e descarte de medicamentos domiciliares.

Como perspectiva de continuidade e ampliação do alcance das ações, encontra-se em avaliação a produção e disponibilização de material audiovisual contendo a explanação do conteúdo abordado, com divulgação em plataformas digitais institucionais, incluindo o canal oficial do hospital no YouTube, além de outros meios de comunicação vinculados à UERJ. Espera-se, com isso, potencializar a disseminação das informações, contribuindo para a adoção de práticas mais seguras e ambientalmente adequadas por um público ampliado, bem como para a multiplicação desse conhecimento na comunidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pró-Reitoria de Saúde (PR-5/UERJ) pelo apoio institucional e financeiro, ao Núcleo de Gerenciamento de Resíduos do HUPE pelo suporte operacional, bem como à Pró-Reitoria de Extensão (PR-3/UERJ) pela concessão de bolsa de extensão.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2025*. São Paulo: ABREMA, 2025.

BILA, D. M.; DEZOTTI, M. Fármacos no meio ambiente. Química Nova, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 523–530, 2003.

BRASIL. Decreto nº 10.388, de 5 de junho de 2020. Institui o sistema de logística reversa de medicamentos domiciliares. Brasília, DF: Presidência da República, 2020.

BRASIL. Lei nº 5.991, de 17 de dezembro de 1973. Dispõe sobre o Controle Sanitário do Comércio de Drogas, Medicamentos, Insumos Farmacêuticos e Correlatos. Brasília, DF, 1973.

BRASIL. Ministério da Saúde. Uso e armazenamento de medicamentos. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/s/saude-da-pessoa-idosa/uso-e-armazenamento-de-medicamentos. Acesso em: 1 maio 2026.
BRASIL. Política de resíduos sólidos. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Brasília, DF, 2010.

DZEKASHU, L.; AKOACHERE, J.; MBACHAM, W. Práticas de gestão de resíduos farmacêuticos em farmácias e drogarias: evidências do distrito sanitário de Bamenda, Camarões. European Journal of Health Sciences, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 14–32, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.24018/ejhs.2021.6.4.114. Acesso em: 1 maio 2026.

EICKHOFF, P.; HEINECK, I.; SEIXAS, L. J. Gerenciamento de resíduos de medicamentos: uma revisão. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, São Paulo, v. 45, n. 1, p. 1–12, 2009.

FIOSAÚDE. Instala posto de coleta de descarte de medicamentos vencidos. 2019. Disponível em: https://fiosaude.org.br. Acesso em: 1 maio 2026.

LEAL, A.; ARAÚJO, G.; MENDONÇA, M. A ansiedade associada às redes sociais e à cultura do imediatismo. Psicologia Revista, Curitiba, v. 34, n. 2, p. 442–463, 2026.

MESCHEDE, M. S. C. et al. Avaliação de metais em sedimentos e águas do Rio Tapajós. Química Nova, São Paulo, v. 44, n. 9, p. 1104–1112, 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Governo Federal regulamenta correto descarte de medicamentos. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/governo-federal-regulamenta-correto-descarte-de-medicamentos. Acesso em: 1 maio 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Doenças resistentes a medicamentos poderão causar 10 milhões de mortes por ano. 2019. Disponível em: https://www.un.org/en. Acesso em: 1 maio 2026.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Promoting the safe and sustainable management of healthcare waste. 2021. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789240027819. Acesso em: 1 maio 2026.

PERINI, J. A.; FIGUEIREDO, T. S.; DA SILVA, M. C.; MACHADO, D. E.; CARDOSO, J. V. The improper disposal of drugs and the lack of information about it among a highly educated population in Brazil: analysis of the factors influencing correct disposal. Pharmacy, Basel, v. 14, n. 2, 2026.

PINTO, G. M.; SILVA, K. R.; PEREIRA, R. F. A. B.; SAMPAIO, S. I. Estudo do descarte residencial de medicamentos vencidos na região de Paulínia (SP), Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 219–224, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1413-41520140003000003. Acesso em: 1 maio 2026.

PUCKOWSKI, A. et al. Bioaccumulation and analysis of pharmaceutical residues in the environment: a review. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, [S. l.], v. 127, p. 232–255, 2016.

REIS FILHO, R. W.; LUVIZOTTO-SANTOS, R.; VIEIRA, E. M. Poluentes emergentes como desreguladores endócrinos. Ecotoxicologia e Contaminação Ambiental, Pelotas, v. 2, n. 3, p. 283–288, 2007.

RIO DE JANEIRO. Decreto nº 48.354, de 30 de outubro de 2023. Dispõe sobre o sistema de logística reversa de medicamentos de uso humano. Rio de Janeiro, RJ, 2023. Disponível em: https://www.legislativo.rj.gov.br. Acesso em: 1 maio 2026.

SANTOS, A.; BARROS, L. B.; SANTOS, P. L. M. C. Estratégias de educação em saúde no estímulo à logística reversa no descarte domiciliar de medicamentos. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2020.

SANTOS, R. C.; LOPES, M. L. S. A farmácia domiciliar e a utilização de medicamentos em residências da zona rural do município de Ubá (MG). Revista Científica da FAMINAS, Muriaé, v. 4, n. 1, p. 88–97, 2014. Disponível em: https://www.faminas.edu.br/site/revista_scientia. Acesso em: 1 maio 2026.

SILVA, V. W. P. da; SANTOS, R. C.; SANTOS, L. M. S.; VALADARES, A. Descarte de medicamentos e os impactos ambientais: uma revisão integrativa da literatura. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 28, n. 4, p. 1113–1123, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1413-81232023284.20542022. Acesso em: 1 maio 2026.

SINITOX. Descarte de medicamentos domiciliares. 2016. Disponível em: https://sinitox.icict.fiocruz.br/descarte-de-medicamentos-domiciliares. Acesso em: 1 maio 2026.

SORGE, C. A. Descarte de medicamentos domiciliares: práticas de cuidados e de riscos em uma comunidade de baixa renda. Physis, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 217–233, 2025.

TODESCHINI, V.; DA SILVA, Y. S. A.; DE ÁVILA, S. M.; FAN, D.; SILVA, R. R.; NEMITZ, M. C.; MARTINS, S. M. Campanhas REMELIXO" e seu papel na orientação e logística reversa de medicamentos vencidos e em desuso em Unidade de Saúde de Macaé-RJ. UFF & Sociedade, *[S. l.]*, v. 5, n. 6, p. 1–15, 2025. Disponível em: https://periodicos.uff.br/uffsociedade/article/view/67048. Acesso em: 1 maio. 2026.

INVESTIGAÇÃO DA RESERVA PATRIMONIAL DO PATRIMÔNIO NATURAL DA UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL (UNISC) POR MEIO DE TÉCNICAS GEOESPACIAIS E IMPRESSÃO 3D VISANDO A EDUCAÇÃO AMBIENTAL E A REPRESENTAÇÃO DAS ÁREAS DE RISCOS

1 Natã Samatiel Drescher, 2 Geison Müller, 3 Luana Calheiro Ferrão, 4 Cicero Pimentel Corrêa, 5 Luiz Carlos Schneider, 6 Carlos Antônio da Costa Tillmann, 7 Jorge André Ribas Moraes

1 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), e-mail: natadrescher2@hotmail.com; 2 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), e-mail: arq.geisonmuller@gmail.com; 3 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), e-mail: luanacalheiro01@gmail.com; 4 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), e-mail: cicero1@unisc.br; 5 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), e-mail: luizcs@unisc.br; 6 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), e-mail: tillmann@unisc.br; 7 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), e-mail: jorge@unisc.br;

Palavras-chave: Impressão 3D, Gestão de Riscos, RPPN UNISC.

Resumo

Com o aumento da severidade dos fenômenos climáticos extremos nos Vales do Rio Pardo e Taquari, localizados no Rio Grande do Sul, a capacidade de comunicar riscos de forma acessível torna-se essencial para fortalecer a resiliência socioambiental. Este estudo, vinculado ao projeto fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), apresenta uma estratégia original que supera as limitações da cartografia tradicional ao dar forma física à Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) da UNISC, reserva com 221,39 hectares de Mata Atlântica localizada no município de Sinimbu (RS), que foi representada em escala por meio da manufatura aditiva. O trabalho descreve o processo minucioso de conversão de dados geoespaciais obtidos pelo sensor orbital ALOS PALSAR e processados em ambiente SIG, em uma maquete física modular de alta precisão na escala 1:2500. Utilizando tecnologia de impressão 3D (FDM) e técnicas de acabamento artesanais, o modelo de 1,40 × 1,40m transforma informações complexas em uma interface tridimensional intuitiva e concreta. Indo além de um simples objeto de exibição, a maquete funciona como plataforma de alfabetização territorial ao evidenciar a geomorfologia local e o papel regulador da Mata Atlântica no ciclo hídrico, oferecendo a gestores e à comunidade uma nova forma de compreender os cursos d'água e qualificar os sistemas de alerta precoce, reforçando, inclusive na gestão sustentável dos resíduos gerados na produção, o compromisso com a preservação ambiental e a segurança coletiva.

Introdução

A intensidade dos eventos climáticos extremos vem impondo desafios à gestão territorial e à segurança das populações, principalmente em áreas hidrograficamente complexas como os Vales do Rio Pardo e do Taquari, localizados no Rio Grande do Sul. Nesse meio, a capacidade de monitorar, prever e comunicar riscos se torna fundamental para a resiliência urbana e ambiental. Alinhado a esta necessidade, o presente artigo vincula-se ao Projeto denominado “Identificação, avaliação e monitoramento dos riscos de eventos climáticos visando a qualificação dos sistemas públicos de alerta para as regiões dos Vales do Rio Pardo e Taquari”, fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), que busca aprimorar a resposta tecnológica e social perante desastres naturais, como enchentes e movimentações de massas.

No entanto, a efetividade da comunicação dos riscos inerentes de eventos climáticos esbarra em barreiras recorrentes, a dificuldade do entendimento e compreensão dos dados geográficos oriundos das representações cartográficas tradicionais (Zhu et al., 2025). Embora essas representações sejam tecnicamente precisas, a bidimensionalidade exige um rigor técnico de análise que nem sempre está disponível ao público ou até mesmo a gestores que necessitam de tomadas de decisões rápidas, perante situações de crise. Pesquisas indicam que mapas baseados em modelos complexos e linguagem técnica são frequentemente os recursos menos eficazes na comunicação, resultando em incompreensão sobre a magnitude dos riscos (Zhu et al., 2025), enquanto a dificuldade de construir uma compreensão espacial rápida a partir de dados 2D pode comprometer o suporte à decisão em emergência (Jurík et al., 2020; Zhu et al., 2025). E desta forma, atuando no espaço entre os dados científicos e a percepção humana, que entram as maquetes confeccionadas com impressão 3D, operando como ferramentas mediadoras, transformando informações geoespaciais complexas em uma representação física mais intuitiva e palpável.

Com a possibilidade de transição entre os modelos de elevação digitais para os meios físicos com alta precisão, a impressão 3D amplia não somente a técnica de representação, mas também potencializa a comunicação e o aprendizado, extrapolando as barreiras da função e tornando-se um dispositivo do processo educativo, principalmente do âmbito da Educação Ambiental. A materialização de relevos e paisagens estratégicas como a Reserva Particular do Patrimônio Natural da Universidade de Santa Cruz do Sul (RPPN UNISC), permite a visualização geomorfológica e avaliação crítica do uso e ocupação do solo, favorecendo o entendimento sobre os ecossistemas da região.

Dessa forma o presente artigo teve como objetivo detalhar o processo de confecção da maquete da RPPN UNISC, desde a modelagem tridimensional e execução em impressão 3D, até a finalização com técnicas de acabamentos tradicionais, ao mesmo

tempo que analisa a mesma como recurso didático e instrumento de conscientização, aprendizado e preservação desta área de interesse ambiental.

Fundamentação Teórica

O cenário climático contemporâneo do Rio Grande do Sul vem sendo marcado por eventos hidrometeorológicos severos e com baixos padrões de previsibilidade. Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2014), a região Sul do Brasil caracteriza-se como uma das áreas mais impactadas por fenômenos extremos e instabilidades atmosféricas, apresentando elevada vulnerabilidade socioambiental frente às projeções de maior frequência e intensidade de episódios de precipitação intensa e inundações. Essa vulnerabilidade não se restringe aos ciclos pluviométricos, ela é agravada pela configuração geomorfológica da região, que impõe uma resposta hidrológica rápida a esses eventos.

As características geomorfológicas dos Vales do Rio Pardo e do Taquari demonstram como a combinação de eventos de alta intensidade pluviométrica criam áreas de extrema vulnerabilidade. O relevo atua como um elemento condicionante do clima regional, onde a transição entre a Depressão Central e as escarpas do Planalto Meridional favorece a ascensão orográfica de fluxos de umidade, potencializando os totais pluviométricos (Forgiarini et al., 2014). Sendo assim, a topografia acidentada dos vales reduz drasticamente o tempo de concentração da resposta hidrológica, transformando cursos d'água em fluxos de alta energia capazes de transportar grandes volumes de detritos e sedimentos, o que amplifica o potencial destrutivo das inundações (Mamédio et al., 2018; Sugiyama & Gomes, 2023).

Os eventos de setembro de 2023 e maio de 2024 não foram meramente episódios isolados, mas marcos que redefiniram os parâmetros de resiliência das estruturas urbanas e ambientais, alterando a forma como tais fenômenos são pautados pela gestão de riscos. Diante desse panorama, a alfabetização territorial (Mendonça, 2007) emerge como um requisito fundamental, incidindo sobre a capacidade técnica da população e do setor público em decodificar e aplicar informações de base geográfica. A dependência de representações bidimensionais pode, em situações de crise, gerar análises equivocadas e falhar na transmissão da real magnitude dos eventos (Zhu et al., 2025). Nesse sentido, estudos recentes sobre visualização de suscetibilidade auxiliada por realidade virtual demonstram que a representação tridimensional é indispensável para a materialização e a compreensão do relevo (Razavi-Termeh et al., 2025).

A cartografia tradicional, embora tecnicamente sofisticada, impõe uma barreira significativa para o entendimento, tornando-se assim um obstáculo para a educação ambiental e a gestão de riscos. A cartografia estabelece uma linguagem própria por meio de símbolos, cuja eficácia na transmissão da mensagem depende diretamente da capacidade do usuário em decodificar os sinais apresentados (Silveira et al., 2021); portanto, a leitura e a interpretação de mapas não são atos imediatos, exigindo que se tenha um nível de conhecimento específico que permita a utilização desse tipo de representação. Em contraponto, a manufatura aditiva emerge como um dispositivo de visualização intuitivo, eliminando a necessidade dessa decodificação cognitiva, uma vez que permite a conversão direta de modelos digitais em réplicas físicas de elevada fidelidade, independentemente da complexidade geométrica (Graça et al., 2021). No modelo tridimensional, o relevo é visível e autoexplicativo, aumentando assim o entendimento e permitindo que a gravidade de situações de eventos climáticos extremos seja compreendida sem a dependência de legendas ou convenções técnicas.

A maquete física contemplativa quebra a 'invisibilidade' do relevo cartográfico, tornando-se um dispositivo analógico e intuitivo que permite ao observador perceber, de forma direta, a profundidade dos vales, a declividade das encostas e a continuidade do escoamento superficial. De acordo com Fitz (2008), a cartografia tridimensional simplifica o reconhecimento de estruturas do relevo, pois alinha a representação gráfica a forma como o sistema visual humano processa o mundo real, tornando a leitura do terreno um processo natural e instintivo. Nesse sentido, a materialização de relevos em escala transforma dados geoespaciais abstratos em evidências morfológicas palpáveis, facilitando a compreensão dos riscos e a percepção das ações necessárias para a mitigação de desastres.

A RPPN UNISC enquadra-se precisamente no perfil das regiões abordadas anteriormente. Localizada em Sinimbu (RS), a área possui 221,39 hectares inseridos no bioma Mata Atlântica e, para além de uma reserva de proteção à biodiversidade, atua como um regulador hídrico e geomorfológico regional. As unidades de conservação, especialmente em áreas de encosta e preservação permanente, cumprem função de infraestrutura ecológica, atuando como reguladoras da dinâmica hídrica e da estabilidade geomorfológica essenciais à segurança dos assentamentos humanos a jusante (MEA, 2005; SNUC – Lei nº 9.985/2000). Com variações altimétricas que superam os 250 metros, a topografia da reserva condiciona o comportamento das águas pluviais que alimentam a bacia do Rio Pardo, enquanto sua densa cobertura florestal funciona como um escudo natural, minimizando processos de corridas de detritos e o consequente assoreamento dos cursos d'água.

Desta forma, a escolha da RPPN UNISC como objeto de pesquisa do projeto 'Identificação, avaliação e monitoramento dos riscos de eventos climáticos visando a qualificação dos sistemas públicos de alerta para as regiões do Vale do Rio Pardo e Vale do Taquari', fomentado pela FAPERGS, justifica-se pelo aporte à instrumentação técnica de monitoramento. A reserva passará a abrigar uma rede de estações pluviométricas destinadas à coleta de dados sobre a intensidade e o volume das precipitações. Nesse contexto, a maquete física da RPPN UNISC ultrapassa a função meramente educativa e atua como uma plataforma demonstrativa da espacialização de dados geográficos e hidrológicos, permitindo correlacionar o volume hídrico registrado com a geomorfologia do terreno e o comportamento dinâmico dos fluxos de drenagem.

Diferente dos métodos tradicionais de confecção de maquetes, baseados em processos artesanais de corte e colagem, que frequentemente sofrem com distorções de escala e simplificações subjetivas, a manufatura aditiva permite a transposição direta de dados espaciais digitais para o meio físico com elevada fidelidade geométrica. Esse processo de fabricação avançado

produz geometrias de formas complexas a partir de modelos gerados por computador ou técnicas de levantamento de dados geoespaciais, garantindo que o produto seja uma representação sólida e precisa da realidade mapeada (Graça et al., 2021). Por meio da deposição de material camada sobre camada, a impressão possibilita a representação de relevos complexos, como taludes e escarpas, garantindo que as proporções e escalas mantenham-se estritamente fiéis à realidade. Além da precisão técnica, a manufatura aditiva oferece como vantagem crucial para a gestão de riscos a intuição cognitiva que o modelo proporciona. Enquanto a tela do computador oferece uma simulação bidimensional da profundidade, a maquete física permite a percepção real em escala reduzida, o que facilita o entendimento da dinâmica dos eventos na área representada.

A visualização tridimensional atua como um facilitador da Educação Ambiental Crítica (Loureiro, 2004), permitindo que a população e gestores visualizem e analisem o uso e ocupação do solo, percebendo a fragilidade geomorfológica frente a eventos extremos. No âmbito do projeto fomentado pela FAPERGS, a maquete qualifica o sistema de alerta ao transformar dados brutos em volumes físicos, democratizando, por meio da impressão 3D, o acesso a informações geoespaciais. Assim, preparando a comunidade e gestores a compreender riscos não como conceitos, mas sim como realidades palpáveis.

Materiais e Métodos

Como procedimentos metodológicos preliminares para confecção da maquete foram definidas as dimensões e escalas de representação da maquete da RPPN de maneira a propiciar a melhor visualização de todos os elementos geomorfológicos e da paisagem natural. A partir disso, ficou definido que a escala seria a 1:2500, resultando em uma maquete final de 1,40 x 1,40 metros.

O trabalho foi realizado em três etapas sucessivas resumidamente descritas como: a coleta e processamento de dados geoespaciais; parametrização e impressão 3D e montagem e acabamento estético.

A primeira etapa, relacionada à coleta e processamento de dados geoespaciais consistiu na busca por dados sobre a RPPN UNISC, documentos e informações que confirmavam os limites da área e levantamentos altimétricos que poderiam auxiliar na modelagem correta do relevo. Contudo, a etapa de coleta de dados esbarrou em dificuldades devido à complexidade topográfica da área, além da grande extensão territorial. Tais características ofereciam riscos operacionais ao uso de Veículos Aéreos não Tripulados (VANT) para levantamentos aerofotogramétricos. Diante desta complexidade, optou-se pela utilização de modelos digitais de elevação (MDE) provenientes de sensoriamento remoto orbital, especificamente da base de dados ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite).

Com os dados dos modelos de elevação coletados, utilizou-se o software de código aberto QGIS para o processamento de dados e a vetorização das curvas de nível. Por meio de ferramentas de análise de terreno, foram geradas curvas com equidistância de dois metros. Após o processamento e a geração das curvas, realizou-se a sobreposição das informações altimétricas aos limites da gleba da RPPN, garantindo o correto georreferenciamento e evitando erros de posicionamento do perímetro em relação ao relevo.

Após a coleta e a compatibilização dos dados, procedeu-se à coleta de dados e processamento relacionada à modelagem tridimensional e fragmentação modular. As informações foram exportadas para o software AutoCAD, onde efetuou-se a delimitação precisa do recorte de estudo. Nesta fase, realizou-se a fragmentação do modelo em módulos, estratégia necessária para adequar as dimensões do projeto ao volume útil de impressão das máquinas Bambu Lab modelo A1, respeitando o volume de 256 x 256 x 256 mm^3. Essa divisão modular foi planejada para garantir o encaixe perfeito das peças e a integridade geométrica do conjunto após a montagem final.

A segunda etapa consistiu na modelagem tridimensional e prototipagem dos módulos previamente fragmentados. Cada segmento foi exportado do AutoCAD para o software SketchUp, escolhido pela agilidade na manipulação. Para a organização sistemática da área, os módulos foram nomeados através de um sistema de coordenadas alfanuméricas (colunas e linhas), semelhante a um tabuleiro de xadrez, totalizando 35 unidades. Nesta fase, o relevo de cada módulo foi detalhado com a inserção de elementos hidrográficos (rios e afluentes) e infraestruturais (estradas), consolidando as informações que seriam impressas.

A etapa de parametrização e impressão 3D iniciou-se com a fase de testes para otimizar o tempo e a qualidade, minimizando o desperdício de insumos, por meio de ensaios de impressão. Tais ensaios foram fundamentais para definir a orientação espacial das peças na mesa e o método de fixação entre os módulos e a base final. O fatiamento foi realizado no Bambu Studio, software nativo do ecossistema utilizado, onde os modelos 3D passaram por uma parametrização técnica. Dentre as variáveis configuradas, destacam-se a altura das camadas — que altera a fidelidade visual e o consumo de material (Hevko et al., 2022) – e o tipo e densidade do preenchimento interno (infill) que, somados à quantidade de paredes (perímetros verticais), determinam a resistência mecânica da peça (Alsoufi & Elsayed, 2018). A simulação prévia do código permitiu antecipar eventuais distorções geométricas antes da execução física. Após sucessivos testes de fatiamento e prototipagem, estabeleceu-se a configuração ideal, equilibrando o desempenho estrutural e estético com a otimização do uso de material.

O material base escolhido para a confecção da maquete foi o PLA (Ácido Polilático), um polímero termoplástico de origem renovável, produzido a partir de amido de milho e cana-de-açúcar, tornando-o uma alternativa sustentável para o uso na manufatura aditiva.

No processo de impressão por deposição de material fundido (FDM), a geometria dos modelos exige, frequentemente, a criação de estruturas de suporte, como ilustrado na Figura 01. Estes elementos temporários são impressos para sustentar superfícies paralelas à base de impressão ou com inclinações superiores a 45°, que não possuiriam sustentação própria no momento da extrusão do filamento.

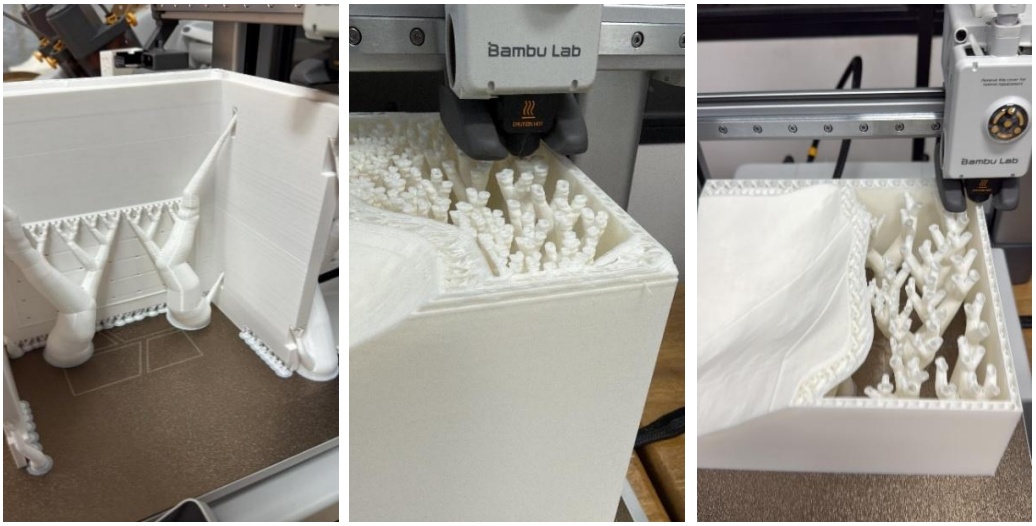


Figura 01: Detalhe dos suportes estruturais no momento de impressão.
Fonte: Autores (2026)

No decorrer do processo de fabricação, o consumo total de material para a impressão dos 35 módulos totalizou 15,8 kg. Deste montante, 11,1 kg foram destinados à estrutura definitiva dos módulos, enquanto 4,7 kg corresponderam aos suportes necessários para a sustentação das geometrias, representando 29,7% do peso total da produção. Por se tratar de uma quantidade considerável de resíduo técnico, os mesmos não foram descartados em lixo comum. Seguindo o fluxo de gestão de resíduos da universidade, todos os polímeros resultantes dos suportes foram destinados à Associação de Catadores de Santa Cruz do Sul, fomentando a responsabilidade socioambiental do projeto.

Com o objetivo de otimizar a organização e controle do sistema de fabricação, cada módulo recebeu ainda na fase de modelagem, a inserção de sua respectiva nomenclatura na face interna. Em contraponto, foi elaborada uma planilha de controle de impressão, contendo dados quantitativos de cada peça, como nome, peso estimado e tempo de impressão. Esta ferramenta foi crucial para o planejamento do cronograma de impressão, além da otimização dos materiais, visando o aproveitamento máximo dos carretéis de filamento, que é comercializado em unidades de 1Kg.

Dada a fragmentação do modelo em 35 módulos independentes, foi necessária a concepção de um sistema de travamento para garantir a integridade estrutural do conjunto. Para tal situação, foram desenvolvidas peças de conexão e encaixes posicionados na face inferior que, somados à colagem direta entre as faces laterais dos módulos, proporcionaram uma estruturação robusta e estável ao modelo final, como ilustrado na Figura 02. Adicionalmente, utilizou-se uma base em MDF para conferir rigidez e suporte a toda a estrutura.

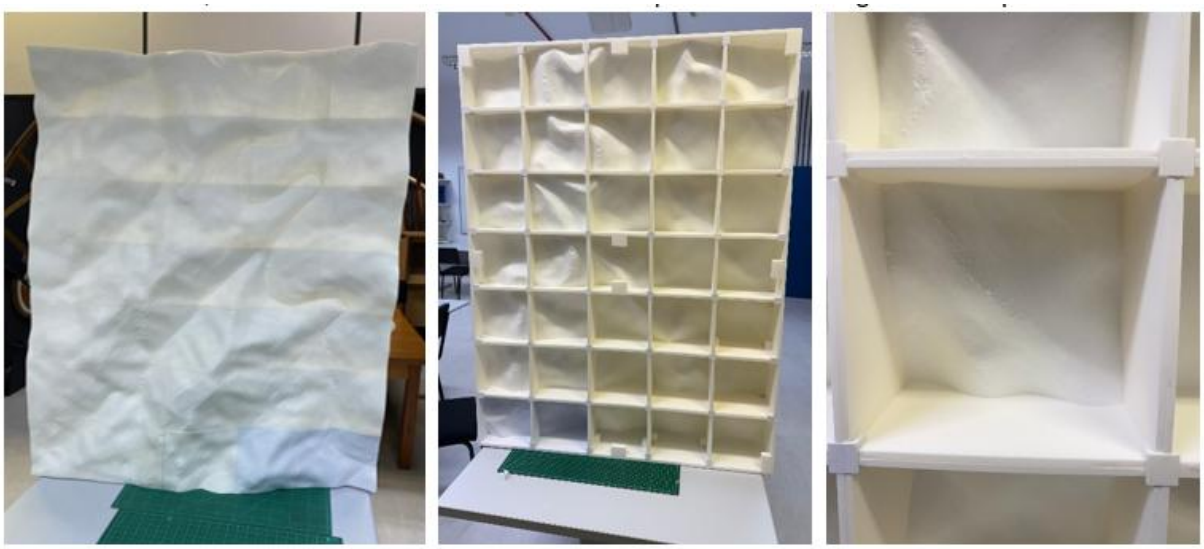


Figura 02: Módulos já montados e colados, com destaque a direita para o sistema de travamento.
Fonte: Autores (2026)

A montagem e acabamento estético iniciaram após a impressão de todas as partes necessárias para montagem. Iniciou-se a terceira etapa de confecção, a fase de acabamentos finais.

Devido à modularidade da maquete, as linhas de união entre as peças permaneceram visíveis nas faces laterais do conjunto. Visando a correção dessas descontinuidades e a obtenção de um acabamento estético homogêneo, aplicou-se massa plástica para o preenchimento de imperfeições e nivelamento das superfícies. A escolha desse material justifica-se por sua alta resistência em diferentes condições e por sua secagem rápida, fator que proporcionou maior agilidade ao cronograma de fabricação. Após o período de cura, procedeu-se ao lixamento, resultando em laterais lisas e uniformes, o que conferiu à maquete o aspecto de um bloco monolítico.

Após o lixamento, a superfície recebeu a aplicação de duas demãos de fundo preparador (primer). Esta etapa teve como finalidade selar as porosidades características do material impresso e da massa plástica, uniformizando a textura e evitando a absorção desigual das camadas subsequentes. Esse tratamento de base foi essencial para garantir a aderência e a homogeneidade cromática da pintura final. Para a caracterização do modelo, adotou-se um padrão de cores que auxilia na distinção das feições topográficas: foram aplicadas duas demãos de tinta na cor Verde Toscana na face superior, como ilustrado na Figura 03, representando a cobertura vegetal e a área de estudo, em contraste com a cor Marrom Tabaco nas faces laterais.



Figura 03: Aplicação de Fundo preparador e pintura da maquete.
Fonte: Autores (2026)

Após a conclusão da montagem dos módulos impressos e a pintura, iniciou-se a etapa de mapeamento e delimitação da vegetação. Para garantir a precisão espacial da representação da vegetação, elaborou-se um modelo digital de referência que delimitou as variações de altura da vegetação e a ocupação do solo, como ilustrado na Figura 04. A transferência desses dados para a maquete física ocorreu por meio da projeção digital direta, onde o mapa temático foi projetado sobre o relevo 3D, permitindo a marcação manual rigorosa das manchas de vegetação e evitando distorções de escala.

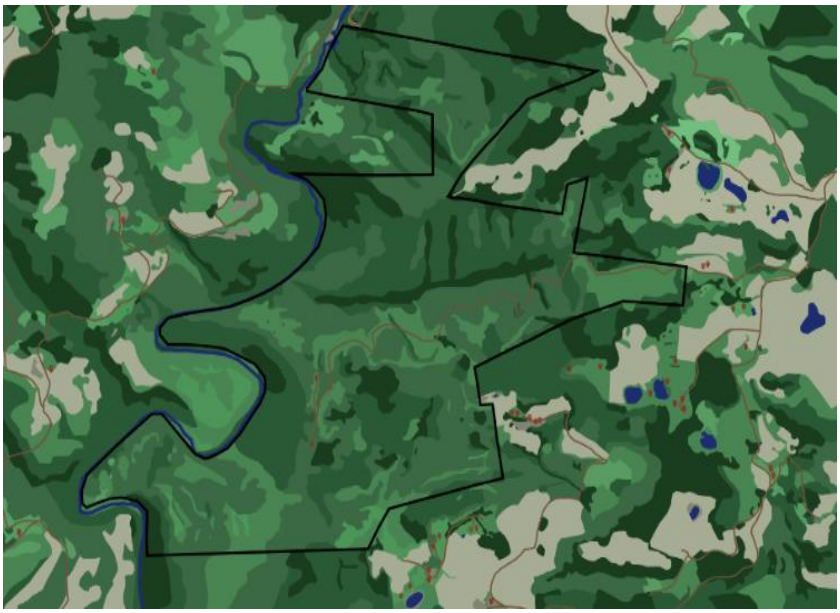


Figura 04: Modelo digital de referência de variações de altura de vegetação.
Fonte: Autores (2026)

A representação das diferentes vegetações foi realizada através da sobreposição de camadas. As áreas de lavouras e vegetações rasteiras foram representadas com serragem pigmentada, aplicadas em camadas de cola branca e peneiramento do material, até que se atingisse a densidade e o resultado visual desejados, como ilustrado na figura 05. Simultaneamente, realizou-se o detalhamento da malha viária e dos corpos hídricos.

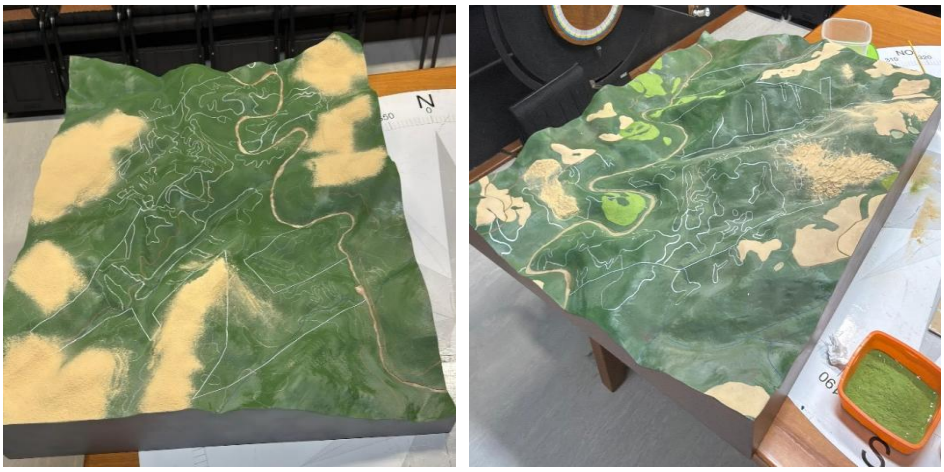


Figura 05: Maquete com aplicação de serragem pigmentada.
Fonte: Autores (2026)

Para a vegetação arbórea, utilizou-se espuma triturada e tingida. Devido à heterogeneidade das dimensões obtidas no processamento da espuma, realizou-se um método de classificação por peneiramento. Essa triagem permitiu segregar os fragmentos em diferentes tamanhos, adequando-os proporcionalmente às diferentes escalas de vegetação observadas na RPPN UNISC.

A aplicação da vegetação, previamente classificada, foi realizada com a utilização de cola branca, seguindo rigorosamente as delimitações do mapa de vegetação elaborado. Após a fixação da espuma em toda a superfície correspondente, aplicou-se tinta em diferentes tonalidades de verde, conferindo um aspecto mais realista à representação. Para a finalização, utilizou-se verniz fosco incolor, visando à proteção dos materiais e à maior durabilidade do modelo, como ilustrado na Figura 06.

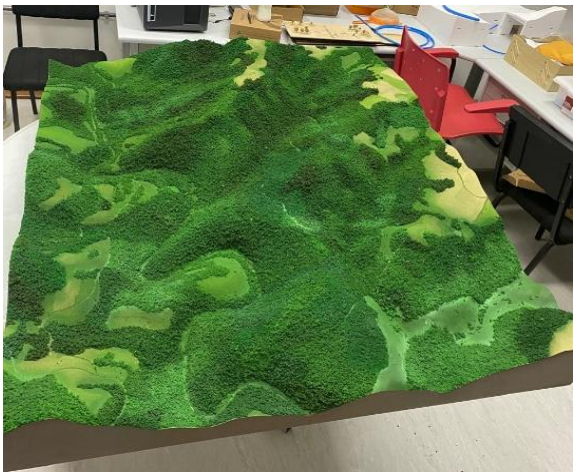


Figura 06: Vegetação totalmente aplicada e já pintada.
Fonte: Autores (2026)

Com a tarefa da vegetação concluída, iniciou-se o acabamento final do rio, que já se encontrava texturizado e pintado. Para a representação das águas, optou-se pela aplicação de resina bicomponente, proporcionando um acabamento refinado e de elevado realismo.

Após a cura completa da resina e a estabilização do verniz, os trabalhos de confecção da maquete foram finalizados. Os parâmetros técnicos empregados em cada etapa permitiram que o modelo final fosse concluído garantindo a precisão rigorosa em relação à escala, bem como a durabilidade necessária para a exposição prolongada. Com isso a maquete foi concluída, representando assim o estágio final da fabricação, utilizando a impressão 3D e técnicas artesanais para obtenção de alta qualidade quanto a representação fidedigna da área de estudos.

Resultados e Discussão

A execução da maquete da RPPN UNISC por meio da impressão 3D, resultou em um modelo físico que amplia a qualidade da representação gráfica técnica (2D e 3D), atuando também como uma interface entre os dados científicos e a percepção visual de diferentes públicos como estudantes, gestores e visitantes.

Um dos principais resultados observados diz respeito à precisão alcançada na escala do relevo. Diferentemente dos métodos tradicionais de confecção de maquetes, nos quais as dimensões dos materiais definem apenas uma estimativa da representação topográfica, o uso de dados ALOS PALSAR, processados no QGIS e impressos em 35 módulos, permitiu a reprodução exata das escarpas, taludes e demais elementos do relevo da reserva.

Do ponto de vista técnico mostrou-se que a fragmentação modular, embora necessite de um acabamento posterior com massa plástica e pintura, permitiu superar os limites de impressão das impressoras Bambu Lab modelo A1. O resultado final foi a produção de um bloco único de extrema precisão em relação à geolocalização e geomorfologia. Esta constatação válida a hipótese de que a impressão 3D elimina a subjetividade dos processos artesanais e entrega produtos com rigor científico necessário capaz de representar fidedignamente áreas com possíveis riscos ambientais.

O modelo também permite que o observador compreenda fisicamente o papel da Mata Atlântica como escudo contra o processo de assoreamento dos rios, ao visualizar a densa cobertura vegetal presente na reserva e representada na maquete. Este ponto corrobora o conceito de Fitz (2008) sobre aproximar a representação da realidade, visando quebrar a invisibilidade do relevo e facilitar a identificação das fragilidades ambientais da região.

No decorrer do processo de montagem e acabamento, observou-se que a representação dos corpos hídricos, associada ao relevo tridimensional e ao uso de texturas distintas, ampliou significativamente a capacidade de leitura espacial do modelo. Essa configuração cria um contraste visual que permite ao observador compreender, de forma imediata, os trajetos preferenciais de escoamento superficial e a rapidez da resposta hidrológica da região. Tal percepção das relações entre declividade e drenagem não ocorre com a mesma facilidade em mapas bidimensionais, que exigem por sua natureza um maior domínio técnico do usuário.

Além da dinâmica hídrica, o modelo favorece a percepção visual do papel ecológico da Mata Atlântica presente na reserva e representada na maquete. Neste contexto e conforme Fitz (2008) é fundamental aproximar a representação da realidade visando "quebrar a invisibilidade" do relevo, facilitando a identificação das fragilidades ambientais e tornando o modelo uma ferramenta eficaz de comunicação científica e pedagógica.

Entre os resultados complementares e alinhado diretamente à Educação Ambiental, destaca-se a destinação ambiental orientada dos resíduos gerados durante o processo de fabricação da maquete. O balanço de materiais revelou que 29,7% do filamento total utilizado, equivalente a 4,7 kg, compôs as estruturas de suporte técnico. Em conformidade com as diretrizes de sustentabilidade da Universidade, esse montante foi segregado e destinado à Associação de Catadores de Santa Cruz do Sul. Essas iniciativas contribuem para reduzir o impacto ambiental da fabricação digital e demonstram coerência com os princípios de sustentabilidade e responsabilidade socioambiental preconizados pelo projeto.

No contexto das ações de monitoramento climático e qualificação dos sistemas de alerta desenvolvidos pelo projeto da FAPERGS, as estações pluviométricas serão instaladas na RPPN UNISC. Neste sentido, a maquete apresenta potencial como dispositivo pedagógico pois transforma a abstração dos dados de sensoriamento remoto em uma realidade visível e palpável, permitindo que gestores e a comunidade da região consigam visualizar a fragilidade geomorfológica local e que possam compreender a urgência dos sistemas de alerta e prevenção.

Considerações Finais

O presente artigo demonstrou que o processo de concepção e fabricação de maquetes físicas da RPPN UNISC, realizado por meio do alinhamento entre sensoriamento remoto, processamento de dados e a impressão 3D representa um salto qualitativo na representação do território. A transição da bidimensionalidade cartográfica para os modelos físicos tridimensionais, exigiu precisão técnica combinada também com recursos manuais de acabamento para produzir uma representação de qualidade superior aos métodos mais tradicionais de maquetaria.

Como resultado, para além de um objeto contemplativo e de valor estético, a maquete assume seu papel de dispositivo de alfabetização territorial, permitindo que as potencialidades e fragilidades morfológicas dos Vales do Rio Pardo e Taquari sejam percebidas de uma forma muito mais simples e rápida.

Destacou-se também, além da precisão técnica, a preocupação com as práticas sustentáveis durante o processo produtivo, demonstrando-se coerência com o compromisso institucional pela educação ambiental em todas as etapas do projeto. Como consequência prática no âmbito do projeto fomentado pela FAPERGS, o modelo servirá como estrutura para organização espacial de informações pluviométricas, auxiliando gestores e a comunidade na dinâmica hídrica e na importância dos sistemas de alerta precoce. De forma geral, a materialização da RPPN UNISC em escala 1:2500 desempenha um papel de utilidade científica, educativa e comunicacional, oportunizando o acesso ao conhecimento geográfico, promovendo a valorização ambiental e apoiando políticas voltadas à resiliência e prevenção de desastres.

Declaração de Uso de IA

Os autores declaram que utilizaram ferramentas de Inteligência Artificial como auxílio na elaboração deste artigo. A tecnologia foi empregada especificamente para a revisão gramatical, refinamento da coesão textual e auxílio na estruturação lógica das seções. O uso da ferramenta visou exclusivamente o aumento da produtividade e clareza da redação, sem interferência na coleta e interpretação dos dados apresentados.

Agradecimentos

O presente trabalho foi fomentado pela FAPERGS, vinculando-se ao Projeto denominado - "Identificação, avaliação e monitoramento dos riscos de eventos climáticos visando a qualificação dos sistemas públicos de alerta para as regiões do Vale do Rio Pardo e Vale do Taquari", o qual agradecemos pelo apoio financeiro e à Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC) e à coordenação do curso de Arquitetura e Urbanismo, pelo incentivo à pesquisa científica e tecnológica.

Referências Bibliográficas

ALSOUFI, M. S.; ELSAYED, M. W. Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer. **Materials Sciences and Applications**, v. 9, p. 11-40, 2018.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). Brasília, DF: Presidência da República, 2000.

FITZ, P. R. Cartografia Básica. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FORGIARINI, F. R.; VENDRUSCULO, D. S.; RIZZI, E. S. Análise de chuvas orográficas no centro do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 308-318, maio/ago. 2014.

GRAÇA, A. J. S. et al. A Impressão 3D no Âmbito das Representações Cartográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 3, p. 809-826, 2021.

HEVKO, I. V. et al. The Method of Teaching Graphic 3D Reconstruction of Architectural Objects for Future IT Specialists. In: SYMPOSIUM ON ADVANCES IN EDUCATIONAL TECHNOLOGY (AET), 1., 2020, Ternopil. **Proceedings [...]**. Setúbal: Scitepress, 2022. p. 119-131.

JURÍK, V. et al. The 3D hype: Evaluating the potential of real 3D visualization in geo-related applications. **PLoS ONE**, v. 15, n. 5, 2020.

LOUREIRO, C. F. B. Trajetória e fundamentos da educação ambiental. São Paulo: Cortez, 2004.

MAMÉDIO, F. M. P.; CASTRO, N. M. R.; CORSEIUL, C. W. Tempo de concentração para Bacias Rurais Monitoradas na Região do Planalto Basáltico no Sul do Brasil. Porto Alegre: **REGA**, v. 15, e1, 2018.

MENDONÇA, F. Geografia e Meio Ambiente. São Paulo: Contexto, 2007.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação às Mudanças Climáticas: Contribuição do Grupo de Trabalho 2. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2014.

RAZAVI-TERMEH, S. V. et al. Virtual reality-assisted visualization of flood susceptibility using optimized machine learning models. **Applied Water Science**, v. 15, n. 257, 2025.

SILVEIRA, F. et al. Símbolos Pontuais para o Mapeamento Topográfico em Escala Grande. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 359-374, 2021.

SUGIYAMA, M. T. O.; GOMES, M. C. V. Bacias hidrográficas em relevos escarpados: implicações para a análise da suscetibilidade a corridas de detritos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 24, n. 3, e2269, 2023.

ZHU, J. et al. From 2D to 3D: Flood risk communication in a flood-prone neighborhood via dynamic, isometric street views. **Progress in Disaster Science**, v. 26, 100419, 2025.

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA G5 AMBIENTAL PARA A PRESERVAÇÃO DO BIOMA CAATINGA: UM RELATO DE EXTENSÃO EM ESCOLAS MUNICIPAIS DE CARUARU - PE

1 José Vitor Silva Aragão, 2 Cassia Gisele Dias Porto, 3 José Floro de Arruda Neto, 4 Weverton Samuel Onofre de Farias, 5 Gilson Lima da Silva.

1 UFPE, e-mail: josevitor.aragao@ufpe.br; 2 UFPE, e-mail: cassia.porto@ufpe.br; 3 UFPE, e-mail: floro.arruda@ufpe.br; 4 UFPE, e-mail: weverton.farias@ufpe.br, 5 UFPE, e-mail: gilson.lsilva@ufpe.br

Palavras-chave: Educação Ambiental; Bioma Caatinga; Metodologia G5.

Resumo

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, rico em biodiversidade, mas que enfrenta graves ameaças devido à degradação ambiental e às mudanças climáticas. Diante desse cenário, a Educação Ambiental surge como ferramenta essencial para formar cidadãos conscientes e engajados na preservação dos recursos naturais. Este artigo tem como objetivo descrever a aplicação de um projeto de Educação Ambiental voltado para a conscientização sobre a Caatinga e os Brejos de Altitude associados, desenvolvido junto a alunos do ensino fundamental da rede municipal de Caruaru, Pernambuco. A intervenção utilizou a Metodologia G5 Ambiental, que aborda a gestão de cinco recursos fundamentais: água, energia, resíduos sólidos, fauna e flora, e conhecimento, estando diretamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030. O estudo caracteriza-se como um relato de experiência de extensão universitária. Ao longo de quatro semestres, compreendidos entre o segundo semestre de 2024 e o primeiro semestre de 2026, as ações educativas foram expandidas de forma contínua, alcançando dezenas de escolas regulares e de tempo integral no município. Os resultados demonstram o amplo alcance demográfico do projeto, que capacitou centenas de alunos, promovendo a disseminação de saberes ecológicos e fomentando o pensamento crítico acerca da sustentabilidade local. Conclui-se que a adaptação de metodologias dinâmicas para o ensino fundamental é uma estratégia viável e necessária para a valorização e proteção do patrimônio natural regional.

Introdução

A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) desempenha um papel fundamental na interiorização do conhecimento científico e na mitigação das desigualdades socioeconômicas, especialmente por meio do seu Centro Acadêmico do Agreste (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2023). Este campus atende à demanda de dinamizar as cadeias produtivas e sociais da região, promovendo a inovação tecnológica e a sustentabilidade (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2023). Nesse contexto, as Instituições de Ensino Superior (IES) são reconhecidas como atores essenciais para facilitar a transição da sociedade para um ambiente sustentável, educando os tomadores de decisão do futuro e promovendo valores éticos e ecológicos (SIPOS; BATTISTI; GRIMM, 2008). Tal premissa ganha ainda mais relevância quando alinhada à Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) e aos seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que demandam ações urgentes para a garantia do futuro do planeta (BREUER et al., 2019).

No centro das preocupações ambientais da região Nordeste está a Caatinga, o único bioma exclusivamente brasileiro, que abrange cerca de 10,1% do território nacional (MMA, 2022). Apesar de sua vasta biodiversidade, abrigando milhares de espécies de plantas, a Caatinga é um dos ecossistemas mais vulneráveis às mudanças climáticas (MMA, 2022). Atualmente, cerca de 27 milhões de pessoas vivem em sua área original, sendo a grande maioria dependente dos recursos diretos do bioma para sobreviver (MMA, 2022). Historicamente explorada desde o período colonial, estima-se que 80% de seus ecossistemas originais já foram alterados por desmatamentos e queimadas (MMA, 2022).

Dados de monitoramento espacial revelam um cenário alarmante, apontando um salto de 87% nos alertas de desmatamento no bioma entre os anos de 2020 e 2021 (RODRIGO, 2023). Apesar de sua importância ecológica e social, a Caatinga encontra-se criticamente sub-representada na rede brasileira de Unidades de Conservação, com pouco mais de 2% de seu território sob proteção integral (WCS, 2021). Uma das exceções indispensáveis para o equilíbrio climático nessa paisagem são os chamados Brejos de Altitude, formações vegetais disjuntas que ocorrem como "ilhas de umidade" no ambiente semiárido, reunindo características de floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica) e Savana Estépica (Caatinga) (EMBRAPA, 2017).

Na cidade de Caruaru, Pernambuco, destaca-se o Parque Natural Municipal Professor João Vasconcelos Sobrinho, popularmente conhecido como Serra dos Cavalos (MERIÉVERTON, 2017). Criada em 1983, esta reserva ecológica possui 359 hectares e guarda o maior trecho de floresta serrana da região, constituindo-se como um patrimônio natural vital para a manutenção hídrica, climática e da biodiversidade local (GOVERNO DE PERNAMBUCO, 2018). Diante da urgência de preservar remanescentes como a Serra dos Cavalos e frear o avanço da desertificação, a Educação Ambiental (EA) emerge como uma ferramenta prioritária.

A Política Nacional de Educação Ambiental (PNEA) estabelece que a EA deve ser um componente essencial e permanente, presente de forma articulada em todos os níveis do processo educativo (BRASIL, 1999). Entre seus objetivos fundamentais, a PNEA destaca a democratização das informações ambientais, o estímulo ao pensamento crítico e o incentivo à participação individual e coletiva na preservação do equilíbrio ecológico como um valor inseparável da cidadania (BRASIL,

1999). Contudo, para que esses propósitos sejam efetivamente alcançados, o ensino não pode ser meramente teórico; ele exige metodologias imersivas e conectadas à realidade local da comunidade escolar (SILVA et al., 2023).

A educação formal, desenvolvida nas instituições de ensino básico, quando aliada a ações de extensão universitária, possui um profundo potencial de transformação local (SILVA et al., 2023). Ao integrar metodologias dinâmicas ao ambiente escolar, é possível capacitar os estudantes ainda no ensino fundamental para a compreensão otimizada dos recursos naturais, reduzindo os impactos socioambientais em suas próprias realidades (SILVA et al., 2023). Dessa forma, as crianças deixam de ser espectadoras e assumem o protagonismo como agentes multiplicadores de boas práticas ambientais (SILVA et al., 2023).

Essa dinâmica extensionista atua ativamente para o cumprimento de eixos cruciais da Agenda 2030, em especial o ODS 4 (Educação de Qualidade), o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e o ODS 15 (Vida Terrestre) (ONU, 2015). Neste contexto, o presente artigo descreve a aplicação de um projeto de Educação Ambiental promovido pela pós-graduação da UFPE, focado primariamente na conscientização sobre o bioma da Caatinga e seus Brejos de Altitude. O objetivo principal do trabalho é relatar o processo de expansão e implementação da Metodologia G5 Ambiental nas escolas municipais de ensino fundamental de Caruaru-PE, demonstrando seu alcance e sua relevância como estratégia pedagógica na formação de cidadãos engajados na preservação ecológica.

Material e Métodos

O presente trabalho caracteriza-se como um relato de experiência e extensão universitária, de natureza qualitativa e descritiva, voltado para a aplicação de ferramentas de Educação Ambiental no ensino formal. As ações foram desenvolvidas em escolas pertencentes à rede municipal de ensino da cidade de Caruaru, localizada na mesorregião do Agreste de Pernambuco. O público-alvo principal foi composto por estudantes do ensino fundamental (regular e de tempo integral), fase considerada estratégica para a consolidação de valores ecológicos e para a mitigação de impactos socioambientais na comunidade (SILVA et al., 2023).

A condução do projeto de Educação Ambiental ficou sob a responsabilidade do grupo de extensão "Amigos do Meio Ambiente" (AMA), vinculado ao Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) (SILVA et al., 2023). Para garantir a pluralidade de pensamentos e uma abordagem holística dos problemas ambientais, a equipe executora foi estruturada de forma estritamente multidisciplinar. O grupo extensionista mobilizou dezenas de estudantes universitários provenientes de diversas áreas do conhecimento, incluindo Engenharia Civil, Engenharia de Produção, Pedagogia, Medicina, Comunicação Social, Administração, Economia e Licenciaturas (Matemática, Química e Física) (SILVA et al., 2023). Essa diversidade acadêmica permitiu que a linguagem das intervenções fosse adaptada às distintas realidades das comunidades escolares, variando desde escolas situadas em zonas urbanas centrais até unidades em áreas periféricas ou de transição rural (SILVA et al., 2023).

A ferramenta pedagógica central adotada para nortear todas as ações educacionais foi a Metodologia G5 Ambiental, desenvolvida e patenteada no âmbito da própria universidade (BORBA; SILVA, 2017 apud SILVA et al., 2023). Esta metodologia foi concebida para auxiliar no gerenciamento contínuo do conhecimento durante a formação de jovens agentes ambientais. Seu alicerce teórico é inspirado em ferramentas consagradas da gestão da qualidade corporativa, adaptadas para a didática infantil: o Programa 5S e o Ciclo PDCA (SILVA et al., 2023). O 5S fornece a base comportamental por meio dos sensos de utilização, organização, limpeza, higiene e disciplina, fundamentais para a vivência escolar sustentável (SILVA et al., 2023). Simultaneamente, o Ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act - Planejar, Fazer, Checar e Agir) garante um processo de melhoria contínua nas atitudes dos alunos em relação ao meio ambiente (SILVA et al., 2023). O ciclo de implementação da Metodologia G5 Ambiental estrutura-se em cinco eixos temáticos cíclicos e inter-relacionados (os "Gs"), que foram diretamente integrados aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (ONU, 2015).

A aplicação nas escolas obedeceu à seguinte progressão didática: O primeiro eixo explorado foi o G1 (Gestão da Água), que aborda a relação vital dos seres humanos com os recursos hídricos. Os alunos foram instruídos sobre a distribuição da água no planeta, sua presença no corpo humano e o ciclo de tratamento hídrico, englobando o funcionamento das Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) (SILVA et al., 2023). Este módulo foi diretamente atrelado ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e ao ODS 14 (Vida na Água) (SILVA et al., 2023).

Em seguida, aplicou-se o G2 (Gestão de Energia). Neste módulo, a equipe extensionista apresentou a diferença entre fontes de energia renováveis e não renováveis. O foco didático recaiu sobre o consumo consciente e as consequências da matriz de combustíveis fósseis na emissão de gases de efeito estufa e no aquecimento global (SILVA et al., 2023). O G2 operou em consonância com o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) (SILVA et al., 2023).

O terceiro passo metodológico foi o G3 (Gestão de Resíduos Sólidos). Diferindo da mera separação de lixo, a abordagem instruiu os alunos fundamentada na teoria dos 5Rs: Repensar, Recusar, Reduzir, Reutilizar e Reciclar (SILVA et al., 2023). Foram discutidas as implicações do descarte inadequado, apoiando-se nos ideais de não geração de resíduos. As premissas alinharam-se ao ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis), além dos ODS 9 e 14 (SILVA et al., 2023).

O quarto eixo, G4 (Gestão da Fauna e Flora), figurou como a temática central deste artigo, sendo integralmente adaptado para a realidade regional. A abordagem buscou disseminar a importância da preservação das espécies endêmicas do bioma Caatinga e destacar o papel microclimático das áreas de Brejo de Altitude, como a reserva ecológica da Serra dos Cavalos (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2023). As aulas encorajaram a conservação local contra o desmatamento, demonstrando a colaboração da flora na absorção de dióxido de carbono e na regulação térmica (SILVA et al., 2023). O G4

consolidou as premissas do ODS 2 (Agricultura Sustentável), ODS 13 (Ação Climática), ODS 14 e, especialmente, do ODS 15 (Vida Terrestre) (SILVA et al., 2023).

Finalmente, ocorreu no G5 (Gestão do Conhecimento). Este último eixo foi dedicado à revisão integrativa de todos os 'Gs' anteriores, consolidando as intersecções entre água, energia, resíduos e biodiversidade. Baseado nas premissas da pedagogia crítica (FREIRE, 1974 apud SILVA et al., 2023), o G5 teve como meta fomentar o senso crítico dos discentes, tornando-os não apenas receptáculos de informação, mas agentes ativos de transformação. Este módulo corporificou o ODS 4 (Educação de Qualidade) (SILVA et al., 2023). A dinâmica de aplicação nas unidades educacionais envolveu aulas expositivas conduzidas in loco. A equipe de universitários deslocava-se até as escolas portando apresentações de slides, vídeos interativos e materiais multimídia (SILVA et al., 2023). Para garantir a atenção do público infantil e pré-adolescente, a linguagem utilizada evitou excessos técnicos, adotando um tom lúdico, prático e altamente interativo (SILVA et al., 2023). Ao término de cada etapa teórica, momentos específicos foram destinados a dinâmicas de grupo no ambiente escolar, cujo objetivo foi integrar as turmas e proporcionar a fixação do conteúdo abordado sem a rigidez de avaliações punitivas, fortalecendo a Educação Ambiental de forma contínua e imersiva (SILVA et al., 2023).

Resultados e Discussão

A implementação da Metodologia G5 Ambiental, com enfoque direcionado para a preservação do bioma Caatinga e dos Brejos de Altitude, obteve uma expansão progressiva e substancial na rede pública municipal de Caruaru. Historicamente, o projeto de extensão iniciou suas atividades no ano de 2010 com uma única escola-piloto e, após o período de suspensão obrigatória das aulas presenciais devido à pandemia de Covid-19 entre os anos de 2020 e 2021, necessitou de uma reestruturação logística e metodológica (SILVA et al., 2023). A retomada gradual das atividades de Educação Ambiental, agora alinhadas aos preceitos da Agenda 2030, revelou uma capilaridade notável ao longo dos quatro semestres letivos analisados neste estudo, consolidando a extensão universitária como um suporte didático fundamental para o ensino básico local.

Durante o segundo semestre letivo de 2024 (2024.2), o projeto estabeleceu a base de sua nova fase de expansão. A equipe multidisciplinar iniciou um ciclo de intervenções em instituições como a Escola Municipal Presidente Kennedy, onde trinta e três alunos foram diretamente instruídos, a Escola Municipal Belisio Córdula, com o alcance de vinte e um estudantes, e a Escola Municipal Professor Mº Bezerra Torres, que concentrou o maior público do período com quarenta discentes engajados. Adicionalmente, as abordagens também contemplaram a Escola Municipal Pedro de Andrade, a Escola Municipal Tomé Claudino e o CMEI Vereador José Ailton do Nascimento. Neste período inicial, o esforço da equipe concentrou-se na superação das barreiras de comunicação, adaptando a linguagem universitária para garantir a acessibilidade do conteúdo sobre os impactos do desmatamento e das mudanças climáticas.

O avanço continuou de forma expressiva no primeiro semestre de 2025 (2025.1), caracterizado pela forte ampliação da rede de escolas parceiras e pelo aumento do contingente estudantil. A Metodologia G5 Ambiental foi aplicada na Escola Municipal Padre Pedro Batista de Aguiar, alcançando quarenta estudantes, na Escola Municipal Mestre Vitalino, com vinte e cinco alunos, e na Escola Municipal Poeta Lídio Cavalcanti, com vinte e oito beneficiados. O projeto também se estendeu para a Escola Municipal Professor José Florêncio Neto Machadinho e para a Escola Municipal Professora Gianete Silva, ambas com trinta e três alunos atendidos. A soma parcial deste ciclo aproximou-se de duzentos discentes. Este volume demonstra a viabilidade de inserção da universidade no cotidiano das escolas municipais, promovendo o que a Política Nacional de Educação Ambiental (PNEA) define como democratização das informações ambientais (BRASIL, 1999).

Um marco significativo do semestre letivo de 2025.1 e que se consolidou nos semestres subsequentes foi a inclusão sistemática das Escolas de Tempo Integral (ETIs). A inserção do projeto na ETI Professor Altair Porto Nunes Filho, alcançando trinta e cinco alunos, representou um avanço estratégico. O tempo estendido de permanência dos alunos no ambiente escolar oferece uma janela de oportunidade única para uma imersão mais profunda nas temáticas abordadas. No modelo de tempo integral, a transição entre as etapas da metodologia, especialmente a passagem do G4 (Gestão de Fauna e Flora) para o G5 (Gestão do Conhecimento), ocorre de forma mais fluida, permitindo maiores espaços para debates e reflexões críticas sem o imediatismo imposto pelas grades curriculares tradicionais do ensino regular.

A consolidação quantitativa do programa evidenciou-se no segundo semestre de 2025 (2025.2), que registrou um dos maiores índices de adesão por turma. O projeto atuou na ETI Álvaro Lins com trinta e dois alunos, na ETI Dr. Amaro de Lyra e César com trinta e cinco estudantes, e na Escola Reunida Casa do Trabalhador, atendendo vinte e sete discentes. Destaca-se, neste período, o Grupo Escolar Professor Augusto Tabosa, que mobilizou uma turma massiva de quarenta e nove alunos, além do retorno à Escola Municipal Professora Gianete Silva com trinta e cinco estudantes e a atuação na Escola Municipal Duque de Caxias com trinta e dois. A capacidade de administrar turmas com quase cinquenta alunos utilizando abordagens lúdicas e interativas corrobora a eficácia do pilar 5S da metodologia, que exige organização e disciplina tanto dos extensionistas quanto da comunidade escolar (SILVA et al., 2023).

A manutenção da constância educativa foi assegurada no primeiro semestre de 2026 (2026.1). Neste ciclo, a fidelização das instituições parceiras tornou-se evidente. A Escola Reunida Casa do Trabalhador não apenas continuou no projeto, como expandiu seu contingente para cinquenta e cinco alunos atendidos simultaneamente. O projeto também retornou à ETI Álvaro Lins, com vinte e seis estudantes, e à Escola Municipal Professor José Florêncio Neto Machadinho. Além das instituições reincidentes, novas unidades foram incorporadas, como a Escola Municipal Professora Laura Florêncio, com vinte e oito alunos, e a Escola Municipal Professora Sinhazinha, com trinta e dois. O retorno do projeto às mesmas escolas em semestres distintos aponta para uma aceitação institucional orgânica e para o reconhecimento, por parte da gestão municipal, do valor agregado pela presença da universidade na educação básica.

Ao longo desses quatro semestres letivos, a intervenção alcançou cumulativamente mais de seiscentos estudantes do ensino fundamental. Este número reflete não apenas uma métrica de produtividade, mas um impacto social profundo. Tratando-se de regiões com índices de vulnerabilidade socioeconômica, capacitar esse volume de crianças e pré-adolescentes significa inserir o debate da sustentabilidade dentro de centenas de arranjos familiares. A Educação Ambiental escolar transcende os muros da instituição de ensino, pois os alunos atuam como vetores de informação, levando os conceitos de gestão de resíduos e preservação de ecossistemas para a rotina de suas casas.

Do ponto de vista qualitativo, as observações registradas pela equipe executora durante a aplicação da Metodologia G5 Ambiental confirmam uma mudança de postura por parte dos discentes. Em consonância com relatos anteriores do grupo de extensão, notou-se que as aulas despertaram intensa curiosidade e engajamento imediato (SILVA et al., 2023). Longe de assumirem uma postura passiva, comum em metodologias tradicionais de ensino, os alunos passaram a formular questionamentos críticos a respeito de suas próprias realidades. As dúvidas frequentemente gravitavam em torno da origem da água que consumiam, do destino final do lixo gerado no ambiente escolar e doméstico, e da origem da matriz energética que abastecia o município (SILVA et al., 2023).

Essa transição da escuta passiva para a investigação ativa é o cerne da formação do pensamento crítico almejado pela Gestão do Conhecimento (G5). Ao compreenderem o impacto humano sobre a fauna e a flora, especialmente ao serem expostos à realidade da degradação da Caatinga e à fragilidade dos Brejos de Altitude como a Serra dos Cavalos, os estudantes desenvolveram um senso de pertencimento e responsabilidade (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2023). A percepção de que recursos, antes considerados infinitos, estão diretamente ameaçados pela ação antrópica gerou um ambiente propício para a internalização de novos hábitos.

A opção institucional por realizar um trabalho focado puramente na conscientização, abdicando de avaliações de desempenho que gerassem notas ou conceitos punitivos, revelou-se um fator decisivo para esse engajamento. Sem a pressão inerente às avaliações tradicionais, o espaço da aula de Educação Ambiental configurou-se como um momento de descoberta colaborativa. Os discentes sentiram-se à vontade para compartilhar vivências, relatar experiências comunitárias e propor soluções simples para os problemas ambientais que observam em seu cotidiano. Esta dinâmica valida as diretrizes propostas na PNEA, que orientam que a educação ambiental não deve ser tratada apenas como uma disciplina escolar isolada, mas como uma prática educativa integrada (BRASIL, 1999).

Sob a ótica global, a consolidação desse alcance demográfico evidencia que as metas locais da Agenda 2030 estão sendo ativamente trabalhadas. O eixo G4 da metodologia, ancorado na preservação do único bioma 100% brasileiro, atendeu diretamente ao ODS 15 (Vida Terrestre), fomentando o entendimento de que a recuperação de ecossistemas terrestres começa com a valorização cultural da biodiversidade (ONU, 2015). Simultaneamente, as discussões sobre fontes de energia limpa (G2) e redução de resíduos (G3) fortaleceram a consciência necessária para o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima). Ao unir a expertise dos programas de pós-graduação com as demandas do ensino básico, a universidade reafirmou seu compromisso com a ciência aplicada e cidadã.

Por fim, os resultados atestam que a adaptação de ferramentas gerenciais, como o Ciclo PDCA e os 5S, para o contexto da pedagogia infantil e juvenil, não apenas é viável, como altamente recomendável. A estrutura cíclica do G5 Ambiental evitou a fragmentação do conhecimento, permitindo que as crianças compreendessem a interdependência entre a água, a energia, o lixo e a floresta. O saldo de centenas de estudantes capacitados em Caruaru representa uma força motriz essencial para a formação de uma nova geração de cidadãos ambientalmente letrados, prontos para atuar na defesa de seus territórios e na promoção da sustentabilidade regional.

Considerações Finais

O projeto evidenciou que a aplicação da Metodologia G5 Ambiental é um vetor eficiente de disseminação do conhecimento sobre a preservação de biomas ameaçados. Sem focar em avaliações punitivas ou de mensuração de notas, o foco esteve na construção do saber coletivo e na expansão demográfica da educação socioambiental, alcançando centenas de estudantes ao longo de quatro semestres A articulação entre a teoria do desenvolvimento sustentável, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e a prática educativa sobre o bioma local demonstrou que as escolas são fundamentais na transição para uma sociedade mais equilibrada. Recomenda-se a continuidade dessas ações integrativas entre universidade e ensino básico para a consolidação de referenciais educativos robustos.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), através da Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Extensão e à CAPES pelo apoio institucional e financeiro ao desenvolvimento deste projeto. Manifestamos reconhecimento à Prefeitura Municipal de Caruaru e às escolas parceiras pela colaboração. Por fim, agradecemos ao Grupo de Gestão Ambiental Avançada (GAMA) pela contribuição técnica e científica no processo de execução e aprimoramento das ações propostas.

Referências Bibliográficas

BORBA, B. F. C.; SILVA, G. L. Metodologia G5 Ambiental. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional, 2017.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei Nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 28 abr. 1999.

BREUER, A.; JANETSCHEK, H.; MALERBA, D. Translating Sustainable Development Goal (SDG) Interdependences into Policy Advice. Sustainability, v. 11, n. 7, p. 2092, 2019.

EMBRAPA. Webambiente. Caatinga fisionomias caatinga mata brejo de altitude. 2017. Disponível em: https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br. Acesso em: 28 nov. 2023.

FREIRE, P. Pedagogia do Oprimido. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1974.

GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Mapa Cultural de Pernambuco: Parque Natural Municipal Professor João Vasconcelos Sobrinho. 2018. Disponível em: https://www.mapacultural.pe.gov.br/espaco/260/. Acesso em: 29 nov. 2023.

MERIÉVERTON, Robson. Parque Natural Municipal Professor João Vasconcelos Sobrinho completa 34 anos. NE Interior Notícias, 2017. Disponível em: https://www.thiagolagos.com.br. Acesso em: 28 nov. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS (MMA). Ecossistemas, Biomas: Caatinga. Brasília: MMA, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/biomas/caatinga. Acesso em: 29 nov. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

RODRIGO, Rodolfo. Cresce desmatamento na Caatinga, bioma mais vulnerável às mudanças climáticas. Brasil de Fato, 9 maio 2023. Disponível em: https://www.brasildefato.com.br. Acesso em: 29 nov. 2023.

SILVA, Gilson Lima da; ARAGÃO, José Vitor Silva; SANTOS, Larissa Maria da Silva Vieira dos; AGUIAR, Amanda Maria Albuquerque de; AGUIAR, Gustavo José de Araújo; ARRUDA NETO, Jose Floro de; SILVA, Matheus Henrique Alves da. Aplicação de ferramentas de educação ambiental para formação de agentes ambientais em Caruaru (PE). Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), São Paulo, v. 18, n. 2, p. 75-86, 2023.

SIPOS, Y.; BATTISTI, B.; GRIMM, K. Achieving transformative sustainability learning: engaging head, hands and heart. International Journal of Sustainability in Higher Education, v. 9, n. 1, p. 68-86, 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE). O Programa: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 2023. Disponível em: https://www.ufpe.br/ppgecam/o-programa. Acesso em: 28 nov. 2023.

WCS BRASIL. Worldlife Conservation Society. Lugares Naturais: Projeto Caatinga. 2021. Disponível em: https://brasil.wcs.org/pt-br. Acesso em: 29 nov. 2023.

ENSINAR O CERRADO A QUEM PROJETA NO CERRADO: UMA EXPERIÊNCIA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL NO ENSINO DE ARQUITETURA E URBANISMO

1 Amanda Silva Negreiros, 2 João Cleps Junior, 3 Noam Marson
1 NEPSA-UFCAT, e-mail: amanda.negreiros@discente.ufcat.edu.br; 2 NEPSA-UFCAT, e-mail: jcleps@ufu.br; 3 PPGAU-UFU, email: noam.marson@ufu.edu.br

Palavras-chave: Educação ambiental; Cerrado; Ensino de Arquitetura e Urbanismo.

Resumo

Este artigo analisa uma experiência de educação ambiental desenvolvida no curso de Arquitetura e Urbanismo de uma instituição de ensino superior localizada no município de Caldas Novas (GO), no âmbito da disciplina Construções Plásticas I. A proposta foi realizada durante a Semana Nacional do Cerrado e parte do diagnóstico de que estudantes frequentemente projetam em territórios inseridos nesse domínio morfoclimático sem domínio adequado de suas características ecológicas, hidrológicas e socioambientais. Tal lacuna revela a insuficiência de estratégias pedagógicas que articulem, de modo sistemático, a leitura territorial às práticas projetuais na formação em Arquitetura e Urbanismo.

Como estratégia didática, propôs-se o desenvolvimento de objetos utilitários a partir de materiais moldáveis, como argila, biscuit e cerâmica fria, com o propósito de incorporar referências simbólicas do Cerrado ou expressar críticas a processos de degradação ambiental. Participaram da atividade quinze estudantes do segundo período, que também elaboraram pranchas conceituais nas quais explicitaram o conceito e o partido de suas propostas.

Para fins analíticos, quatro trabalhos foram selecionados por representarem distintas abordagens de leitura territorial mediada pela materialidade: duas voltadas à crítica socioambiental e duas à valorização da biodiversidade regional. Os resultados indicam que práticas projetuais experimentais, articuladas à materialidade construtiva, ampliam a percepção ambiental dos estudantes e contribuem para a formação de arquitetos e urbanistas mais atentos às dinâmicas territoriais e ecológicas do Cerrado, ao integrar projeto, leitura do território e reflexão socioambiental.

Introdução

O Cerrado constitui um dos principais domínios morfoclimáticos do território brasileiro, conforme a interpretação clássica proposta por Ab'Sáber (1977), e se caracteriza como um sistema socioambiental complexo estruturado pela interação entre clima, relevo, solos, hidrografia e cobertura vegetal. O domínio ocupa aproximadamente um quarto do território nacional, apresenta elevada diversidade biológica e desempenha papel estratégico na manutenção de sistemas hidrogeológicos em escala continental sendo frequentemente associado à recarga de importantes bacias hidrográficas sul-americanas. Ao mesmo tempo, configura-se como uma das regiões mais pressionadas por processos contemporâneos de uso e ocupação do território, especialmente aqueles vinculados à expansão agropecuária, à urbanização e à exploração intensiva de recursos naturais (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

Tais transformações não podem ser compreendidas exclusivamente a partir de variáveis ecológicas, uma vez que se articulam a dinâmicas econômicas, políticas e sociais que estruturam a produção do espaço. No âmbito da ecologia política, esses processos expressam disputas territoriais e diferentes formas de apropriação da natureza, o que exige abordagens capazes de integrar dimensões ecológicas e socioterritoriais (Souza, 2019; Leff, 2021). Nesse sentido, o Cerrado pode ser compreendido como um território em disputa, no qual sistemas ambientais e práticas sociais se entrelaçam de forma indissociável.

A noção de território, conforme desenvolvida pela geografia crítica, ultrapassa sua dimensão cartográfica ou administrativa e refere-se ao espaço produzido por relações de poder, sistemas técnicos e práticas sociais (Santos, 1996). Autores como Porto-Gonçalves (2006), Haesbaert (2007) e Moraes (2015) reforçam essa perspectiva ao evidenciar a dimensão multiescalar e histórica dos processos de territorialização, destacando que diferentes agentes sociais produzem e disputam o território ao longo do tempo. Assim, compreender o Cerrado implica reconhecer a articulação entre sistemas ambientais, dinâmicas territoriais e processos de produção do espaço.

No campo da Arquitetura e Urbanismo, essa discussão assume particular relevância, uma vez que intervenções projetuais incidem diretamente sobre os sistemas ambientais que sustentam os territórios. Entretanto, observa-se uma lacuna na formação desses profissionais no que se refere à incorporação de leituras ecológicas e territoriais nos processos de ensino e projeto, sobretudo em contextos inseridos em domínios ambientais específicos como o Cerrado. Tal lacuna evidencia uma dissociação recorrente entre o domínio técnico-projetual e a compreensão das dinâmicas socioambientais que condicionam e são condicionadas pelas intervenções no espaço construído.

Nesse contexto, a Educação Ambiental configura-se como um campo estratégico para a formação de profissionais capazes de compreender criticamente as interações entre sociedade e natureza. Para além de abordagens normativas ou prescritivas, uma perspectiva crítica de Educação Ambiental pressupõe a formação de sujeitos capazes de interpretar e intervir na realidade socioambiental de forma situada (Carvalho, 2016). Trata-se, portanto, de uma prática educativa que articula conhecimento, experiência e contexto, o que contribui para a construção de uma leitura integrada dos sistemas socioecológicos, articulando teoria, prática e contexto territorial.

A crítica ao ensino de Arquitetura e Urbanismo reforça essa necessidade ao apontar a persistência de modelos pedagógicos que operam de forma dissociada da complexidade do mundo contemporâneo (Zein, 2018). A formação de projetistas capazes de atuar em contextos ambientalmente complexos demanda, portanto, a incorporação de estratégias pedagógicas que articulem dimensão técnica, leitura territorial e compreensão dos sistemas ambientais.

Essa problemática torna-se particularmente evidente em cidades inseridas no domínio do Cerrado, como o município de Caldas Novas (GO), cuja dinâmica territorial está diretamente associada à exploração de recursos hidrotermais (ver Figura 1). Conhecida nacionalmente por suas águas termais, a cidade apresenta forte dependência econômica do turismo. A partir de meados da década de 1980, o município passou por intensa expansão imobiliária vinculada ao crescimento dessa atividade, o que consolidou a construção civil como um dos principais setores da economia local (Albuquerque, 1998). Estudos sobre a dinâmica urbana indicam que esse processo esteve diretamente relacionado à expansão do complexo hoteleiro e à reestruturação da organização intraurbana, ampliando a ocupação territorial associada ao turismo (Paulo, 2005).



Figura 1: Mapa do Brasil com a extensão do bioma Cerrado (segundo IBGE, 2005). O triângulo representa o Parque Estadual da Serra de Caldas Novas – PESCAN, inserido no município em estudo.
Fonte: Carvalho et al. (2008)

Nesse contexto, a expansão urbana intensificou pressões sobre sistemas hidrogeológicos responsáveis pela manutenção do lençol hidrotermal e evidencia, de forma direta, a necessidade de abordagens que integrem planejamento urbano, conservação ambiental e compreensão dos processos ecológicos que sustentam tais sistemas. Destaca-se, ainda, o papel do Parque Estadual da Serra de Caldas Novas (PESCAN) na preservação das áreas de recarga hídrica que sustentam o sistema hidrotermal local. Recentemente, debates sobre a concessão da unidade para ampliação de usos turísticos têm evidenciado tensões entre conservação ambiental e exploração econômica, reforçando a complexidade das dinâmicas territoriais que caracterizam o município.

Diante desse contexto, este artigo parte da seguinte questão: em que medida práticas pedagógicas experimentais podem contribuir para a formação de estudantes de Arquitetura e Urbanismo capazes de compreender, interpretar e intervir em sistemas socioambientais em contextos territoriais específicos?

Como contribuição, o estudo analisa uma experiência didática desenvolvida em disciplina inicial do curso de Arquitetura e Urbanismo, na qual a experimentação plástica foi utilizada como estratégia de mediação para a leitura simbólica e crítica do Cerrado. O estudo busca evidenciar o potencial da integração entre produção material, reflexão conceitual e leitura territorial como instrumento pedagógico capaz de articular dimensões ecológicas, culturais e projetuais na formação profissional.

Ao situar a prática pedagógica no cruzamento entre Educação Ambiental, Arquitetura e Urbanismo e leitura de sistemas socioambientais, o artigo contribui para o debate sobre metodologias de ensino capazes de ampliar a compreensão das relações entre ambiente construído e natureza, especialmente em contextos marcados por alta complexidade ambiental e processos de intervenção humana no território.

Materiais e Métodos

Este estudo caracteriza-se como pesquisa qualitativa de natureza interpretativa, baseada na análise simbólica de produções de estudantes e de suas pranchas conceituais. A opção por essa abordagem decorre do objeto investigado, que envolve a interpretação de sentidos, representações e construções simbólicas relacionadas à leitura do território e aos processos de aprendizagem (Flick, 2009). Nessa perspectiva, entende-se que o conhecimento é produzido pela atribuição de sentidos pelos sujeitos, o que a torna adequada à análise de práticas educativas e processos formativos.

A abordagem metodológica articula procedimentos de observação participante e análise documental de forma complementar. A observação participante insere a pesquisadora no contexto da prática pedagógica, permitindo compreender as interações, mediações e dinâmicas que estruturam o processo de ensino-aprendizagem (Angrosino, 2009). Já a análise documental, aplicada às pranchas conceituais e às produções materiais dos estudantes, permite acessar registros formais e simbólicos das proposições desenvolvidas, conforme orientações de Cellard (2008).

A experiência analisada ocorreu no âmbito de uma disciplina introdutória do curso de Arquitetura e Urbanismo, voltada à experimentação formal e material por meio da produção de objetos tridimensionais. Participaram da atividade quinze estudantes regularmente matriculados no segundo período do curso.

A proposta didática foi estruturada a partir de uma abordagem problematizadora, iniciada com a discussão sobre o Cerrado enquanto sistema socioambiental e sobre o repertório prévio dos estudantes acerca de suas características ecológicas, hidrológicas e territoriais. Em seguida, realizou-se uma aula expositiva com foco na compreensão dos processos ecológicos do domínio, nas dinâmicas de uso e ocupação do território e em suas implicações para o planejamento e a intervenção no ambiente construído.

Na etapa subsequente, os estudantes foram orientados a desenvolver um artefato utilitário com materiais moldáveis, como argila, biscuit ou cerâmica fria. As produções deveriam estabelecer relação com o Cerrado a partir de duas diretrizes conceituais: (i) valorização de elementos da biodiversidade e (ii) crítica aos processos de degradação ambiental. Cada estudante elaborou, ainda, uma prancha conceitual contendo a descrição do conceito, do partido adotado e da relação entre a proposta e a temática ambiental.

Para fins analíticos, foram selecionados quatro trabalhos representativos das abordagens propostas. A seleção seguiu critérios de diversidade conceitual e clareza na explicitação dos significados atribuídos pelos estudantes. Dois trabalhos apresentam caráter crítico, voltado à problematização de impactos ambientais, enquanto os demais enfatizam a valorização simbólica da biodiversidade.

A análise consistiu na leitura interpretativa das pranchas conceituais e na observação das soluções formais adotadas nos artefatos, com o objetivo de identificar como os estudantes incorporaram elementos relacionados a processos ecológicos, dinâmicas territoriais e impactos ambientais em suas proposições. O procedimento analítico buscou estabelecer relações entre forma, significado e contexto, entendendo a produção material como expressão de uma leitura situada do território. Para aumentar a consistência da interpretação, adotou-se a triangulação entre (i) conteúdos das pranchas conceituais, (ii) características formais dos artefatos e (iii) observações registradas durante o desenvolvimento da atividade, permitindo confrontar diferentes evidências na construção das inferências analíticas.

A condução da atividade dialoga com perspectivas da docência no ensino superior que compreendem o processo educativo como prática coletiva, intencional e contextualizada, voltada à construção de conhecimento articulado à realidade (Pimenta; Anastasiou, 2002). Tal orientação reforça a compreensão da prática pedagógica como mediação entre teoria, experiência e contexto territorial.

Adicionalmente, o desenho da atividade encontra respaldo nas diretrizes do Projeto Pedagógico do Curso (PPC) de Arquitetura e Urbanismo (FACULDADE INTEGRA, 2022), concebido a partir de uma abordagem formativa que articula prática projetual, leitura territorial e apreensão sensível do ambiente e privilegia metodologias voltadas à experimentação e à integração entre conhecimento técnico e contexto socioambiental. Nesse sentido, a proposta articula práticas interdisciplinares e aprendizagem situada e se alinha a uma formação que integra saber, experiência e responsabilidade com o lugar, em consonância com os objetivos formativos do curso.

Como limitação, destaca-se o caráter situado da experiência, desenvolvida em um único contexto formativo e com número reduzido de participantes, o que não permite generalizações. Adicionalmente, reconhece-se que a posição da pesquisadora como docente da disciplina pode influenciar a leitura dos resultados; tal aspecto foi mitigado pela explicitação dos critérios de seleção e pela triangulação dos dados. Ainda assim, o estudo oferece subsídios analíticos relevantes para a compreensão de estratégias pedagógicas voltadas à formação ambientalmente situada em cursos de Arquitetura e Urbanismo.

Resultados e Discussão

A análise dos trabalhos produzidos evidencia que a atividade proposta favoreceu a articulação entre criação material, leitura territorial e reflexão socioambiental. Em vez de se limitar à reprodução de referências formais, as produções revelam a incorporação de significados associados ao Cerrado enquanto sistema socioambiental e mobilizam dimensões simbólicas, ecológicas e culturais. Para fins analíticos, os resultados foram organizados em três eixos interpretativos: **(i) crítica socioambiental, (ii) valorização da biodiversidade e (iii) mediação entre forma**, significado e território.

Os trabalhos com caráter crítico, no eixo da **crítica socioambiental**, representados pelos números 1 e 2 da Figura 2, evidenciam a capacidade dos estudantes de identificar e problematizar impactos decorrentes de processos de intervenção humana no território. A representação de um crânio de onça-pintada, por exemplo, mobiliza a ideia de perda e extinção, pois converte um objeto utilitário em suporte de denúncia simbólica. De modo semelhante, a representação de um tatu-bola atropelado explicita os efeitos da fragmentação de habitats e da expansão da infraestrutura viária sobre a fauna silvestre.

Essas produções indicam que a atividade estimulou não apenas a percepção, mas a elaboração crítica dos conflitos socioambientais e se aproxima de uma leitura territorial que reconhece o espaço como produto de relações de poder e de práticas sociais, em consonância com perspectivas críticas do território que o compreendem como espaço de disputas socioambientais (Souza, 2019). Nesse sentido, os resultados dialogam com abordagens da ecologia política, especialmente em Leff, (2021), ao evidenciar que os estudantes passaram a associar formas espaciais a processos de degradação e desigualdade ambiental. Esse movimento também se aproxima da compreensão de que as representações espaciais influenciam a forma de intervenção no território, conforme discutido por (Harvey, 2005).



Figura 2: Trabalhos desenvolvidos pelos discentes do 2º período para a disciplina de "Construções Plásticas I". Fonte: Amanda Negreiros (2026)

Outro conjunto de trabalhos, no eixo da **valorização da biodiversidade**, representado pelos números 3 e 4 da Figura 2, evidencia a valorização simbólica de elementos da fauna e da flora do Cerrado. O porta-joias inspirado na lobeira, por exemplo, estabelece uma analogia entre o objeto e a noção de riqueza ecológica, ao atribuir valor simbólico a uma espécie frequentemente negligenciada no cotidiano urbano. Da mesma forma, os suportes de hashi que representam espécies da ictiofauna regional tensionam referências culturais externas ao inserir elementos locais em objetos associados a outras tradições.

Nesses casos, observa-se um deslocamento do olhar dos estudantes em direção ao reconhecimento do Cerrado como patrimônio ecológico e cultural. A produção material funciona, assim, como meio de ressignificação do território, pois favorece a construção de vínculos simbólicos e afetivos com o ambiente. Tal processo aproxima-se da noção de topofilia, conforme proposta por Yi-Fu Tuan (1980), ao evidenciar a construção de relações de pertencimento mediadas pela experiência e pela representação.

Para além das categorias temáticas, no eixo de **mediação entre forma, significado e território**, os resultados indicam que a atividade operou como dispositivo de mediação entre forma, significado e território. As soluções formais adotadas nos artefatos não se apresentam como escolhas arbitrárias, mas como expressões de interpretações construídas pelos estudantes a partir da articulação entre conteúdo teórico, experiência e contexto local.

A análise das pranchas conceituais evidencia que os estudantes foram capazes de explicitar relações entre suas escolhas formais e os significados atribuídos ao Cerrado e estabelecem conexões entre materialidade e leitura territorial. As pranchas funcionam, nesse sentido, como dispositivos de externalização do pensamento projetual, o que permite acessar de forma mais sistematizada os processos de construção de sentido desenvolvidos pelos estudantes. Esse aspecto reforça o papel da experimentação plástica como estratégia pedagógica capaz de integrar dimensões cognitivas e sensíveis no processo de aprendizagem, em consonância com a perspectiva de Educação Ambiental crítica proposta por Carvalho (2016), que enfatiza a formação de sujeitos capazes de interpretar e agir sobre sua realidade socioambiental.

Em **síntese interpretativa**, os resultados indicam que a atividade contribuiu para a construção de uma compreensão mais integrada dos sistemas socioambientais, ao estimular a leitura crítica do território e a incorporação de referências ecológicas nas proposições dos estudantes. A triangulação entre forma, discurso e observação permitiu identificar que as produções não apenas refletem conteúdos assimilados, mas também processos de interpretação e ressignificação.

Do ponto de vista formativo, a experiência evidencia o potencial de metodologias que articulam experimentação, reflexão e contexto, o que contribui para a formação de profissionais capazes de compreender, interpretar e intervir em realidades

ambientais complexas. Além disso, os resultados sugerem que a incorporação de estratégias dessa natureza ao longo da formação pode ampliar a capacidade crítica dos estudantes e evitam que tais abordagens se restrinjam a experiências pontuais. Ao aproximar prática projetual e leitura territorial, a atividade amplia as possibilidades de integração entre Arquitetura e Urbanismo e Educação Ambiental, e reforça a importância de abordagens interdisciplinares no enfrentamento de desafios socioambientais contemporâneos. Nesse sentido, a experiência também evidencia a aderência da atividade às diretrizes formativas do Projeto Pedagógico do Curso, ao articular prática projetual, leitura territorial e reflexão ambiental de maneira integrada (FACULDADE INTEGRA, 2022).

Comentários finais

O presente estudo analisou uma experiência pedagógica desenvolvida no ensino de Arquitetura e Urbanismo, com o objetivo de compreender em que medida práticas projetuais experimentais podem contribuir para a formação de estudantes capazes de interpretar e intervir em sistemas socioambientais a partir da materialidade e do projeto. Os resultados indicam que a articulação entre experimentação material, leitura territorial e reflexão conceitual favorece a construção de uma compreensão ampliada do Cerrado enquanto sistema complexo, marcado por interações ecológicas, culturais e políticas.

A atividade demonstrou potencial para estimular não apenas a assimilação de conteúdos, mas a elaboração crítica de conflitos socioambientais, evidenciada pela capacidade dos estudantes de mobilizar referências simbólicas associadas à degradação ambiental e à valorização da biodiversidade. Tal processo contribui para a formação de um olhar projetual mais sensível às dinâmicas territoriais, aproximando o ensino de Arquitetura e Urbanismo de abordagens que reconhecem o espaço como resultado de disputas e processos de intervenção humana.

Do ponto de vista pedagógico, a experiência reforça a importância de metodologias que integrem dimensões cognitivas e sensíveis no processo de aprendizagem, promovendo a articulação entre teoria, prática projetual e contexto territorial. Nesse sentido, a experimentação material mostrou-se eficaz como estratégia de mediação para a leitura do território, ao possibilitar que os estudantes externalizem e ressignifiquem suas interpretações por meio da forma.

Entretanto, reconhece-se que a atividade analisada apresenta limitações, especialmente por seu caráter situado e pontual, o que não permite generalizações. Tal aspecto indica a necessidade de continuidade e aprofundamento dessas abordagens ao longo da formação, de modo a consolidar processos de aprendizagem que articulem de forma sistemática a dimensão ambiental ao desenvolvimento projetual, sem deslocar o eixo disciplinar da Arquitetura e Urbanismo.

Por fim, considera-se que a incorporação de estratégias pedagógicas dessa natureza pode contribuir para a formação de profissionais mais preparados para atuar em contextos de alta complexidade socioambiental, como aqueles presentes no Cerrado. Ao integrar leitura territorial, reflexão crítica e prática projetual, o ensino de Arquitetura e Urbanismo amplia seu potencial de atuação frente aos desafios contemporâneos de conservação, planejamento e sustentabilidade. Nesse contexto, o ensino de Arquitetura e Urbanismo não apenas projeta espaços, mas forma sujeitos capazes de intervir criticamente nas relações entre sociedade e natureza.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos estudantes participantes da disciplina pela disponibilidade, envolvimento e sensibilidade demonstrados no desenvolvimento das atividades, fundamentais para a construção das reflexões apresentadas neste estudo. Também se reconhece a importância dos diálogos acadêmicos que contribuíram para o amadurecimento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios morfoclimáticos na América do Sul:** primeira aproximação. Geomorfologia, São Paulo, n. 52, p. 1–21, 1977.

ALBUQUERQUE, Carlos**. Caldas Novas ecológica**. Caldas Novas: Kelps, 1998.

ANGROSINO, Michael. **Etnografia e observação participante**. Porto Alegre: Artmed, 2009.

CARVALHO, Fabrício Alvim; RODRIGUES, Victor Hugo Paula; KILCA, Ricardo Vargas; SIQUEIRA, Ariane Souza; ARAÚJO, Glein Monteiro; SCHIAVINI, Ivan. **Composição florística, riqueza e diversidade de um cerrado sensu stricto no sudeste do estado de Goiás**. Bioscience Journal, Uberlândia, v. 24, n. 4, p. 64–72, out./dez. 2008.

CARVALHO, Isabel Cristina de Moura. **Educação ambiental:** a formação do sujeito ecológico. 6. ed. São Paulo: Cortez, 2016.

CELLARD, André. A análise documental. In: POUPART, Jean et al. **A pesquisa qualitativa**: enfoques epistemológicos e metodológicos. Petrópolis: Vozes, 2008. p. 295–316.

FACULDADE INTEGRA. **Projeto Pedagógico do Curso de Arquitetura e Urbanismo**. Caldas Novas: Faculdade Integra, 2022.

FLICK, Uwe. **Uma introdução à pesquisa qualitativa**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

HAESBAERT, Rogério. **Território e multiterritorialidade:** um debate. GEOgraphia, v. 9, n. 17, p. 19–44, 2007.

HARVEY, David. **A produção capitalista do espaço**. São Paulo: Annablume, 2005.

LEFF, Enrique. **Ecologia política:** da desconstrução do capital à territorialização da vida. Campinas: Editora da Unicamp, 2021.

MORAES. Antonio Carlos Robert. **Território e história no Brasil.** 2. ed. São Paulo: Anablume, 2015.

PAULO, Renata Ferreira Calado de. **O turismo e a dinâmica intra-urbana de Caldas Novas (GO):** uma análise da expansão e reestruturação do complexo hoteleiro. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005. Dissertação (Mestrado em Geografia).

PIMENTA, Selma Garrido; ANASTASIOU, Léa das Graças Camargos. **Docência no ensino superior**. São Paulo: Cortez, 2002. v. 1. (Coleção Docência em Formação).

PORTO-GONÇALVES, Carlos Walter. **A globalização da natureza e a natureza da globalização**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.

SANO, Sueli Matiko; ALMEIDA, Semíramis Pedrosa de; RIBEIRO, José Felipe (org.). **Cerrado:** ecologia e flora. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 2 v.

SANTOS, Milton. **A natureza do espaço:** técnica e tempo, razão e emoção. São Paulo: Hucitec, 1996.

SOUZA, Marcelo Lopes de. **Ambientes e territórios:** uma introdução à ecologia política. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2019.

TUAN, Yi-Fu. **Topofilia:** um estudo da percepção, atitudes e valores do meio ambiente. Londrina: Eduel, 1980.

ZEIN, Ruth Verde. **Leituras críticas:** textos sobre arquitetura, projeto e crítica. São Paulo: Brasil 5, 2018.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL CONTEXTUALIZADA: COMO COMPREENDER O COTIDIANO VISANDO ESTIMULAR O PROTAGONISMO ESTUDANTIL?

1 Jacqueline Dias de Oliveira, 2 Nágila Veiga Adrião Monteiro, 3 Jucimara Andreza Rigotti, 4 Isaque Levi de Souza Teixeira, 5 Arthur Moschetta Ampessan, 6 Yasmin Alessandra Richter Winiarski, 7 Regina Tiemy Kishi

1 Universidade Federal do Paraná, e-mail: jacqueline.dias@ufpr.br; 2 Universidade Federal do Paraná, e-mail: nagila.monteiro@ufpr.br; 3 Universidade Federal do Paraná, e-mail: andrezarigotti@ufpr.br; 4 Universidade Federal do Paraná, e-mail: isaque.levi@ufpr.br; 5 Universidade Federal do Paraná, e-mail: arthurampessan@ufpr.br; 6 Universidade Federal do Paraná, e-mail: yasmin.richter@ufpr.br; 7 Universidade Federal do Paraná, e-mail: rtkishi.dhs@ufpr.br

Palavras-chave: protagonismo estudantil, programa de extensão, educação ambiental.

Resumo

Abordagens de educação ambiental que partem da realidade cotidiana dos estudantes podem potencializar a conexão da sociedade com os rios urbanos, promovendo maior engajamento e protagonismo. Nesse sentido, este artigo descreve e discute a sequência didática do projeto de extensão Redescobrindo Rios (UFPR) como ferramenta de educação ambiental contextualizada, estruturada em três etapas: (i) aula teórica sobre os ciclos da água natural e urbana, com apoio de experimentos e livreto ilustrado; (ii) jogo colaborativo "Missão nas Águas", no qual os alunos simulam a gestão de uma bacia hidrográfica; (iii) saída de campo com ficha de percepção ambiental (odor, cor, presença de lixo, mata ciliar, erosão) e ações de intervenção urbana (pintura de bocas-de-lobo, mutirões). As atividades são organizadas segundo o ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), que orienta seu planejamento, sua execução, sua verificação e sua melhoria contínua, sendo também incorporado à dinâmica do jogo. Com base nas aplicações realizadas, melhorias foram e estão sendo implementadas. Como exemplo, identificou-se a necessidade de desenvolver uma ficha de percepção específica para o trajeto entre a escola e o rio, direcionando o olhar dos alunos para os elementos de drenagem para complementar a percepção do caminho da água até o corpo hídrico. Para avaliar os efeitos da intervenção em termos de mudanças de percepção, conhecimento e protagonismo dos estudantes, foi desenvolvido um questionário estruturado em seis blocos temáticos (identificação, percepção e vínculo, água na cidade, rio e entorno, resíduos sólidos, protagonismo e ação), a ser aplicado antes e após as atividades. A aplicação da sequência de atividades com os questionários está planejada para o segundo semestre de 2026, o que viabilizará a quantificação do impacto das atividades, a validação dos resultados esperados e o aprofundamento da compreensão sobre os efeitos da sequência didática no contexto da educação ambiental.

Introdução

O ser humano, na sociedade atual, tem se mostrado mais desconexo com a natureza. Segundo Silva (2024), somado aos recursos abundantes presentes na natureza, a humanidade cada vez mais foi se afastando da flora e da fauna. Nesse sentido, Santos (2003), destaca que o processo de urbanização contemporâneo, denominado “meio técnico-científico-informacional”, se caracteriza pela substituição dos elementos naturais por objetos artificiais, levando a uma alienação do indivíduo em relação ao território que habita. Essa artificialidade, muitas vezes, mascara injustiças socioespaciais, nas quais a educação ambiental deve atuar como ferramenta de justiça ambiental, desnaturalizando a degradação e promovendo a consciência crítica (MANOEL; TEMOTEO, 2025; MENEZES, 2015). Essa situação se torna ainda mais preocupante, quando se nota que a geração atual de jovens não possui essa conexão e percepção de como está o meio ambiente em seu entorno. O crescente impacto negativo sobre as crianças, à medida que elas são cada vez mais privadas do contato direto com a natureza e da experiência de brincadeiras livres e espontâneas ao ar livre, vem sendo caracterizado com o termo “transtorno por déficit de natureza”, criado por Richard Louv (DRIESSNACK, 2009).

Nesse contexto, um dos grandes desafios no ambiente escolar é atrair a atenção dos estudantes para temas ambientais complexos e teóricos. O uso de jogos, sejam eles digitais ou analógicos, surge como uma estratégia valiosa para superar a desmotivação escolar, promovendo o desenvolvimento da criatividade e do raciocínio lógico (SANTOS; ARAÚJO, 2025). Segundo Silva et al. (2025), o caráter lúdico e cooperativo dessas ferramentas auxilia na internalização de valores éticos e sustentáveis, permitindo que os alunos compreendam a interdependência entre o ser humano e o meio ambiente. A partir disso, desenvolveu-se a iniciativa do projeto, na qual se identificou a necessidade de instigar esses jovens a refletir e engajar-se mais ativamente em assuntos referentes ao meio ambiente e os recursos hídricos, começando principalmente com ações dentro de sua comunidade. Cabe destacar que, o conceito de práticas sociais que promovem maior percepção ambiental e protagonismo infantojuvenil, não é uma proposta recente. Entretanto, a implementação dessas ações mostra-se mais complexa do que aparenta. Segundo Chagas et al. (2025), a interação do homem com a natureza, no contexto analisado, não é usual, mas sim um evento periódico, ocorrendo principalmente de forma mais teórica e conceitual. Essa lacuna de vivência corrobora a tese de Santos (2000), de que o espaço moderno é um 'sistema de objetos cada vez mais artificiais, povoados por sistemas de ações igualmente imbuídos de artificialidade'.

No cenário brasileiro, observa-se que os processos de urbanização e gestão ambiental apresentam desafios importantes. Apesar da existência da Política Nacional de Educação Ambiental (PNEA) desde 1999, que visa incluir nas escolas a discussão desses temas, apenas uma parcela pequena dos municípios possui isso estruturado como política pública de ensino contínua. Essa carência institucional mostra as limitações na consolidação da educação ambiental como uma prática recorrente, o que pode

comprometer sua efetividade a longo prazo, e podendo, em determinados contextos, contribuir para a manutenção de desigualdades socioambientais, conforme discutido na literatura sobre injustiça ambiental (MOUTINHO-DA-COSTA, 2011). Além disso, as Diretrizes Curriculares Nacionais (BRASIL, 2013) reforçam que a educação ambiental é um componente transversal obrigatório, que deveria se integrar aos Projetos Políticos Pedagógicos para combater silenciamentos históricos e promover o respeito à diversidade. Dessa forma, aponta-se para a necessidade de projetos, programas e iniciativas que busquem articular políticas públicas, práticas educacionais e gestão ambiental, especialmente diante da crescente dependência da sociedade em relação a esses recursos naturais.

Sob essa perspectiva, a proposta do Redescobrindo Rios, projeto do programa de extensão Água & Ação, do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná (UFPR), busca retomar esse olhar mais crítico voltado à temática dos rios urbanos, principalmente por crianças e adolescentes, promovendo atividades que integram conhecimento técnico, saída de campo e elaboração de propostas de solução. Esta abordagem converge para uma ecologia política onde a educação assume o compromisso de mediar conflitos ambientais concretos, contribuindo para a mobilização comunitária (LAYRARGUES; PUGGIAN, 2016). Isso, porque, ano após ano, o desinteresse da população com os corpos hídricos ao seu redor se mostra cada vez mais preocupante, um exemplo é o Rio Belém em Curitiba no Paraná, que segundo Bollmann (2008), não é somente um dos maiores rios da cidade, mas sim parte da identidade do local, cruzando alguns dos principais bairros com partes já canalizadas e outras abertas, mas infelizmente é um corpo hídrico com poluição difusa e com presença de resíduos que são descartados irregularmente ao longo de seu trecho. A precariedade do saneamento básico muitas vezes é uma das causas desse quadro de poluição e distanciamento do rio, refletindo-se diretamente na saúde e no desempenho dos estudantes, conforme dados nacionais que apontam a ausência de saneamento adequado associada a um aumento de 17% no atraso escolar (TRATA BRASIL, 2024). Além disso, a maioria das instituições ainda restringe a educação ambiental a temas teóricos, sem a vivência prática necessária para a compreensão da qualidade hídrica (PALMIERI, 2011). Assim, o projeto Redescobrindo Rios busca reduzir essa lacuna, tornando esse tema, não só mais um conceito teórico aprendido em sala de aula, mas sim, uma experiência concreta que promova soluções e ações por parte dos estudantes.

Essa ideia de aplicação já foi defendida por Pires e Branco (2007), que afirmam que "O protagonismo infantil se refere à participação das crianças nos processos sociais, envolvendo a possibilidade de exercerem influência nas decisões que dizem respeito às suas próprias vidas e aos contextos em que estão inseridas", dessa forma projetos que promovem uma avaliação crítica da realidade e a sugestão de alternativas, auxiliam na educação de indivíduos conscientes socialmente. Nesse sentido, os colégios assumem uma função estratégica na gestão ambiental, formando sujeitos capazes de exercer o controle social sobre processos que geram vulnerabilidades nos seus próprios territórios (MENEZES, 2015). Para potencializar essa formação, a utilização de jogos educativos permite que o estudante se torne o principal responsável pelo seu aprendizado, transformando dilemas ambientais abstratos em experiências tangíveis que favorecem a aprendizagem significativa (LAÉRCIO; FONSECA, 2022). Pensando nisso, o foco do projeto de extensão é trabalhar em duas frentes que se complementam, unindo teoria com prática, com ações que realmente tenham impacto na comunidade desses estudantes.

Assim, o objetivo deste artigo é descrever e discutir a sequência didática do projeto Redescobrindo Rios como ferramenta de educação ambiental contextualizada para estimular a percepção de rios urbanos e o protagonismo estudantil, assumindo-se que a sequência, por articular teoria, gamificação e prática de campo, tem potencial para ampliar a percepção ambiental e estimular o protagonismo dos estudantes. O projeto estrutura suas ações segundo o método PDCA (planejamento, execução, verificação e ação), o qual ao longo dos anos tem se tornado amplamente utilizado, como reforçado por Velho et al (2025). Além disso, apresenta-se a proposta de um questionário a ser aplicado antes e depois das atividades como instrumento de verificação do aprendizado e da percepção ambiental.

Métodos

Trata-se de uma proposta de sequência didática para educação ambiental contextualizada, tendo em vista levar uma nova percepção aos rios urbanos e incentivar as boas práticas relacionadas à qualidade destes ecossistemas, voltada a alunos do Ensino Fundamental, a partir do 6º ano, em escolas localizadas em áreas urbanas com presença de corpo hídrico próximo. A sequência foi estruturada em três etapas: (i) fundamentação teórica sobre ciclos da água; (ii) jogo de tabuleiro colaborativo "Missão nas Águas"; (iii) caminhada da percepção ao rio com registro orientado e ação de intervenção urbana. No Quadro 01 são resumidas as atividades com pequena descrição e métodos educacionais correspondentes.

Atividade	Método educacional	Objetivos
Fundamentação teórica	*Storytelling* e demonstração com experimentos com apoio	Promover o entendimento dos processos envolvidos no ciclo da água natural e urbana, contribuindo para a

	de livreto ilustrado	compreensão da bacia de drenagem e das relações de causa e efeito associadas a alagamentos e poluição.
Jogo de tabuleiro "Missão nas Águas".	Gamificação e aprendizagem baseada em problemas	Simular a gestão de bacias hidrográficas por meio de situações-problema. A atividade proporciona uma visão holística da bacia (relação montante/jusante), além de estimular trabalho em equipe, escuta ativa e tomada de decisão.
Caminhada da percepção + ficha de observação	Aprendizagem baseada na investigação e educação ambiental crítica	Apartir da realidade do aluno, promover a observação do entorno da escola até o corpo hídrico próximo, com foco na identificação de aspectos ambientais, infraestrutura e problemas locais, com base nos temas abordados nas etapas anteriores.
Discussão sobre problemas e soluções	Aprendizagem baseada em problemas	Sistematizar as observações realizadas durante a caminhada, promovendo análise crítica dos problemas identificados, suas causas potenciais e a proposição de soluções.
Ação e protagonismo	Aprendizagem prática ("mão na massa")	Incentivar a aplicação concreta das soluções propostas, seja por ações imediatas ou planejadas (ex.: intervenções artísticas, mutirões, ações de conscientização), fortalecendo o protagonismo estudantil.

Quadro 01 - Sequência didática proposta e abordagens utilizadas
Fonte: Os autores (2026)

Para avaliar o efeito da sequência didática sobre a percepção ambiental e o protagonismo estudantil, propõe-se a aplicação de um questionário em dois momentos: antes (pré-questionário) e depois (pós-questionário) da realização das atividades.

Nesse sentido, o método PDCA foi utilizado em diversas etapas no projeto Redescobrindo Rios, seja em definição de atividades didáticas ou padronização delas, ou seja, identificado o problema e definidas as metas e ações (*Plan*-Planejar); as atividades didáticas foram elaboradas e aplicadas (*Do*-Executar); Após a execução, os resultados foram avaliados e comparados com o esperado (*Check*-Checar); e com base na checagem, os ajustes foram implementados, desvios corrigidos e melhorias realizadas (*Act*-Agir/Ajustar). Este processo é realizado repetidamente com as melhorias até a padronização com o que funcionou.

Etapa teórica – ciclos da água natural e urbana

A etapa teórica reforça conceitos como ciclo hidrológico natural e urbano, para entendimento do caminho da água, dos impactos de sistemas de saneamento mal utilizados, de pavimentos impermeáveis e da falta de vegetação, influenciando nos eventos de alagamentos e poluição. Tem duração prevista de 30 minutos e ocorre em sala de aula.

A melhoria de uma apresentação tradicional da primeira aplicação até o momento atual foi baseada na observação e reação dos participantes a cada aplicação da atividade em 3 eventos, resultando em uma apresentação por meio de linguagem lúdica (contação de história) e experimentos demonstrativos (por exemplo: dois tipos de pavimentos para demonstrar a infiltração ou maquete demonstrando diferentes usos do solo influenciando a infiltração e o escoamento superficial), com apoio de um livreto ilustrado (SOARES et al., 2024).

Jogo "Missão nas Águas" – gestão simplificada de bacia hidrográfica

Após a fundamentação teórica, segue um momento mais dinâmico com a aplicação de um jogo de tabuleiro, desenvolvido dentro do projeto por Oliveira et al. (2025), denominado "Missão nas Águas ", onde os alunos são divididos em equipes. O jogo é do tipo tabuleiro colaborativo, com duração estimada de 60 minutos, projetado para 4 a 6 jogadores por mesa, que trabalham juntos para resolver problemas. O tabuleiro representa uma bacia hidrográfica hipotética com rios, áreas urbanas,

zonas agrícolas e indústrias. Os jogadores recebem três tipos de cartas: cartas de eventos ambientais (ex.: “erosão na margem”), cartas de investigação (ex.: “verificar se há desmatamento”, “identificar ligação irregular de esgoto”, etc) e cartas de solução (ex.: “plantio de mata ciliar”, “mutirão de limpeza”, etc). O objetivo é solucionar problemas identificados no rio principal com soluções originais criadas pelos próprios alunos ou utilizando as cartas soluções, promovendo discussão coletiva sobre causas e consequências dos impactos.

O jogo foi elaborado e testado pelos diversos membros da equipe, além de ter sido aplicado em 3 escolas de Curitiba/PR, passando pelas etapas de checagem e ajustes do ciclo PDCA até chegar à versão atual.

Durante a dinâmica do jogo “Missão nas Águas”, o ciclo PDCA também é estimulado entre os jogadores. A equipe deve identificar o problema (evento ambiental), analisar suas causas (cartas de investigação), elaborar um plano de ação (cartas solução ou propostas originais), verificar se as ações atacam as causas e, caso necessário, fazer a melhoria antes da conclusão da proposta. Essa abordagem, aplicada à educação de crianças e adolescentes, faz com que os alunos resolvam desafios autônoma e sistêmica, discutindo entre si, o que promove protagonismo, senso crítico e criatividade.

O jogo pode ser adaptado conforme o ano escolar. Em turmas de anos iniciais, trabalha-se um problema por vez, com ênfase na compreensão profunda dos conceitos e em apresentação oral das soluções. Em turmas mais avançadas, podem ser aplicados até três problemas simultaneamente, otimizando o tempo e permitindo uma discussão coletiva final. Opcionalmente, pode-se introduzir um sistema de pontuação: cada grupo recebe um limite de créditos para "comprar" soluções, ganhando pontos por cada solução corretamente aplicada, o que estimula ainda mais a discussão estratégica entre os alunos.

A partir dessa etapa, na qual diversos conceitos são relembrados e simulados por meio do jogo, parte-se para uma experiência concreta da realidade do aluno: a saída de campo.

Caminhada da percepção e ação de intervenção

A caminhada é realizada em trecho de até 800 m entre a escola e o corpo hídrico mais próximo, com duração aproximada de 90 minutos. Cada aluno recebe uma ficha de percepção ambiental (SOARES et al., 2024), por ponto de observação no trecho do rio, contendo os seguintes parâmetros a serem observados e assinalados: presença de mata ciliar; morfologia do rio (meandros, retilíneo, canalizado/enterrado); presença de lixo nas margens e dentro da água; erosão de margens; cor da água; odor da água. Ao final da caminhada, realiza-se uma roda de conversa de aproximadamente 20 minutos, para compartilhamento das observações, levantamento de hipóteses sobre as causas dos problemas identificados e proposição coletiva de soluções.

Na primeira aplicação desta atividade, as crianças foram convidadas a uma ação de intervenção, a pintarem com tinta atóxica a silhueta de um peixe sobre as bocas-de-lobo próximas à escola. Na segunda vez, uma aluna adicionou espontaneamente uma frase “Não jogue lixo”. Atualmente, as ações são escolhidas pelos próprios alunos. Por exemplo, uma das escolas propôs a realização de um mutirão de revitalização, onde os alunos irão aplicar um questionário e os próprios alunos organizarão o mutirão em conjunto com a comunidade.

Com base nas observações realizadas ao longo das aplicações, identificou-se que a orientação verbal durante o trajeto entre a escola e o rio mostrou-se insuficiente para sustentar a atenção dos alunos aos elementos urbanos que conectam a cidade ao corpo hídrico, como sarjetas, bocas de lobo e pavimentação. Assim, está sendo desenvolvida uma ficha de percepção específica para o trajeto, nos moldes da aplicada no rio, que ao exigir registro sistemático, direcione o olhar dos alunos e torne a atividade mais efetiva. O novo instrumento contemplará aspectos como o estado das sarjetas, bocas de lobo e pavimentação ao longo do percurso, favorecendo uma leitura mais crítica do ambiente urbano e a identificação de possíveis obstruções no escoamento da água pluvial ou indícios de irregularidades no sistema de drenagem, como mau odor ou ruídos em bocas de lobo mesmo na ausência de chuva.

Instrumento de avaliação do impacto (pré e pós)

Para verificar a eficácia da proposta de sequência das ações do projeto descrita anteriormente, será aplicado um questionário estruturado antes da primeira etapa do projeto na escola e novamente após a conclusão de todas as atividades. O objetivo é avaliar o impacto da intervenção na percepção e no protagonismo dos participantes em relação aos problemas enfrentados pelo rio.

Com base nos objetivos, o questionário foi elaborado não só com perguntas que meçam o conhecimento prévio dos estudantes sobre recursos hídricos e saneamento, mas que também identifiquem se o projeto os influenciou a quererem contribuir para uma cidade com rios saudáveis e sem lixo. Deste modo, verifica-se a disposição dos alunos em fazer sua parte para reduzir a poluição e o gasto desnecessário de água, entre outras pequenas ações do dia a dia que, em grande escala, prejudicam a qualidade de vida. A Figura 1 contém o passo a passo para a elaboração do questionário, cujo processo de criação foi estruturado em quatro etapas sequenciais que buscaram garantir a validação metodológica para a pergunta principal, iniciando-se pela análise

e estudo dos objetivos e temas centrais (como saneamento e resíduos sólidos), seguida pela elaboração de um protótipo digital do questionário e uma aplicação de teste com os membros do projeto. Após essa fase, o instrumento passou por reformulação e revisão criteriosa com base nos feedbacks recebidos para assegurar objetividade e clareza, permitindo a finalização para aplicação do formato físico junto ao público-alvo.

A análise dos dados quantitativos será feita por estatística descritiva (gráficos, medidas de tendência central e dispersão). Os dados qualitativos (questões abertas) serão submetidos à análise de conteúdo temática, com categorias definidas a posteriori: (i) compreensão da conexão cidade-rio; (ii) identificação de problemas; (iii) proposição de soluções; (iv) indícios de protagonismo.

A aplicação do questionário será submetida ao Comitê de Ética em Pesquisa da UFPR. Antes dos alunos responderem aos questionários, o termo de assentimento livre e esclarecido (TALE) será adicionado na primeira página, com linguagem acessível solicitando permissão para a utilização das respostas em estudos posteriores. Além disso, será solicitado o preenchimento do termo de esclarecimento livre e esclarecido (TCLE) dos responsáveis legais dos alunos, via formulário online, visando garantir transparência no uso dos dados coletados, ainda que a maioria das questões não seja diretamente relacionada a dados sensíveis dos participantes.

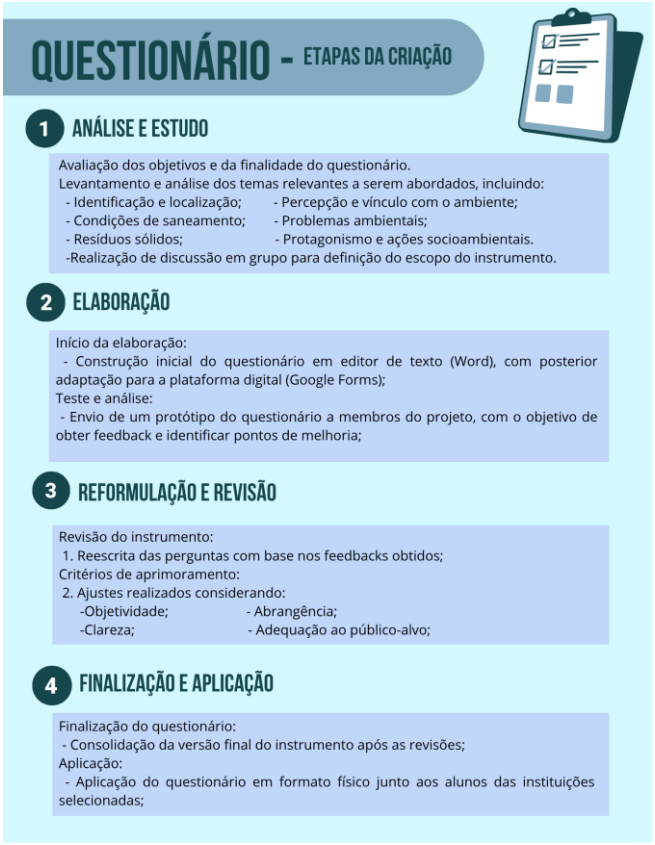


Figura 01 – Etapas para elaboração do questionário
Fonte: Os autores (2026)

O questionário

O questionário é composto por versões pré e pós-intervençao. O pré-questionário contém 20 questões e o pós-questionário contém 21 questões, com tempo de resposta estimado em 5 minutos cada. No total, eles são 17 questões objetivas e 3 abertas no pré-teste, e 18 questões objetivas e 3 abertas no pós-teste.

As questões estão distribuídas em seis blocos temáticos que visam avaliar percepção ambiental, o conhecimento sobre saneamento e o desenvolvimento do protagonismo estudantil:

- Bloco 1 – Identificação (4 questões): permite o pareamento das respostas do pré e pós-teste de forma anônima.
- Bloco 2 – Percepção e vínculo (3 questões): Avalia a percepção dos estudantes sobre a presença de rios no cotidiano, e sua relação com esses ambientes.

- Bloco 3 – A água na cidade (5 questões): mede o conhecimento dos estudantes sobre saneamento, incluindo abastecimento de água, rede de esgoto, drenagem urbana e alagamentos.
- Bloco 4 – O rio e seu entorno (3 questões): avalia a capacidade do aluno de identificar problemas ambientais e compreender elementos relacionados aos rios, como fontes de poluição e a importância da mata ciliar.
- Bloco 5 – Resíduos sólidos (3 questões): analisa hábitos, atitudes cotidianas e a disposição dos estudantes para agir diante de situações envolvendo lixo no ambiente urbano.
- Bloco 6 – Protagonismo e ação (3 questões): avalia o engajamento dos estudantes frente à poluição dos rios e sua capacidade de propor soluções. Dentre essas, duas questões estão presentes no pré e no pós-teste, enquanto uma questão adicional é exclusiva do pós-teste, voltada à autoavaliação do sentimento de capacidade de agir e contribuir para mudanças na comunidade.

Este questionário ainda não foi aplicado, pois está em fase de detalhamento metodológico. A aplicação está agendada para o segundo semestre de 2026 em uma escola de Curitiba/PR, com duas turmas do 6º ano, totalizando aproximadamente 50 crianças.

É esperado que o processamento e análise das respostas obtidas nessas duas etapas, proporcionem uma visão abrangente sobre a evolução do conhecimento e percepção dos alunos impactados pelas atividades do projeto. A comparação entre os resultados do questionário inicial e do questionário após as ações do projeto, permitirá avaliar a eficácia das metodologias ativas e do método PDCA utilizados, e gerar também indicadores concretos que ajudem na melhoria contínua das próximas edições do projeto Redescobrindo Rios.

Considerações finais

A sequência didática proposta no âmbito do projeto Redescobrindo Rios permitiu descrever e discutir uma abordagem de educação ambiental contextualizada que articula fundamentação teórica, gamificação e prática de campo. Essa integração favorece a aproximação dos estudantes com a realidade dos rios urbanos, contribuindo para a construção de uma percepção ambiental mais crítica.

A estruturação das atividades com base no método PDCA mostrou-se adequada para organizar e aprimorar continuamente as ações do projeto, possibilitando ciclos sucessivos de planejamento, execução, avaliação e ajuste. Nesse sentido, a proposta não se limita à aplicação de atividades isoladas, mas configura um processo formativo dinâmico, alinhado a metodologias ativas e à perspectiva de aprendizagem baseada na ação–reflexão–ação. Destaca-se, ainda, o potencial da sequência didática em promover o protagonismo estudantil, ao incentivar os alunos a observarem, analisarem e proporem soluções para problemas ambientais presentes em seu entorno. A vivência prática, especialmente por meio da caminhada de percepção e das ações de intervenção, contribui para reduzir o distanciamento entre os estudantes e os ecossistemas urbanos, fortalecendo a corresponsabilidade socioambiental.

Como contribuição metodológica, o estudo apresenta um instrumento de avaliação baseado na aplicação de questionários em momentos anterior e posterior às atividades, com o objetivo de verificar mudanças na percepção ambiental e no engajamento dos estudantes. Esse instrumento se insere na etapa de verificação do ciclo PDCA e poderá fornecer indicadores relevantes sobre a efetividade da proposta, além de subsidiar ajustes e melhorias em futuras aplicações.

Embora o questionário não tenha sido aplicado na fase relatada neste estudo, sua aplicação já está agendada para o próximo ciclo de atividades do projeto. A sequência didática completa será executada conforme o planejamento descrito, permitindo a coleta de dados empíricos pré e pós-intervenção. Essa etapa futura viabilizará a quantificação do impacto das atividades, a validação dos resultados esperados e o aprofundamento da compreensão sobre os efeitos da sequência didática no contexto da educação ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos membros do Programa Água & Ação, Fabieli Lustosa Sforza, Iann Furtado da Silva, Juliana Abreu Weisheimer e Maria Eduarda Macan, pela contribuição nas revisões e nos testes do questionário, bem como pelas sugestões de aprimoramento deste artigo.

Referências Bibliográficas

BOLLMANN, H. A., & Edwiges, T. (2008). Avaliação da qualidade das águas do Rio Belém, Curitiba-PR, com o emprego de indicadores quantitativos e perceptivos. Engenharia Sanitária E Ambiental, 13(4), 443–452. https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000400013.

CHAGAS, Jéssica da Cruz; ERAZO, Rafael de Lima; TENÓRIO, Olivia Gonçalves; PEREIRA, Alexandre Raimundo Reis. A percepção dos estudantes sobre a educação ambiental e a relação homem-natureza, em uma escola pública da cidade de Manaus-AM. Revista JRG, v. 8, n. 19, 2025. DOI: https://doi.org/10.55892/jrg.v8i9.2813.

DRIESSNACK, M. (2009), Children and Nature-Deficit Disorder. Journal of Specialists in Pediatric Nursing, 14: 73-75. https://doi-org.ez22.periodicos.capes.gov.br/10.1111/j.1744-6155.2009.00180.x

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Perfil dos Municípios Brasileiros: MUNIC. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Saneamento e Educação: impactos da precariedade hídrica no desempenho escolar brasileiro. São Paulo: Trata Brasil, 2024.

PALMIERI, Maria Luísa Bonazzi. Os projetos de educação ambiental desenvolvidos nas escolas brasileiras: análise de dissertações e teses. 2011. 189 f. Dissertação (Mestrado em Educação) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2011.

LAYRARGUES, Philippe Pomier; PUGGIAN, Cleonice. Convergências na ecologia política: quando a educação ambiental abraça a luta por justiça ambiental. Pesquisa em Educação Ambiental, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 72-82, 2016. DOI: https://doi.org/10.18675/2177-580X.vol11.n2.p72-82.

LAÉRCIO, Francisco Giovani Souza; FONSECA, Letícia Rodrigues da. Proposta de jogo educativo para a educação ambiental no ensino básico. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), São Paulo, v. 17, n. 1, p. 09-27, 2022.

MANOEL, Julio Cesar Costa; TEMOTEO, Gabriel Sampaio. Educação ambiental dialógica e jogos eletrônicos: o uso do TheoTown como ferramenta de justiça ambiental em escolas públicas. Revista Transmutare, Curitiba, v. 10, e20015, p. 1-18, 2025. Disponível em: https://periodicos.utfpr.edu.br/rtr. Acesso em: 8 abr. 2026.

MENEZES, Anne Kassiadou. Escolas Sustentáveis e Conflitos Socioambientais: Reflexões sobre o programa governamental das Escolas Sustentáveis sob a ótica da Justiça Ambiental. 2015. 160 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Centro de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO), Rio de Janeiro, 2015.

MOUTINHO-DA-COSTA, Lara. Territorialidade e racismo ambiental: elementos para se pensar a educação ambiental crítica em unidades de conservação. Pesquisa em Educação Ambiental, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 101-122, 2011. DOI: https://doi.org/10.18675/2177-580X.vol6.n1.p101-122

OLIVEIRA, Jacqueline Dias de; KISHI, Regina Tiemy; RIGOTTI, Jucimara Andreza; SOARES, Ana Harumi de Paula; MONTEIRO, Nágila Veiga Adrião. Missão nas águas: uma proposta lúdica para o ensino de engenharia sustentável em ambientes educacionais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2025, Vitória, ES. Código do trabalho: XXVI-SBRH0190: https://eventos.abrhidro.org.br/xxvisbrh.

PIRES, Sergio Fernandes Senna; BRANCO, Angela Uchoa. Protagonismo infantil: co-construindo significados em meio às práticas sociais. Paidéia, Ribeirão Preto, v.17, n.38, p.311-320, 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-863X2007000300002.
SANTOS, Milton. Natureza do Espaço: Técnica e Tempo, Razão e Emoção. EdUSP, 2006. (Para falar da artificialidade da cidade).

SANTOS, Leonardo dos; ARAÚJO, Patrício Câmara. O uso de jogos como ferramenta didática no ensino da educação ambiental: uma revisão sistemática da literatura. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), São Paulo, v. 20, n. 7, p. 403-422, 2025.

SANTOS, Milton. Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal. Record, 2000. 10. ed. Rio de Janeiro: Record, 2003. 174 p.

SILVA, Cenira Lopes Vieira da et al. Papel da educação ambiental e dos jogos na formação de valores sustentáveis no ensino fundamental. In: Avanços na saúde: pesquisas e práticas transformadoras, v. 2, cap. 1, p. 31-42, 2025.

SILVA, Patrícia de Oliveira Rosa da; GUIMARÃES MARTINEZ, Mateus; PENA GONÇALVES, Murilo; NUNES, Maria Eduarda; UCHIMA, Stephany; VIEIRA, Elverson. criança com a natureza: experiências na ciranda, “ciranda das hortaliças de outono”. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), [S. l.], v. 19, n. 7, p. 545–558, 2024. DOI: 10.34024/revbea.2024.v19.19172.

SOARES, A. H.; et al. Redescobrindo rios: Caminhada da percepção com as escolas. In: XV Encontro Nacional de Águas Urbanas – ENAU, 10, 2024. Recife/PE. p.1-10.

VELHO, Evandro Pereira; QUADRO, Gustavo Henrique Boer Alves de; GREGÓRIO, Nicollas Guilherme; OLIVEIRA, Edi Carlos. MASP – Método de Análise e Solução de Problemas. In: OLIVEIRA, Edi Carlos. Administração: práticas para gestão e inovação nas organizações: Atena Editora, 2025. cap. 4. DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.1472516104.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL E SANEAMENTO ECOLÓGICO: DESENVOLVIMENTO DO JOGO DIDÁTICO CONSTRUA SEU TEVAP PARA O ENSINO FUNDAMENTAL II

1 Sousa, Ana Júnia Maria; 2 Teixeira, Danielly de Oliveira Santos; 3 Silva, Summer Cândido; 4 Paixão, Lucas Marques; e 5 Rossoni, Hygor Aristides Victor[5]

1 Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental (MPSTA) do Instituto Federal Minas Gerais (IFMG)- Campus Bambuí, e-mail: anajuniamaria@yahoo.com.br, 2 MPSTA do IFMG – Campus Bambuí, e-mail: daniellycd@outlook.com,; 4 Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas (IEF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Campus Florestal (CAF), e-mail: pedro.silva21@ufv.br;4 Central de Ensino e de Desenvolvimento Agrário de Florestal (CEDAF), e-mail: lucas.m.paixao@ufv.br; e 5 Professor Orientador do IEF da UFV - CAF e do MPSTA do IFMG – Campus Bambuí, e-mail: rossoni@ufv.br

Palavras-chave: Educação ambiental; Gamificação; Tratamento de águas residuárias.

Resumo

Este estudo desenvolve e avalia material didático em formato de um protótipo de jogo de tabuleiro, intitulado *Construa seu TEvap*, voltado para estudantes do Ensino Fundamental II, com o objetivo de promover a sensibilização ambiental em instituições de ensino, fornecendo recursos pedagógicos que possam ser utilizados por educadores voltados ao tratamento de águas residuárias e ao uso de tecnologias sustentáveis. A proposta parte da necessidade de discutir o saneamento básico em contextos escolares, especialmente em regiões onde a ausência de infraestrutura adequada é uma realidade. A fossa evapotranspiração (TEvap) foi a tecnologia escolhida por seu caráter socialmente apropriado, baixo custo e potencial educativo. A pesquisa possui abordagem quali-quantitativa e caráter descritivo, sendo estruturada a partir de revisão bibliográfica e desenvolvimento do protótipo pedagógico. O protótipo do jogo Construa seu TEvap foi idealizado como instrumento de mediação entre o conhecimento técnico e a realidade dos alunos, permitindo uma vivência prática, lúdica e colaborativa dos conteúdos relacionados à sustentabilidade hídrica. A validação ocorreu por meio de aplicação piloto com 71 participantes durante evento nacional de educação, utilizando instrumento do tipo *survey* para avaliação da usabilidade, compreensão e aceitação do jogo. Os resultados evidenciaram elevado nível de compreensão dos conteúdos abordados (97,2%), além de alta aceitação e engajamento (60,6%) dos participantes. As análises qualitativas indicaram percepção positiva quanto à clareza das regras, relevância temática e potencial de aprofundamento do conteúdo, evidenciada pela recorrência de termos como “ótimo”, “perfeito”, “gostei” e “divertido” na nuvem de palavras. As sugestões obtidas por meio do Discurso do Sujeito Coletivo apontaram potencialidades de aprimoramento, como ampliação do conteúdo, aumento da complexidade progressiva e ajustes nas mecânicas do jogo, com ênfase na redução do fator aleatório e maior valorização do conhecimento. Conclui-se que o jogo apresenta eficácia, mesmo em um teste preliminar, como ferramenta pedagógica, contribuindo para a mediação entre conhecimento técnico e aprendizagem significativa, com potencial de aplicação em contextos educacionais voltados à formação socioambiental crítica.

Introdução

A Educação Ambiental (EA) desempenha um papel fundamental como principal ferramenta para promover a sensibilização e o engajamento dos estudantes em temas relacionados à sustentabilidade hídrica. Nesse contexto, destaca-se também a importância da atuação dos estudantes como multiplicadores do conhecimento, que contribui para o aumento do engajamento familiar e comunitário por meio de ações contínuas de EA (LORDELO et al., 2021). A EA exerce ainda um papel crucial na mediação entre os benefícios técnicos das tecnologias e a percepção pública, contribuindo para superar resistências motivadas pela desinformação (NEPOMUCENO, 2021).

Nesse sentido, o ambiente escolar torna-se especialmente relevante, por permitir a inserção dos estudantes em práticas educativas voltadas à sustentabilidade hídrica, aproximando-os da realidade do saneamento e promovendo uma sensibilização que transcende os limites escolares (LIMA; BARBADO; MORITZ, 2021).

As práticas sustentáveis no tratamento de águas residuárias constituem importantes instrumentos de ensino na EA, especialmente em contextos de vulnerabilidade sanitária (MOURA, 2019). A crescente poluição ambiental e o déficit de saneamento básico em várias regiões do Brasil exigem soluções tecnológicas para o tratamento de águas residuárias. Dados do IBGE (2024) mostram que a precariedade do saneamento é significativamente mais acentuada nas áreas rurais. Esses dados evidenciam que, enquanto 78,0% dos domicílios urbanos possuem acesso à rede geral de esgoto, nas áreas rurais esse percentual cai drasticamente para apenas 9,6%, evidenciando uma profunda desigualdade no acesso à infraestrutura sanitária. Ainda que 88,4% dos domicílios rurais possuam banheiro de uso exclusivo, a maioria não dispõe de sistemas adequados de esgotamento, recorrendo a soluções individuais, muitas vezes inadequadas, como fossas rudimentares ou o lançamento direto no solo, o que potencializa os riscos de contaminação ambiental e à saúde pública.

O material didático atua como mediador entre conhecimento técnico e realidade escolar, favorecendo a compreensão de tecnologias sustentáveis (MAHMOOD et al., 2022).

Nesse contexto, este estudo propõe o desenvolvimento de um material didático, na forma de jogo educativo, voltado a estudantes do Ensino Fundamental II (6º ao 9º ano), com foco na sensibilização ambiental. O jogo foi elaborado com base no Manual Técnico da Fossa Ecológica de Evapotranspiração (TEvap) (Leal e Rossoni, 2024), visando à compreensão de tecnologias sustentáveis de tratamento de águas residuárias. Por meio de abordagem lúdica e contextualizada, busca-se integrar educação, ciência e sustentabilidade, promovendo o protagonismo dos estudantes e a construção do conhecimento. O objetivo do estudo consiste em promover a Educação Ambiental crítica por meio do uso de um jogo didático fundamentado na tecnologia TEvap.

Material e métodos

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa descritiva, com abordagem quali-quantitativa e caráter aplicado, voltada ao desenvolvimento de um jogo didático sobre a tecnologia de evapotranspiração (TEvap) para estudantes do Ensino Fundamental II (6º ao 9º ano). A proposta fundamenta-se em princípios da aprendizagem significativa e do ensino construtivista, buscando integrar conteúdos técnicos de saneamento a abordagens lúdicas.

O público-alvo são estudantes do Ensino Fundamental – Anos Finais (6º ao 9º ano), com idades geralmente entre 11 e 14 anos, faixa etária caracterizada pelo desenvolvimento de habilidades reflexivas, pensamento crítico e atitudes pró-socioambientais, conforme orienta a Base Nacional Comum Curricular (BNCC, 2018). Embora o recurso proposto não envolva tecnologias digitais, sua atratividade para esse público reside na proposta lúdica, colaborativa e interativa do jogo de tabuleiro, que promove o engajamento por meio da participação ativa dos alunos em desafios, tomada de decisões e resolução de problemas contextualizados à realidade ambiental. A construção coletiva do conhecimento, aliada ao aspecto visual e à gamificação, busca tornar o aprendizado envolvente mesmo sem o uso de recursos tecnológicos, valorizando a experiência concreta e a interação social como potentes estratégias pedagógicas.

A Educação Ambiental promove a construção de valores, atitudes e pensamento crítico frente às questões socioambientais, incentivando o protagonismo dos estudantes como agentes multiplicadores do conhecimento em seus contextos (LOPES; ABÍLIO, 2023).

A fase inicial consistiu em revisão bibliográfica realizada nas bases Google Acadêmico, Scielo e Portal CAPES, utilizando descritores relacionados à Educação Ambiental, gamificação e saneamento. A seleção do conteúdo técnico baseou-se no Manual Técnico da Fossa Ecológica de Evapotranspiração (Leal; Rossoni, 2024), em função de sua aplicabilidade e potencial didático.

A escolha da tecnologia TEvap justifica-se por seu caráter de tecnologia social de baixo custo, com aplicação em contextos de vulnerabilidade sanitária, além de favorecer a compreensão integrada de processos físicos, biológicos e ambientais.

O produto desenvolvido consiste em um jogo de tabuleiro intitulado Construa seu TEvap,(Figuras 1(A e B)) estruturado em um percurso composto por casas temáticas com perguntas e situações-problema. A dinâmica foi organizada em turnos sequenciais, nos quais os participantes avançam mediante resolução de desafios, promovendo aprendizagem ativa, tomada de decisão e interação colaborativa. A aplicação do jogo é mediada por um guia com orientações metodológicas ao professor (Figura (C)), garantindo a condução da atividade de forma estruturada e participativa. Assim, esta proposta segue, conforme explanado por Simão e Jardim (2023), que a sala de aula passa a ser um ambiente atraente e desafiador na busca pelo conhecimento, aumentando a participação, a criatividade, a autonomia, o diálogo e o foco na resolução de situações-problema.



(A) **(B)** **(C)**

Figura 1: Estratégias e Delineamento Experimental, em que: (a) Fluxograma do processo do jogo; (b) Jogo de Tabuleiro: Construa o Seu TEvap; e (c) Guia Prático do Professor
Fonte: os autores, 2025.

A opção por um jogo não digital fundamenta-se na promoção da interação social e acessibilidade, especialmente em contextos escolares com infraestrutura limitada, sendo apontado na literatura como recurso eficaz para aprendizagem ativa (NADERI; MOAFIAN, 2023; ORTEGA-SÁNCHEZ; GÓMEZ-TRIGUEROS, 2021).

Barbosa (2022) afirma que a utilização de jogos não digitais proporciona um ambiente de aprendizagem mais interativo e motivador, facilitando a assimilação de conteúdos complexos. O jogo é atraente ao educando por se valer de comportamentos naturais do ser humano, como se socializar, ser competitivo, ser bonificado por um trabalho bem desenvolvido e ter a sensação de conquista (SIMÃO; JARDIM, 2023). Esse tipo de recurso é mais acessível para escolas com infraestrutura limitada, ampliando as possibilidades de adoção e apropriação da proposta pedagógica.

A proposta do protótipo do jogo Construa seu TEvap não se limita à transmissão de conhecimentos técnicos sobre uma tecnologia de saneamento ecológico, mas visa promover uma experiência pedagógica integrada à prática educativa e ao contexto socioambiental dos estudantes. Ao ser utilizado em sala de aula como atividade complementar, o jogo pode ser articulado a projetos interdisciplinares, debates ou atividades de campo, fortalecendo a conexão entre teoria e realidade. A dinâmica do jogo favorece o engajamento dos alunos na identificação de problemas ambientais concretos e na construção de soluções colaborativas, contribuindo para o desenvolvimento de atitudes responsáveis e sustentáveis.

Como complemento à proposta, foi desenvolvido um Guia Prático de apoio ao professor com orientações metodológicas para aplicação do jogo, favorecendo a mediação pedagógica, a interdisciplinaridade e o aprofundamento dos conteúdos. A abordagem utiliza uma tecnologia baseada na natureza como eixo didático, promovendo a contextualização do ensino e a aprendizagem significativa em situações reais. Para facilitar o acesso aos materiais didáticos, o jogo de tabuleiro (Figura 2 (A)) e o guia de apoio ao professor (Figura 2 (B)) podem ser consultados por meio dos QR Codes, além do Manual Técnico Fossa Ecológica de Evapotranspiração (Figura 2(C)).

(A) **(B)** **(C)**

Figura 2 – QR Codes para acesso: (A) Jogo de Tabuleiro; (B) Guia Prático e (C) Manual Técnico TEvap.
Fonte: os autores, 2025.

A avaliação de recursos lúdicos no contexto educacional exige instrumentos capazes de captar tanto a eficiência técnica quanto a percepção do usuário (Prensky, 2001). Diante disso, a presente pesquisa caracterizou-se como um estudo de natureza descritiva e exploratória, adotando uma abordagem quali-quantitativa (Minayo, 2012). Trata-se de um estudo preliminar, cuja aplicação pode ser ampliada para diferentes faixas etárias além do público-alvo inicialmente proposto. Para a coleta de dados, optou-se pela aplicação de um questionário do tipo *survey*. Segundo Babbie (2001), o *survey* é um método de pesquisa adequado para a coleta de dados originais de uma população muito grande para ser observada diretamente, permitindo a padronização das respostas. O instrumento foi composto por perguntas fechadas de múltipla escolha, visando a obtenção de dados objetivos sobre a usabilidade, e por uma questão aberta, na qual os participantes foram estimulados a registrar sugestões de melhorias (Figura 3).

Nome completo:

E-mail:

Sexo: ( ) Feminino; ( ) Masculino; (.....) Não quero informar ( ) Outro

Cidade de origem:

Idade:

Nível de Escolaridade:

1) Para você, qual é o nível de dificuldade apresentado nas instruções do jogo?

( ) Muito difícil; ( ) Relativamente difícil; ( ) Nem fácil nem difícil; ( ) Relativamente fácil;
( ) Muito fácil

2) Por meio do jogo de tabuleiro, é possível compreender a tecnologia alternativa de tratamento de águas residuárias provenientes do vaso sanitário (TEvap)

( ) discordo totalmente; ( ) discordo; ( ) indiferente (ou neutro); ( ) concordo;
( ) concordo totalmente.

3) Aponte ou descreva alguma(s) sugestão(es) de melhorias no jogo:

Figura 3: Questionário avaliativo aplicado no pré-teste para análise da usabilidade do jogo de tabuleiro.
Fonte: os autores, 2025.

A avaliação do protótipo ocorreu por meio de aplicação piloto durante a 5ª Semana Nacional de Educação Profissional e Tecnológica (SNEPT), realizada em Brasília (DF), com participação de 71 indivíduos, entre os dias 07 e 09 de outubro de 2025.

A amostra caracterizou-se por sua heterogeneidade, englobando participantes de diferentes faixas etárias e níveis de escolaridade, o que, conforme Gil (2008), enriquece a validade externa do estudo ao mitigar vieses de um público restrito a um único perfil sociodemográfico.

A coleta de dados foi realizada por meio de questionário do tipo *survey*, composto por questões fechadas e uma questão aberta, visando avaliar usabilidade, compreensão e percepção dos participantes. Os dados quantitativos foram analisados por estatística descritiva, com cálculo de frequências e percentuais. Os dados qualitativos foram interpretados por meio da Análise de Conteúdo (Bardin, 2011) e da técnica do Discurso do Sujeito Coletivo (Lefèvre; Lefèvre, 2009).

Resultados e Discussão

A estruturação do jogo Construa seu TEvap foi baseada em um processo de transposição didática, no qual os elementos técnico-operacionais da tecnologia de evapotranspiração (TEvap) foram reorganizados em uma lógica pedagógica progressiva e interativa, possibilitando a transformação de um conteúdo técnico em uma experiência de aprendizagem acessível e contextualizada ao Ensino Fundamental II.

O Quadro 1 demonstra que o jogo atua como um dispositivo pedagógico estruturado, no qual cada fase mobiliza competências cognitivas e promove a articulação entre teoria e prática. As etapas iniciais envolvem habilidades mais concretas, enquanto as fases posteriores exigem maior complexidade cognitiva, incluindo análise de variáveis ambientais e compreensão de processos ecológicos.

Esse encadeamento progressivo está alinhado à aprendizagem significativa, ao permitir a construção gradual do conhecimento, partindo de conceitos concretos para sistemas mais complexos, como filtração e evapotranspiração (Plass; Homer; Kinzer, 2020).

Destaca-se ainda a inserção de elementos de tomada de decisão, especialmente na escolha de materiais construtivos, estimulando a análise de condições locais e aproximando o processo de aprendizagem da realidade das tecnologias sociais de saneamento.

A etapa final, relacionada ao plantio das espécies vegetais, contribui para a compreensão da TEvap como sistema ecológico integrado, favorecendo a assimilação de conceitos como ciclagem de nutrientes e interação solo–água–planta. Nesse sentido, práticas educativas que integram componentes ecológicos e tecnológicos tendem a apresentar maior potencial formativo, ao conectar conhecimento científico à realidade socioambiental dos estudantes (Ardoin; Bowers; Gaillard, 2020).

Os resultados indicam que o jogo Construa seu TEvap apresenta consistência pedagógica ao articular conteúdos técnico-científicos com estratégias lúdicas, demonstrando potencial como ferramenta para a promoção da Educação Ambiental crítica e para o desenvolvimento de competências socioambientais.

Fase do jogo	Correspondência técnico-operacional	Competência mobilizada	Eixo de aprendizagem ambiental
Escavação do solo	Dimensionamento e abertura do tanque	Raciocínio espacial e volumétrico	Planejamento ambiental e uso do solo
Escolha do tipo de solo	Diagnóstico geotécnico inicial	Pensamento analítico e interpretação de variáveis físicas	Relação solo–água e permeabilidade
Seleção de materiais	Definição tecnológica (ferrocimento ou alvenaria)	Tomada de decisão contextualizada	Adequação tecnológica e sustentabilidade local
Montagem da base filtrante	Estruturação com pneus e materiais drenantes	Compreensão sistêmica	Processos físicos de filtração e retenção
Instalação hidráulica	Sistema de entrada e vedação	Raciocínio técnico-funcional	Controle sanitário e prevenção de contaminação
Implantação da vegetação	Etapa de evapotranspiração	Integração ecológica	Interação planta–água–nutrientes e ciclagem biogeoquímica

Quadro 1: Correlação entre etapas do jogo e fases construtivas do TEvap.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A amostra apresentou leve predominância do público feminino (53,5%), indicando distribuição equilibrada e ausência de polarização significativa de gênero, o que contribui para a representatividade dos dados (Gil, 2008; Marconi; Lakatos, 2003). Essa prática alinha-se diretamente aos princípios éticos norteadores da pesquisa com seres humanos, os quais preconizam a autonomia, a não maleficência e o resguardo absoluto da identidade e das escolhas dos respondentes (Flick, 2013). Ademais, indicam que a maioria dos participantes (60,5%) concentra-se na faixa etária de 15 a 24 anos, perfil compatível com o público predominante do evento de aplicação. O elevado engajamento de participantes entre 15 e 24 anos corrobora a literatura sobre a atratividade de metodologias baseadas em jogos para esse público (Prensky, 2001; Mattar, 2010). Observou-se também participação de adultos (31%), indicando potencial de aplicação do jogo em diferentes públicos. Do ponto de vista da validação

da ferramenta pedagógica, esse perfil etário é extremamente vantajoso. Ele comprova que a avaliação de usabilidade e o engajamento foram medidos diretamente junto aos seus principais usuários finais, um preceito fundamental no desenvolvimento de recursos tecnológicos educacionais centrados no usuário (Nielsen, 1993; Tarouco et al., 2014).

Ao mesmo tempo, a participação de adultos atesta o caráter inclusivo do recurso, mostrando que sua interface é compreensível para além do público estritamente jovem. Por fim, o percentual residual de abstenção (4,2% não informaram a idade) reforça a lisura da coleta de dados, preservando o direito à não declaração dos respondentes, em consonância com as diretrizes éticas de pesquisa com seres humanos (Brasil, 2016; Flick, 2013).

A distribuição geográfica evidencia concentração de participantes no Distrito Federal (50,7%), em função do local de aplicação, além da presença de representantes de todas as regiões do país, o que confere caráter nacional à amostra e amplia a validade das análises. Esse fenômeno está alinhado ao conceito de amostragem por conveniência e acessibilidade espacial, na qual o pesquisador seleciona os elementos a que tem acesso no contexto de aplicação (Gil, 2008; Creswell, 2010). Apesar dessa concentração local, o dado mais relevante para a pesquisa é a confirmação do caráter nacional da amostra. O estande logrou êxito em captar avaliadores/participantes de todas as cinco macrorregiões do Brasil: Norte (5,63%), Nordeste (5,63%), Centro-Oeste (57,75%), Sudeste (23,94%) e Sul (1,41%). Para a validação de uma tecnologia educacional, essa capilaridade é um ativo metodológico valioso. A presença de participantes de diferentes regiões reforça a avaliação do recurso em múltiplos contextos socioculturais, ampliando a validade das análises (Moran, 2015; Valente, 1999).

A análise da escolaridade indica concentração de participantes com Ensino Médio (52,1%) e Ensino Superior (33,8%), totalizando aproximadamente 86% da amostra. Esse perfil é compatível com o contexto de aplicação e reforça a adequação da avaliação junto ao público-alvo, conforme princípios do Design Centrado no Usuário (Nielsen, 1993; Tarouco et al., 2014).

Os dados (Figura 4) indicam alta acessibilidade do jogo Construa seu TEvap, conforme percepção dos 71 participantes quanto à sua curva de dificuldade.

Nível de Dificuldade	Frequência
Muito difícil	0
Relativamente difícil	3
Nem fácil nem difícil	25
Relativamente fácil	20
Muito fácil	23
Total	**71**

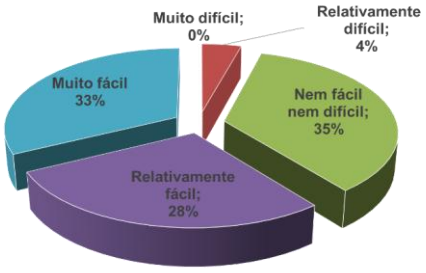


Figura 4: Pergunta: "Para você, qual é o nível de dificuldade apresentado nas instruções do jogo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados indicam predominância de percepções de baixa a moderada complexidade, com 60,6% dos participantes classificando o jogo como fácil e 35,2% como de dificuldade intermediária. Destaca-se a ausência de avaliações como "muito difícil" (0%), evidenciando elevada acessibilidade da proposta. Sob a perspectiva do Design de Jogos Educacionais, os resultados indicam baixa carga cognitiva extrínseca, evidenciada pela percepção de facilidade e intuitividade das regras e mecânicas do jogo, favorecendo o direcionamento do esforço cognitivo ao conteúdo pedagógico (Sweller, 1988; Gee, 2003; Prensky, 2001). A distribuição das respostas também se alinha à Teoria do Fluxo (Csikszentmihalyi, 1990), indicando equilíbrio entre desafio e habilidade, evidenciado pela concentração de respostas na categoria de dificuldade intermediária, o que favorece o engajamento e a continuidade da atividade (Kapp, 2012).

A avaliação do nível de compreensão das regras e conceitos do jogo Construa seu TEvap indicou elevada eficácia comunicativa e pedagógica entre os 71 participantes (Figura 5).

Nível de Compreensão	Frequência
Discordo Totalmente	0
Discordo	0
Indiferente (ou Neutro)	2
Concordo	32
Concordo Totalmente	37
Total	**71**

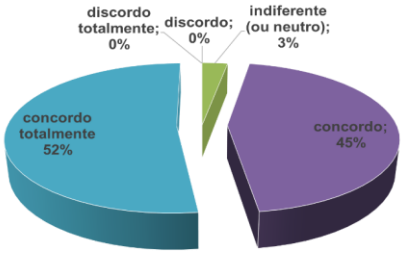


Figura 5: Pergunta: Por meio do jogo de tabuleiro, é possível compreender a tecnologia alternativa de tratamento de águas residuárias provenientes do vaso sanitário (TEvap)?
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados indicam elevado nível de compreensão, com 97,2% dos participantes concordando com a clareza do jogo e ausência de respostas nas categorias de discordância (0%). Esse resultado evidencia a eficácia da transposição didática e a adequação da linguagem e das mecânicas ao público-alvo, conforme princípios da aprendizagem baseada em jogos (Gee, 2003).

A ausência de incompreensão reforça a usabilidade pedagógica do jogo, indicando que a interface e as mecânicas favorecem o foco no conteúdo, em consonância com princípios de design e carga cognitiva (Nielsen, 1993; Sweller, 1988; Tarouco et al., 2014). O percentual residual de respostas neutras (2,8%) não compromete a validade dos resultados.

As respostas abertas, da pergunta aberta: aponte ou descreva alguma(s) sugestão (es) de melhoria(s) no jogo, foram analisadas por meio de mineração de texto, com síntese em nuvem de palavras (Quadro 2). Como pode ser observado (Quadro 2 (A)), os termos mais frequentes “ótimo”, “perfeito”, “gostei” e “divertido” indicam percepção amplamente positiva do jogo, corroborando os resultados quantitativos de usabilidade e compreensão. Esse padrão reforça a relevância do engajamento afetivo na aprendizagem baseada em jogos (Prensky, 2001; Mattar, 2010). As sugestões de melhoria evidenciam demanda por ampliação da experiência, com termos como “mais perguntas” e “mais longo”, indicando desejo de prolongamento do engajamento, em consonância com a Teoria do Fluxo (Csikszentmihalyi, 1990). Esse comportamento sugere que, ao atingir equilíbrio entre desafio e habilidade, os participantes tendem a buscar maior imersão na atividade. Também emergem apontamentos relacionados à mecânica do jogo, como “menos sorte” e “mais ensino”, indicando preferência por progressão baseada em mérito e conhecimento, em detrimento de fatores aleatórios, aspecto central no design de jogos significativos (Salen; Zimmerman, 2004).

A análise qualitativa (Quadro 2(B)) por meio do Discurso do Sujeito Coletivo (DSC) (Lefèvre; Lefèvre, 2005) evidenciou elevada aceitação do recurso, associada ao engajamento afetivo, fator reconhecido como catalisador da aprendizagem em jogos educacionais (Prensky, 2001). Além disso, as sugestões indicam potencial de aprimoramento por meio da ampliação da complexidade progressiva e do uso de recursos visuais, alinhando-se aos princípios de scaffolding e à Zona de Desenvolvimento Proximal (Vygotsky, 1998), bem como à Teoria da Aprendizagem Multimídia (Mayer, 2001).

(A)	(B)
	**1.** Ideia Central (IC): **O jogo está ótimo e cumpre seu propósito?** O jogo é considerado ótimo, claro e adequado, sem necessidade de alterações. **2.** Ideia Central (IC): **Sugestão de expandir o jogo e aprofundar o conteúdo** Sugere-se ampliar o tabuleiro e incluir mais perguntas para aprofundar o conteúdo. **3.** Ideia Central (IC): **Sugestão de alterar a mecânica das perguntas** Recomenda-se diversificar as perguntas e utilizar cartas ou novos formatos. **4.** Ideia Central (IC): **Sugestão de adicionar novas dinâmicas, regras e níveis** Propõe-se reduzir o fator sorte e incluir mecânicas baseadas em acertos. **5.** Ideia Central (IC): **Replicar e divulgar o método** Sugere-se incluir conteúdos mais complexos, imagens e aprofundamento técnico.

Quadro 2: Resposta da pergunta: “Aponte ou descreva alguma(s) sugestão(es) de melhorias no jogo”, em que: (a) nuvem de palavras e (b) Ideia Central (IC) e síntese do Discurso do Sujeito Coletivo (DSC).
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A nuvem de palavras indica forte predominância de avaliações positivas, associadas à demanda por ampliação do jogo, especialmente em relação ao número de perguntas e ao aprofundamento do conteúdo.

Considerações finais

Os resultados evidenciam que a limitada democratização das políticas de saneamento reforça a necessidade de estratégias educativas inovadoras voltadas à transformação dos territórios. Nesse contexto, o jogo Construa seu TEvap demonstrou eficácia, mesmo em caráter preliminar, como ferramenta pedagógica, ao traduzir conceitos técnico-científicos em linguagem acessível e interativa. A avaliação empírica realizada com 71 participantes indicou elevados níveis de compreensão (97,2%) e adequada acessibilidade do jogo, evidenciando a efetividade da proposta na mediação entre conhecimento técnico e aprendizagem significativa. O elevado engajamento e as sugestões de aprimoramento reforçam a aceitação do recurso e seu potencial de evolução a diferentes contextos educacionais.

Embora os efeitos pedagógicos em ambiente escolar ainda sejam prospectivos, o jogo apresenta consistência metodológica e aderência às diretrizes educacionais contemporâneas, configurando-se como uma tecnologia educacional com potencial de replicação em contextos marcados por vulnerabilidades socioambientais.

Com base nos resultados promissores, a próxima fase da pesquisa consistirá na validação do jogo em ambiente escolar e controlado. Esse processo será conduzido sob protocolos rigorosos, previamente aprovados pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos. O objetivo é consolidar a eficácia pedagógica da ferramenta e garantir a segurança metodológica na coleta de dados com os estudantes.

Por fim, alinhado à Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e ao ODS 4.7 da Agenda 2030, o estudo reforça o papel de abordagens educativas baseadas em pesquisa e desenvolvimento (P&D) na promoção da Educação Ambiental crítica, contribuindo para a formação de sujeitos capazes de compreender e intervir de forma sustentável em sua realidade.

Referências Bibliográficas

Agência IBGE Notícias, 2023. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39237-censo-2022-rede-de-esgoto-alcanca-62-5-da-populacao-mas-desigualdades-regionais-e-por-cor-e-raca-persistem. Acesso em: 21 abr. 2025.

BABBIE, E. Métodos de pesquisas de survey. Tradução de Guilherme Cezarino. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2001.

BARBOSA, Cristina dos Santos Silva. Ensino de inglês por meio da utilização de jogos não digitais: uma proposta de sequência didática. 2022. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Letras) – Universidade Estadual da Paraíba, Guarabira, 2022. Disponível em: http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/123456789/27381. Acesso em: 5 maio 2025.

BARDIN, L. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2011.

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: MEC, 2018. Disponível em: https://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acesso em: 05 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Conselho Nacional de Saúde. Resolução nº 510, de 7 de abril de 2016. Dispõe sobre as normas aplicáveis a pesquisas em Ciências Humanas e Sociais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 maio 2016.

CRESWELL, J. W. Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

CSIKSZENTMIHALYI, M. Flow: the psychology of optimal experience. New York: Harper & Row, 1990.

FLICK, U. Introdução à metodologia de pesquisa: um guia para iniciantes. Porto Alegre: Penso, 2013.

GEE, J. P. What video games have to teach us about learning and literacy. New York: Palgrave Macmillan, 2003.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Agência IBGE Notícias, 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/42292-em-2023-um-em-cada-tres-domicilios-rurais-era-abastecido-por-rede-geral-de-agua. Acesso em: 02 maio 2026.

KAPP, K. M. The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education. San Francisco: Pfeiffer, 2012.

LEAL, Jane Terezinha da Costa Pereira; ROSSONI, Hygor Aristides Victor. Manual técnico fossa ecológica de evapotranspiração. Belo Horizonte: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, Curso Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, 2024. 60 p.: il.; color.

LEFÈVRE, F.; LEFÈVRE, A. M. C. O Discurso do Sujeito Coletivo: um novo enfoque em pesquisa qualitativa (desdobramentos). Caxias do Sul: Educs, 2005.

LIMA, D. T. da S. de; BARBADO, N.; MORITZ, J. (2021). Educação Ambiental a partir do conhecimento dos estudantes sobre Estação de Tratamento de Esgoto por Zona de Raízes. Research, Society and Development, 10(7), e15710716261, 2021.

LOPES, T. D. S., & Abílio, F. J. P. (2023). Pressupostos críticos de uma educação ambiental para emancipação. Educação, 48(1), e43/1–30. Disponível em: https://doi.org/10.5902/1984644465852. Acesso em: 05 maio 2025.

LORDELO, L. M. K.; AMARAL, J. S.; OLIVEIRA, V. V. G.; CARVALHO, D. T. de; LIU, Y. U. Y. (2021). Impacto da Educação Ambiental na redução do consumo de água e gerenciamento dos resíduos sólidos em dois colégios da rede estadual de Cruz das Almas-BA. Revista Extensão e Cultura da UFRB, ed. 24, v. 01, nov. 2023.

MAHMOOD, Tahira et al. Tecnologias para remoção de contaminantes emergentes de águas residuais. In: Tratamento de águas residuais. IntechOpen, 2022.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MATTAR, J. Games em educação: como os nativos digitais aprendem. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MAYER, R. E. Multimedia learning. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

MINAYO, M. C. S. (org.). Pesquisa social: teoria, método e criatividade. 28. ed. Petrópolis: Vozes, 2012.

MORAN, J. M. Educação híbrida: um conceito-chave para a educação, hoje. In: BACICH, L.; TANZI NETO, A.; TREVISANI, F. (org.). Ensino híbrido: personalização e tecnologia na educação. Porto Alegre: Penso, 2015.

MOURA, S. S. C. de. Caminhos sustentáveis para o tratamento de águas residuais no contexto escolar: proposta implantada no Centro Educacional Myriam Ervilha - DF. Dissertação (Mestrado - Mestrado Profissional em Ensino de Biologia), Universidade de Brasília, 2019. 74 p.

NADERI, Samaneh; MOAFIAN, Fatemeh. The victory of a non-digital game over a digital one in vocabulary learning. Computers and Education Open, v. 4, p. 100135, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.caeo.2023.100135. Acesso em: 06 maio 2025.

NEPOMUCENO, D. C. F. Reúso de águas residuárias tratadas: inovação tecnológica e aceitabilidade social. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, 2021. 194 f.

NIELSEN, J. Usability engineering. Boston: Academic Press, 1993.

PRENSKY, M. Digital game-based learning. New York: McGraw-Hill, 2001.

SALEN, K.; ZIMMERMAN, E. Regras do jogo: fundamentos do design de jogos. São Paulo: Blucher, 2012.

SIMÃO, Crisley Helena; DE AFFONSECA JARDIM, Maria Inês. Motivação no processo de aprendizagem e sua relação com atividades gamificadas – uma análise epistemológica. EccoS – Revista Científica, n. 65, p. e23660, 2023. Disponível em: https://periodicos.uninove.br/eccos/article/view/23660. Acesso em: 5 maio 2025.

SWELLER, J. Cognitive load during problem solving: effects on learning. Cognitive Science, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 257-285, 1988.

TAROUCO, L. M. R. et al. Objetos de aprendizagem: teoria e prática. Porto Alegre: Evangraf, 2014.

VALENTE, J. A. (org.). O computador na sociedade do conhecimento. Campinas: Unicamp/NIED, 1999.

VYGOTSKY, L. S. A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores. 6. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

O USO DO FOLCLORE NA EDUCAÇÃO AMBIENTAL: UMA EXPERIÊNCIA COM O SACI-PERERÊ NO ESCOTISMO

1Ana Carolina Costa Moreira, 2 Dayane Teixeira Correia dos Santos, 3Manuela Gonçalves de Oliveira, 4Maria Luiza Perdigão Lobato, 5Rubiane Ganascim Marques, 6Maraísa Lopes de Menezes

1 UTFPR, e-mail: cmoreiraanacarolina@gmail.com; 2UTFPR, e-mail:dayaneteixeira@alunos.utfpr.edu.br; 3UTFPR e-mail: manuelaoliveira@alunos.utfpr.edu.br; 4 UTFPR, e-mail: maria.160704@alunos.utfpr.edu.br; 5 UTFPR, e-mail: rubianemarques@utfpr.edu.br; 6 UTFPR, e-mail: maraisal@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Escotismo; educação ambiental; Folclore brasileiro

Resumo

Este trabalho apresenta a concepção e aplicação de uma oficina de educação socioambiental desenvolvida no contexto do escotismo, durante a Atividade Regional do Ramo Lobinho (ARL) de 2024, realizada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Apucarana. A proposta teve como objetivo integrar educação ambiental e cultura popular por meio do uso do Saci-Pererê como elemento pedagógico, promovendo a conscientização ambiental de forma lúdica para crianças entre 6 e 10 anos. A oficina foi estruturada em três etapas principais, com duração total de 30 minutos: (i) confecção de um bilboquê utilizando materiais recicláveis, associado à produção de um origami do Saci; (ii) interação com jogos educativos confeccionados a partir de materiais reutilizados; e (iii) realização de uma atividade denominada "Caça ao Saci". A preparação ocorreu previamente, com coleta de materiais recicláveis e construção dos recursos didáticos, visando otimizar o tempo de execução e garantir a segurança das crianças. A escolha das atividades foi fundamentada em seus benefícios ao desenvolvimento cognitivo e motor, além de possibilitar a abordagem de conceitos como reutilização de materiais e preservação ambiental. Durante a aplicação, observou-se elevado engajamento dos participantes, especialmente na etapa de contação de histórias e na caça ao Saci, que estimulou a cooperação e o trabalho em equipe. As atividades favoreceram o desenvolvimento da coordenação motora fina, da criatividade e da socialização, além de promover reflexões sobre sustentabilidade e consumo consciente. Situações espontâneas, como a criação do "Saci de ouro", evidenciaram o potencial criativo das crianças e a capacidade de ressignificação lúdica. A oficina foi aplicada diversas vezes ao longo do evento, atendendo aproximadamente 180 crianças de diferentes municípios da região. Como resultado, constatou-se que a integração entre elementos culturais e práticas educativas contribui significativamente para o aprendizado significativo, tornando a educação ambiental mais acessível e atrativa. Assim, iniciativas que articulam ludicidade, cultura e sustentabilidade mostram-se eficazes na formação de valores socioambientais desde a infância, especialmente em contextos de educação não formal.

Introdução

A Educação Ambiental consolidou-se ao longo do século XX como uma área fundamental diante dos crescentes impactos sofridos pelo meio ambiente e pelos seres vivos. Nesse contexto, sua relevância tem se intensificado progressivamente. Além disso, tanto nos espaços formais quanto não formais de ensino, a Educação Ambiental vem ampliando seu alcance, promovendo a conscientização e incentivando práticas mais sustentáveis na sociedade (SANTOS E SILVA, 2021; SILVA E LORENZETTI, 2019). Os ambientes não formais de educação são espaços como museus, parques, ONGs, igrejas. Entre os ambientes não formais de educação, tem-se os grupos escoteiros.

Criado em 1907 pelo inglês Robert Baden-Powell (ESCOTEIROS DO BRASIL, 2025b), o Movimento Escoteiro tem como finalidade auxiliar jovens em seu desenvolvimento em diversos âmbitos, tanto individuais quanto coletivos, como intelectuais, sociais e emocionais (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DO MOVIMENTO ESCOTEIRO, 2019). O movimento escoteiro no Brasil, caracteriza-se como local de educação não formal (BRASIL, 1946), têm entre seus objetivos proporcionar atividades com cunho educativo, cultural e ambiental. Entre essas atividades tem-se o ARL- Atividade Regional do Ramo Lobinho no estado do Paraná, o qual tem como propósito unir a aprendizagem ao lúdico visando o autodesenvolvimento de crianças entre 6,5 a 10 anos, nas quais fazem parte do ramo escotista Lobinho (ESCOTEIROS DO BRASIL, 2025c).

Em 2024 o evento teve como tema: "Aventuras pelas histórias do Brasil", na qual permite que as crianças tenham um maior contato com a cultura brasileira a partir das histórias do folclore (ESCOTEIROS DO BRASIL – REGIÃO DO PARANÁ, 2025). Esta atividade além de incentivar o desenvolvimento pessoal e o contato com a cultura nacional, atua com valores relacionados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e agenda 2030, estimulando nas crianças a conscientização sobre a sustentabilidade e o respeito ao meio ambiente desde a infância (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2025).

A relação entre os personagens do folclore e a preservação ambiental se fundamenta na representação desses seres como guardiões dos ecossistemas, funcionando como uma ponte entre o imaginário cultural e a consciência ecológica (SILVA E ASSUNÇÃO, 2022). Entidades como o Curupira, conhecido como o "vigilante das matas", exemplificam esse papel ao proteger as florestas contra a exploração excessiva, punindo caçadores e aqueles que desmatam de forma irresponsável. De maneira semelhante, o Caboclo d'Água atua como defensor simbólico do Rio São Francisco (BRANDÃO et. al, 2015). Esses personagens também são utilizados na educação ambiental para personificar problemas e soluções, como desmatamento, queimadas e poluição, aparecendo em jogos e atividades lúdicas como aliados na restauração do equilíbrio ecológico.

O Saci-Pererê destaca-se como uma das figuras mais versáteis do folclore brasileiro quando aplicado à educação ambiental, especialmente no contexto da Educação Infantil. Sua presença em atividades pedagógicas ocorre de forma lúdica e envolvente, sendo frequentemente utilizado em práticas como pintura, desenho, colagem, dramatização e musicalização. Além disso, o personagem também aparece em jogos educativos, como no RPG "Pindorama", no qual assume o papel de aliado do protagonista, concedendo poderes e habilidades ancestrais para enfrentar ameaças que simbolizam problemas ambientais, como o desmatamento e as queimadas (CORDEIRO et al, 2025). Mais do que um personagem travesso, o Saci-Pererê atua como uma importante ferramenta de sensibilização ambiental. Ele contribui para transformar questões ecológicas complexas em narrativas acessíveis às crianças, facilitando a compreensão e estimulando a reflexão sobre o impacto das ações humanas na natureza. Quando trabalhado de forma contextualizada e interdisciplinar, o Saci se torna um elo pedagógico poderoso, capaz de promover o desenvolvimento do senso de responsabilidade e incentivar atitudes voltadas à preservação ambiental, trabalhando cultura, imaginação e educação em um mesmo processo formativo.

Este trabalho tem como objetivo discutir o processo de criação e aplicação de uma oficina que trabalhe a preservação ambiental, utilizando o folclore nacional como ferramenta auxiliar na educação ambiental. No presente trabalho foi utlizada a figura emblemática do folclore brasileiro: o Saci-Pererê, lenda originária por volta do século XIX por povos guarani na qual retrata um menininho negro de uma perna e com um gorro vermelho que gosta de pregar peças (COTRIM, J., 2023). O Saci-Pererê, além de ser um símbolo do folclore nacional, tem uma forte ligação à natureza, assim como o escotismo. As atividades foram pensadas para ensinar os escoteiros através de histórias, jogos e brincadeiras inspirados no menininho de uma perna só sobre a importância da preservação ambiental e da cultura popular.

Metodologia

No presente trabalho aborda a oficina intitulada Bilboquê do Saci Pererê, ofertada no ARL de 2024 a qual aconteceu na UTFPR de Apucarana-PR. O desenvolvimento da oficina ocorreu em etapas as quais estão apresentadas na Figura 1.

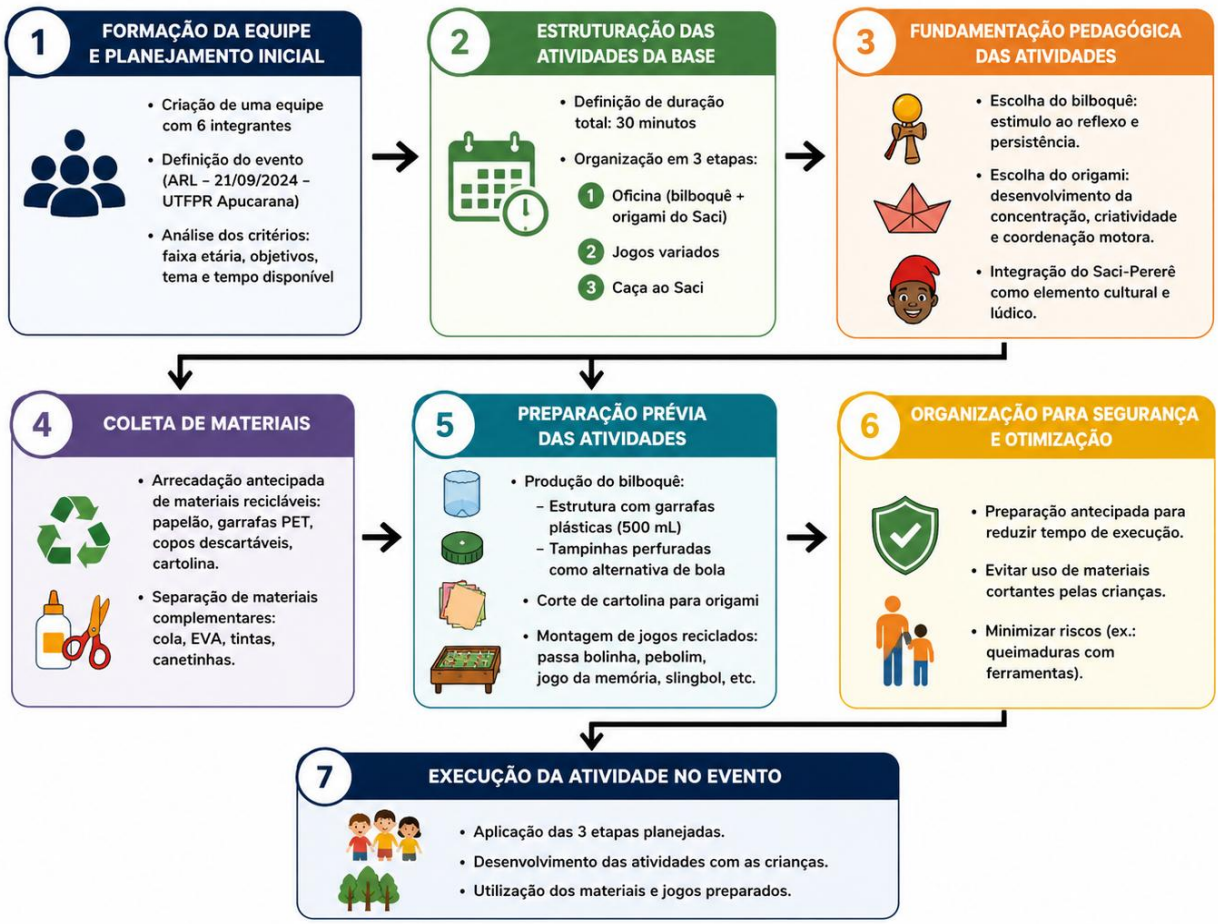


Figura 1. Desenvolvimento da oficina aplicada no ARL.
Fonte: Elaborada por meio da IA ChatGPT, 2026

Para o desenvolvimento das atividades foi levado em consideração a faixa etária das crianças, os objetivos, o tema do evento e o tempo disponível para aplicação. Tendo isso em mente, foi programado três atividades para a oficina, sendo elas, uma oficina de criação de um bilboquê com um origami de saci, brincadeira com jogos variados e um caça ao saci, com tempo de duração de trinta minutos. Os preparativos da oficina iniciaram cerca de três meses antes de sua execução. Para a construção

da oficina, foi constituída uma equipe de seis pessoas, as quais ficaram responsáveis pelo preparo prévio do material a ser utilizado na oficina. O público alvo da oficina foi composto de crianças entre 6 e 10 anos, no evento ARL promovido pela UEB-PR. Participaram em torno de 180 crianças das que vieram das cidades de Apucarana, Arapongas, Cambé, Rolândia, Londrina, Maringá, Paranavaí, Jandaia do Sul e Ibaiti.

Resultados e Discussões

A seleção do bilboquê e do origami como atividades principais para esta oficina foi pensada levando em consideração seus benefícios comprovados no desenvolvimento das crianças, tanto no aspecto cognitivo quanto motor. O bilboquê, enquanto brinquedo tradicional, estimula o reflexo e a persistência (MILITÃO, B.; LIMA, V., 2021). Paralelamente, o origami, arte milenar de dobraduras de papel, favorece a concentração e a criatividade, além de exercitar a paciência e a capacidade de seguir instruções sequenciais (SILVA, A. A. et al., 2010). Ambas as atividades, ao mesmo tempo, são ótimas para o desenvolvimento da coordenação motora fina. Além disso, a temática do Saci-Pererê integrada às atividades serviu como conexão entre o lúdico/cultural e a educação ambiental, reforçando a identidade coletiva e o resgate de narrativas folclóricas.

Meses antes ao dia da execução, foi obtido materiais recicláveis por exemplo papelão, garrafas plásticas, copos descartáveis, cartolina e etc, além de outros itens como colas, EVA, tintas e canetinhas, com finalidade de serem utilizados insumos para a criação de decoração e preparação das atividades.

Durantes algumas semanas, a equipe manteve foco em preparar os componentes da oficina, por exemplo, o apoio do bilboquê, no qual foi produzido com a parte superior de garrafas plásticas de 500 mL, além disso foram utilizadas, como opção alternativa a bola do bilboquê, tampinhas com um furo central feitas com auxílio de uma solda. Além do mais, recortes de cartolina em formato de quadrado foram preparados para o uso no origami no dia do evento.

O objetivo de uma montagem prévia se deu pela otimização do tempo da oficina juntamente com a prevenção de acidentes que poderiam ser ocasionados nas crianças devido ao uso de materiais cortantes e equipamentos com potencial risco de queimaduras. Paralelamente, o grupo de trabalho montou diversos jogos de materiais reciclados adaptados, por exemplo, passa bolinha, pebolim, jogo da memória, slingbol e entre outros, assim como mostrado na Figura 2.

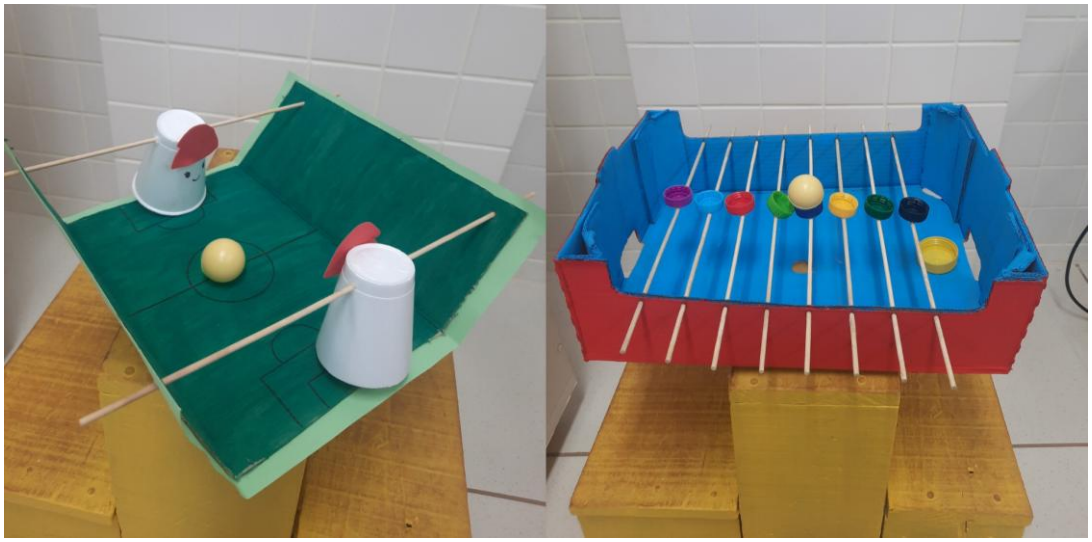


Figura 2: Pebolim e passa bolinha de materiais recicláveis.
Fonte: Autoria Própria (2025).

A criação de várias brincadeiras visou entreter as crianças à medida que elas finalizassem a oficina do bilboquê (Figura 5) e do origami. E destinada a etapa do caça ao saci, foram impressas e colocadas pequenas figuras do menino em cápsulas microtubo como forma de representar o saci preso dentro da garrafa, conforme pode ser observado na Figura 3.

.



Figura 3. Microtubo com saci inserido utilizado na Caça ao Saci.
Fonte: Autoria própria,2024

Na véspera do evento, o grupo preparou um ambiente temático para a base, na qual foi instalada em uma das salas de aula da UTFPR. O enfeitamento foi feito com bexigas pretas e vermelhas por todo ambiente e também foi colocado painel com um desenho do saci feito em papelão, e outro no quadro feito com EVA. Além disso, realizou-se no quadro um tutorial para o origami para auxiliar as crianças que tivessem uma certa dificuldade, assim como esquematizado na Figura 3.

Finalizando a organização, foram realizados arranjos com 5 ou 6 mesas para os grupos de escoteiros ficarem durante a oficina e foram colocados os materiais que seriam utilizados como a base do bilboquê, tampinhas, barbante, papel de origami, lápis e giz de cera para pintura. O desenvolvimento da decoração e dos jogos ocorreu com sucesso, contando com uma boa variedade de atividades como pebolim, passa-bolinha e shisima, o que garantiu o interesse e envolvimento das crianças. Para o início da oficina, as crianças foram organizadas em grupos de cinco a seis participantes, a fim de facilitar a condução das atividades. Inicialmente, foi realizada uma contação de história sobre a lenda do Saci-Pererê, adaptada à faixa etária do público com enfoque na proteção ambiental. Esse momento despertou o interesse dos participantes e gerou questionamentos diversos: enquanto algumas crianças já conheciam a lenda, outras demonstraram ceticismo ou curiosidade, o que proporcionou um ambiente rico para o compartilhamento de saberes, estímulo ao pensamento crítico e valorização da cultura popular. Foi instigado o papel do Saci como protetor das matas, e que o Saci como amigo do meio ambiente, sempre zelava pelas questões ambientais, e foi colocado em discussão a questão da reciclagem e reutilização de materiais.

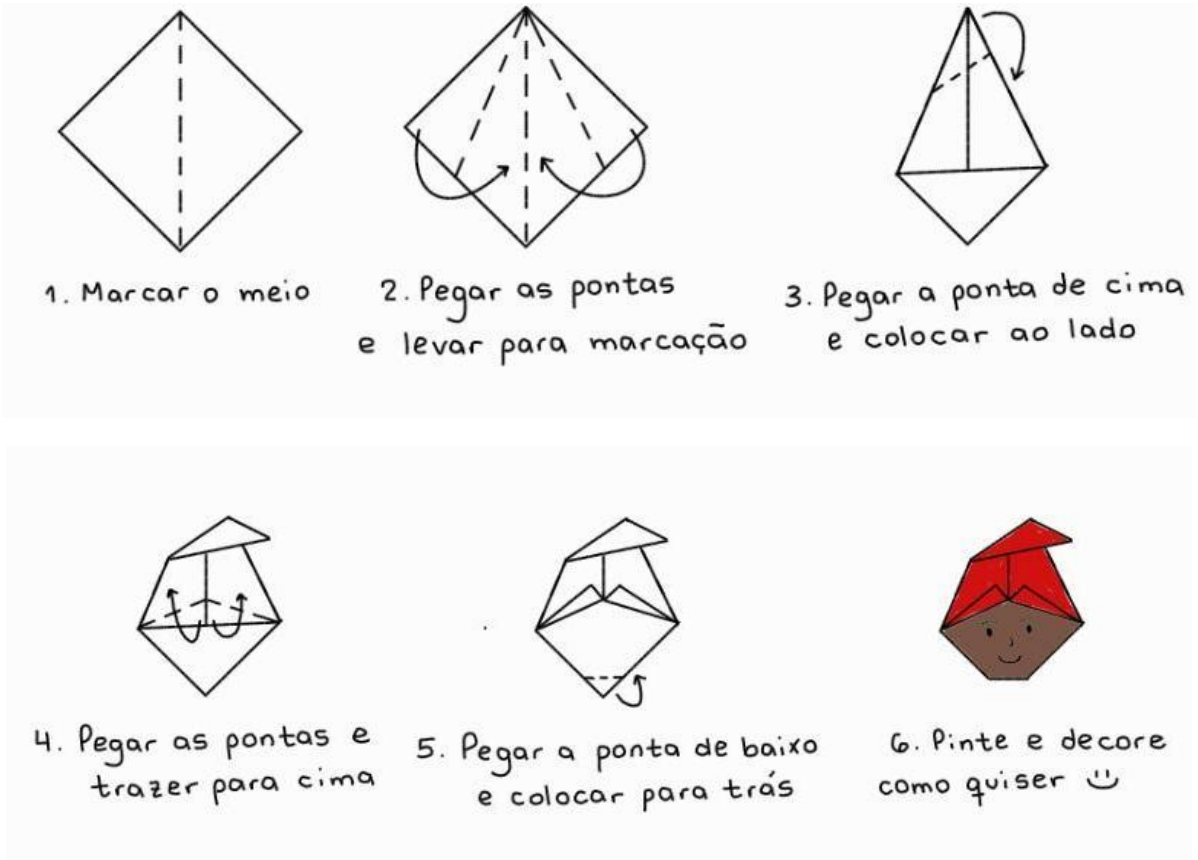


Figura 4: Tutorial do origami do saci.
Fonte: Autoria própria (2024).

Na sequência, iniciou-se a etapa prática da oficina. Primeiramente, uma integrante da equipe explicou o passo a passo da montagem do bilboquê, que consistia na fixação de um barbante à "bola" (tampinha com furo central) e sua posterior fixação na base do brinquedo. Nesta etapa foi abordado o conceito de reutilização de materiais, e como um material que tinha um uso pode servir de material para ser utilizado de outra forma.

Em seguida, outra integrante orientou as crianças na confecção do origami, com base no esquema apresentado na Figura 5. Durante toda a atividade, os demais membros da equipe permaneceram disponíveis para auxiliar e orientar as crianças, especialmente na etapa de colagem da dobradura na estrutura do bilboquê, realizada com cola quente. Também foi proposto que os participantes decorassem seus origamis antes da montagem final, o que resultou em diferentes níveis de detalhamento e criatividade, evidenciando o envolvimento individual de cada criança.



Figura 5. Exemplo de Bilboquê construído na atividade.
Fonte: Autoria própria, 2024

Na etapa de decoração do Bilboquê, os membros da equipe permaneceram disponíveis para auxiliar e orientar as crianças, especialmente na etapa de colagem da dobradura na estrutura do bilboquê, realizada com cola quente. Também foi proposto que os participantes decorassem seus origamis antes da montagem final, o que resultou em diferentes níveis de detalhamento e criatividade, evidenciando o envolvimento individual de cada criança. Nesta etapa observou-se que algumas crianças conversavam sobre o saci, sobre outros objetos que poderiam ser feitos com garrafas de plástico, mostrando que a oficina instigou o pensamento crítico nas crianças.

Após a finalização dos brinquedos, os participantes foram direcionados à área de jogos, onde puderam interagir por aproximadamente 10 minutos com atividades como pebolim, passa-bolinha e shisima. Em seguida, organizados em fila, receberam um gorro vermelho característico do Saci e foram conduzidos a uma área externa do campus para a realização da "Caça ao Saci". Uma boa representação do conjunto da oficina do Saci pode ser visto por meio da Figura 6.



Figura 6: Base do Saci-Pererê em aplicação.
Fonte: Fotografia de Maria Eduarda Oliveira, 2024.

O destaque da oficina foi o engajamento na caça ao Saci, atividade que despertou grande animação no grupo. Foram distribuídos "Sacis" no microtubos em uma região delimitada, em que cada integrante poderia encontrar um Saci, foram distribuídos em quantidade suficiente para que cada criança encontrasse pelo menos um microtubo contendo um Saci.

Durante a brincadeira, foi possível observar diferentes comportamentos entre os escoteiros. Alguns encontravam rapidamente o que procuravam e logo ajudavam os colegas, outros achavam mais de um e faziam questão de compartilhar com os amigos. Havia também aqueles que, ao encontrar mais de um, preferiam não dividir. Nessas situações, as supervisoras responsáveis pela atividade aproveitaram para orientar as crianças sobre a importância de compartilhar com os companheiros.

Além disso, teve um momento curioso e criativo que ocorreu quando, devido a um erro de impressão que deixou a figura do menino um pouco amarelada, então surgiu entre eles a figura do "Saci de ouro", que foi prontamente incorporada à

brincadeira de forma espontânea. Essa situação evidenciou a capacidade das crianças de transformar imprevistos em oportunidades lúdicas e criativas, enriquecendo ainda mais a vivência. Esta oficina foi ofertada 10 vezes durante o dia, atendendo em torno de 180 crianças vinda de diversas cidades do norte do Paraná.



Figura 7: Aplicação da Caça ao Saci.
Fonte: Fotografia de Logan Hanna Martins Alves, 2024.

Considerações finais

A atividade proporcionou às crianças uma valiosa oportunidade de interação da educação ambiental com o folclore brasileiro, permitindo que elas explorassem nossas tradições culturais e conceitos de proteção ambiental de maneira envolvente e significativa.

A criação do bilboquê e do origami, por sua vez, estimulou diversas habilidades importantes para o desenvolvimento infantil. Durante a confecção dos brinquedos, as crianças puderam aprimorar sua coordenação motora fina, exercitar a atenção e praticar o trabalho em equipe, enquanto compartilhavam ideias e colaboravam umas com as outras, promovendo também a socialização e o respeito mútuo.

Vale destacar também o papel da equipe responsável pela montagem da base da atividade, que obteve êxito ao integrar os princípios do ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) utilizando materiais recicláveis na construção dos jogos e brinquedos. Essa iniciativa não apenas promoveu a sustentabilidade, como também serviu de exemplo prático para as crianças sobre a importância do reaproveitamento e da consciência ambiental.

O tempo dedicado às brincadeiras foi não apenas divertido, mas também enriquecedor, estimulando a criatividade e proporcionando uma experiência de aprendizagem leve e prazerosa. Iniciativas como esta demonstram como é possível aliar ludicidade, desenvolvimento integral e consciência socioambiental em atividades educativas que marcam positivamente o cotidiano das crianças.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a UTFPR e a UEB pelo apoio para o preparo e realização desta oficina.

Referências Bibliográficas

BRANDÃO, Lucas de Esquivel Dias; CUNHA, Bruna Lima; SANTOS, Sarah Lalesca Antunes dos; RODRIGUES, Hanna Thays Soares; BARROS, Marcelo Diniz Monteiro de. **A utilização da lenda folclórica do Caboclo d'Água como estratégia para a educação ambiental**. In: Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 12., 2015, Poços de Caldas, MG. Anais [...]. Poços de Caldas: Congresso Nacional de Meio Ambiente, 2015.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 8.828, de 24 de janeiro de 1946**. Dispõe sobre o reconhecimento da União dos Escoteiros do Brasil como instituição destinada à educação extraescolar. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 jan. 1946.

CORDEIRO, Márcio; PEREIRA, Ibraim; SILVA, Fernando; VIANA, Idenildo; PANTOJA, Renato; VIANA, Josué; PORTELA, Carlos. **Design de um RPG de aventura para educação ambiental e valorização das lendas dos povos originários da Amazônia**. In: Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital, 14., 2025, Salvador, BA. Anais [...]. Salvador: SBGames, 2025. Trilha: Artes & Design.

COTRIM, J. **Saci: conheça a origem, história, lenda e características do personagem.** UOL EDUCAÇÃO, 31 out. 2023. Disponível em: https://educacao.uol.com.br/noticias/2023/10/31/saci-conheca-a-origem-historia-lenda-e-caracteristicas-do-personagem.htm.

ESCOTEIROS DO BRASIL – REGIÃO DO PARANÁ. **Atividade Regional do Ramo Lobinho.** Disponível em: https://pr.escoteiros.org.br/eventos/atividade-regional-do-ramo-lobinho/..

ESCOTEIROS DO BRASIL. **Escotismo Internacional.** Disponível em: https://www.escoteiros.org.br/internacional/. Acesso em: 17 mar. 2025.

ESCOTEIROS DO BRASIL. **História do Escotismo no Brasil.** Disponível em: https://www.escoteiros.org.br/historia/. Acesso em: 17 mar. 2025.

ESCOTEIROS DO BRASIL. **Ramo Lobinho.** Disponível em: https://www.escoteiros.org.br/ramo-lobinho/. Acesso em:17 mar. 2025.

MAMED, M. S. B. S.; OAIGEN, E. R. Diversidade cultural e educação ambiental: um diálogo entre a teoria e a prática do Festival Folclórico de Parintins como ferramenta de aprendizagem da Rede Pública Municipal. RGSN - Revista Gestão, Sustentabilidade e Negócios, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 96-113, jun. 2022.

MILITÃO, B.; LIMA, V. **Bilboquê: um brinquedo clássico que dá até para fazer em casa.** Revista Crescer, 08 abr. 2021. Disponível em: https://revistacrescer.globo.com/Entretenimento/noticia/2021/04/org21-bilboque-um-brinquedo-classico-que-da-ate-para-fazer-em-casa.html.

OPENAI. ChatGPT, 2026, Elaborada por meio da IA ChatGPT (OpenAI), a partir do prompt “Através da descrição das etapas construa uma figura em forma de infográfico” . Disponível em: https://chat.openai.com/

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12: Consumo e produção responsáveis.** Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DO MOVIMENTO ESCOTEIRO. **As características essenciais do escotismo.** Tradução de Leonardo Vieira. 2. ed. Kuala Lumpur: Escritório Escoteiro Mundial, 2019.

SANTOS, Kerlen Alana Santa Ana; SILVA, Rodrigo de Cássio da. Educação Ambiental em espaços não formais: relato de experiência no Parque das Aves (Foz do Iguaçu, PR, Brasil). **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, *[S. l.]*, v. 16, n. 2, p. 153–162, 2021. DOI: 10.34024/revbea.2021.v16.10566. Disponível em: https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/10566.

SILVA, A. A. et al. **O origami como um estímulo a criatividade das crianças das séries iniciais.** X Jornada de ensino, pesquisa e extensão. UFRPE: Recife, 2010.

SILVA, Allyson Felipe da; LORENZETTI, Leonir. **A pesquisa em educação ambiental nos espaços não formais**. In: evento científico realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019, Natal, RN. Anais [...]. Natal: UFRN, 2019. p. [s.n.].

SILVA, Thaynara Raelly da Costa; ASSUNÇÃO, Suelene Santana. **Educação ambiental através do folclore**. In: ARAÚJO, Maria Ludetana; SANTOS, Antônio Luís Parlandin dos; MUHALA, Valdemiro (org.). *Educação ambiental e práticas pedagógicas interculturais e decoloniais na Amazônia: entre o local e o global*. Belém: Grupo de Pesquisa em Educação Ambiental na Amazônia, 2022. p. 47–55.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL E TERRITORIALIZAÇÃO: ANÁLISE DA EFETIVIDADE DO PROGRAMA CONECTANDO SABERES NA REDE PÚBLICA DE ENSINO DE MARAGOGI-AL

1 Rose Mary Teixeira de Lemos, 2 Jéssica Maia Castilho Freitas, 3 Cleyse Kelly Barbosa Nunes, 4 Carlos Magno Melo Braga, 5 Erick Phelipe Ramos dos Santos

1 Universidade de São Paulo (USP), roseteixeiralemos@gmail.com; 2 Instituto Federal do Pará (IFPA), jessicamfreitas7@gmail.com; 3 Universidade de São Paulo (USP), cleyse.kelly@usp.br; 4 Universidade Federal de Pernambuco, braguinha2009@gmail.com; 5 Universidade Federal de Pernambuco, erick.phelipe@ufpe.br

Palavras-chave: Educação socioambiental; sustentabilidade; pertencimento.

Resumo

A Educação Ambiental, segundo a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e a Resolução nº 02/2012, deve ser um componente estruturante e transversal nos currículos, superando práticas fragmentadas e descontextualizadas. Essas diretrizes enfatizam a necessidade de integrar as dimensões socioculturais e econômicas para promover uma reflexão crítica sobre a produção e o consumo. No entanto, o desafio permanece em traduzir essas orientações em propostas pedagógicas que articulem de forma integrada às realidades locais e globais. Em Maragogi, situado no litoral norte alagoano, existe uma carência de materiais didáticos que integrem as dimensões ecológicas, geológicas, biológicas e históricas locais. Esse vazio reforça o paradigma da simplificação, que desarticula os saberes e impede que o discente compreenda a complexidade do seu próprio território. Sem materiais que dialoguem com as vocações regionais, isolando os objetos de seu meio e limitando a percepção dos estudantes sobre o seu papel como agentes de transformação no processo de territorialização. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi apresentar o Programa Conectando Saberes, idealizado e implementado na rede pública de ensino de Maragogi. Além disso, identificar a efetividade desse programa na promoção da educação ambiental e no resgate do pertencimento territorial de discentes e docentes. Trata-se de uma pesquisa descritiva quali-quantitativa, desenvolvida com 17 professores e 2.150 alunos da rede pública de Maragogi em 2025. O delineamento incluiu formação docente continuada, acompanhamento semanal e monitoramento de indicadores de rendimento estudantil. Os dados obtidos por meio de questionários estruturados subsidiaram a análise da efetividade do material didático elaborado e aplicado pelo programa, bem como a demonstração do alcance das atividades integradoras e das visitas técnicas realizadas. Os resultados demonstraram alta capilaridade e adesão média superior a 370 alunos por ano escolar e picos de engajamento de até 500 discentes no 8º ano. O rendimento acadêmico manteve-se em média acima de 80%, atingindo 100% nos eixos temáticos: Economia Solidária (8º ano) e Agenda Global (9º ano). A convergência estatística entre participação e aproveitamento técnico valida a transposição didática de temas locais e globais, consolidando a educação científica e o senso de pertencimento territorial no litoral alagoano. Logo, o programa logrou êxito na alfabetização científica dos discentes, ao transpor conceitos complexos como economia solidária e serviços ecossistêmicos para a realidade local. A correlação direta entre participação e excelência acadêmica ratifica que o aprendizado crítico impulsiona o sentimento de pertencimento. O Conectando Saberes apresenta-se como uma estratégia replicável para fortalecer o elo entre escola e comunidade na promoção do desenvolvimento sustentável.

Introdução

A superação de um ensino fragmentado exige o que Morin (2016) define como a busca por um conhecimento pertinente, capaz de situar qualquer informação em seu contexto e conjunto. No âmbito da Engenharia Ambiental e da gestão de recursos naturais, a educação ambiental estratégica é o alicerce para a conservação, pois promove a religação dos saberes necessária para compreender a complexidade sistêmica do meio ambiente. Mais do que transmitir informações, trata-se de formar cidadãos capazes de interpretar as dinâmicas físicas e biológicas de forma integrada, propondo soluções adequadas ao contexto em que vivem.

Entretanto, observa-se que a educação ambiental ainda é frequentemente abordada de forma genérica e descontextualizada da realidade dos estudantes, o que contrasta com as orientações da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que preconiza a integração desse tema aos currículos e às propostas pedagógicas em diferentes escalas — local, regional e global —, privilegiando abordagens transversais e integradoras (Brasil, 2018). De forma convergente, as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental (Resolução nº 2/2012) estabelecem a necessidade de incorporar a educação ambiental de maneira estruturante nos projetos institucionais e pedagógicos, promovendo uma reflexão crítica sobre sua inserção e superando sua abordagem fragmentada nos componentes curriculares. Ademais, tais diretrizes ressaltam que a educação ambiental deve contemplar a articulação entre dimensões naturais, socioculturais e econômicas, incluindo aspectos relacionados à produção, ao trabalho e ao consumo, de modo a superar práticas pedagógicas ainda marcadas por visões despolitizadas, acríticas e reducionistas (Brasil, 2012).

No cenário do litoral norte alagoano, especificamente em Maragogi (AL), existe uma carência crítica de materiais didáticos que integrem as dimensões ecológicas, geológicas, biológicas e históricas locais. Esse vazio reforça o paradigma da simplificação, que desarticula os saberes e impede que o discente compreenda a complexidade do seu próprio território. Sem materiais que dialoguem com as vocações regionais, a "inteligência cega" isola os objetos de seu meio e limita a percepção dos estudantes sobre seu papel como agentes de transformação no processo de territorialização.

O Programa Conectando Saberes, desenvolvido em Maragogi (AL), foi concebido com o propósito de promover uma educação ambiental prática, contextualizada e transformadora, alinhada ao Plano Diretor de Educação Ambiental Municipal para o Ensino Fundamental I e II e às Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental. Em consonância com essas diretrizes, a proposta considera, no planejamento curricular, as especificidades das etapas de ensino, as faixas etárias e a diversidade sociocultural dos estudantes, bem como as características dos territórios e biomas locais. Além disso, adota um tratamento pedagógico diversificado, que valoriza as diferenças individuais, sociais, étnicas e culturais, promovendo valores como cooperação, solidariedade e respeito ao meio ambiente (Brasil, 2012).

O diferencial da iniciativa reside na utilização do território como laboratório vivo, integrando conceitos de geodiversidade e biodiversidade à identidade sócio-histórica da região. A estrutura curricular organiza-se em módulos temáticos anuais, abordando tópicos como turismo sustentável de base comunitária, mudanças climáticas e sustentabilidade com o objetivo de fortalecer o vínculo dos estudantes com o território e promover a formação cidadã. Ademais, o programa incentiva o diálogo e a parceria com a comunidade local, favorecendo a construção coletiva de conhecimentos sobre as condições socioambientais e estimulando intervenções voltadas à melhoria da qualidade de vida e à promoção de uma convivência sustentável.

A iniciativa já atende cerca de 2.150 estudantes, contando com o apoio institucional da Prefeitura de Maragogi e de órgãos como o IMA e a SEMARH, além de contribuir para a capacitação de professores. O programa também se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU e aos princípios da Cultura Oceânica (Ocean Literacy) da UNESCO (ONU, 2015). Em 2026, o material didático produzido foi sistematizado, editorado e catalogado por meio de parcerias institucionais, consolidando a iniciativa como uma proposta estruturada de educação ambiental.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é apresentar o Programa Conectando Saberes, idealizado e implementado na rede pública de ensino de Maragogi-AL. Além disso, identificar a efetividade desse programa na promoção da educação ambiental e resgate do pertencimento territorial dos discentes e docentes.

Material e Métodos

Este estudo caracteriza-se como descritivo, de abordagem quali-quantitativa, fundamentado na apresentação do Programa Conectando Saberes. Para avaliar sua efetividade, foram elaborados formulários na plataforma *google forms* e aplicados aos 17 docentes do componente curricular de educação ambiental e turismo do ensino fundamental II (6º ao 9º ano), de nove escolas da rede pública de ensino de Maragogi. Por meio dos dados coletados pelos formulários, foram mensurados os indicadores de rendimento dos 2.150 estudantes atendidos pelo programa. Além disso, foram realizadas capacitações mensais, acompanhamento semanal com os docentes e diálogo contínuo com os discentes durante as visitas técnicas. O delineamento metodológico e o cronograma operacional compreenderam o período entre fevereiro e dezembro de 2025.

Sobre os Módulos

A arquitetura do programa foi estruturada em uma matriz curricular multidimensional, organizada em três módulos temáticos transversais aplicados progressivamente do 6º ao 9º ano do Ensino Fundamental II, sendo cada módulo, para cada ano letivo, subdividido em nove aulas, cada uma com objetivos específicos a serem alcançados. Concebida sob uma hierarquia de complexidade crescente e compatibilizada com o desenvolvimento cognitivo e as competências previstas para cada nível de escolaridade, a metodologia de ensino foi adaptada para promover a percepção do território e o protagonismo discente (Quadro 1).

A estrutura da aplicação pedagógica, focada no Módulo 1, abrange o Território e a Conservação. Onde há a abordagem, geodiversidade e biodiversidade local, desde o ecossistema de manguezal (6º ano) até a análise crítica das Unidades de Conservação (8º ano) e a vulnerabilidade costeira perante as mudanças climáticas (9º ano).

No Módulo 2 o foco principal foram os Biomas e a Sociedade. Foram incorporadas à análise e as interações entre o meio físico e a ocupação humana, com ênfase na Mata Atlântica, na valorização do saber local e na economia solidária como alternativa sustentável.

E finalmente, no Módulo 3 a atenção principal foi a Sustentabilidade Aplicada. Concentra-se em soluções técnicas e gestão de recursos, compreendendo o ciclo hidrológico e saneamento básico (7º ano), segurança alimentar por meio da agroecologia (8º ano) e a proteção da herança cultural e biodiversidade (9º ano).

Quadro 1: A arquitetura do programa foi estruturada em três módulos progressivos, adaptados à maturidade cognitiva de cada série.

Ano	Módulo 1: Território e Conservação	Módulo 2: Biomas e Sociedade	Módulo 3: Sustentabilidade Aplicada
6º ano	Manguezal: Ecossistema local, fauna e flora ("Conhecer para preservar").	Bioma Mata Atlântica: Biodiversidade e fragmentação florestal.	Turismo e Conservação: Impacto da atividade turística no equilíbrio ecológico
7º ano	Sustentabilidade: Conceitos gerais e aplicação no município de Maragogi.	Turismo Sustentável de Base Comunitária: Valorização do saber local e pertencimento	Saneamento Básico: Ciclo da água, gestão de resíduos e saúde pública.
8º ano	Unidades de Conservação (UC): Estudo da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (APACC) e Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (RPPNs) em Maragogi.	Economia Solidária: Cooperativismo e alternativas de renda sustentável.	Agroecologia: Segurança alimentar e práticas agrícolas resilientes.
9º ano	Mudanças Climáticas: Impactos globais e vulnerabilidade costeira.	Agenda Global: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	História e Biodiversidade: Resgate dos saberes locais e proteção da herança cultural.

Fonte: Os autores (2026)

Neste trabalho, são analisados os resultados da avaliação do Módulo 2. Após a aplicação de cada aula, os professores responderam a um formulário que, além de registrar o número de alunos participantes como indicador de desempenho, contemplou questões relacionadas ao alcance dos objetivos ou habilidades previstas para a aula, sendo que cada aula apresenta de dois a três objetivos específicos. Adicionalmente, foi incluída uma questão aberta, permitindo aos docentes expressarem suas percepções acerca do material didático elaborado.

Para cada objetivo, os professores indicaram o nível de compreensão dos alunos, classificando-o como total, parcial ou inexistente. Com o intuito de sintetizar essas respostas em um único indicador, adotou-se uma média ponderada, atribuindo-se pesos distintos a cada nível de compreensão: compreensão total (100%), compreensão parcial (50%) e não compreensão (0%).

O índice de rendimento da aula foi calculado conforme a Equação (1):

$$\text{Rendimento (\%)} = (T \times 1) + (P \times 0{,}5) + (N \times 0) \quad (1)$$

em que:
T representa o número de respostas indicando que o objetivo foi totalmente alcançado;
P corresponde ao número de respostas indicando alcance parcial;
N representa o número de respostas indicando que o objetivo não foi alcançado.

A partir dos valores de rendimento obtidos, foi possível identificar os maiores e menores desempenhos temáticos, bem como calcular o rendimento global de cada aula. O índice de efetividade foi determinado por meio da média aritmética dos resultados associados aos objetivos abordados em cada aula. Com base nessa abordagem, foram elaborados gráficos que permitem a análise quantitativa do nível de absorção do conteúdo em cada aula.

Composição do corpo técnico

O conteúdo pedagógico foi elaborado com a colaboração voluntária de mais de 50 especialistas, incluindo mestres e doutores formados na área de ciências ambientais, garantindo rigor científico e aderência às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC).

Resultados e Discussão

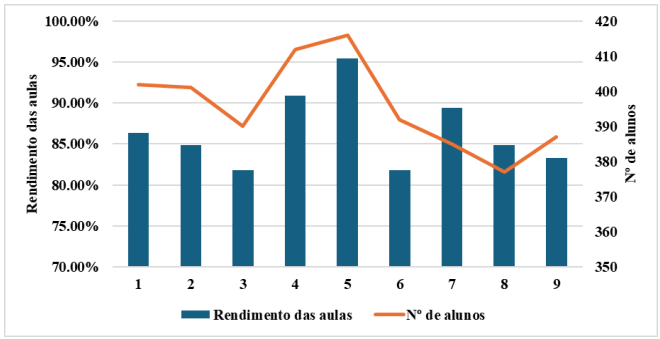
Análise de aplicação do módulo 2

O Módulo 2 focou na interdependência entre o meio físico (estudado no módulo anterior) e a vida, destacando os ecossistemas de Maragogi. A abordagem deixou de ser apenas a descrição da fauna e flora para focar na interação socioambiental. Os resultados apresentados nos gráficos refletem essa transição.

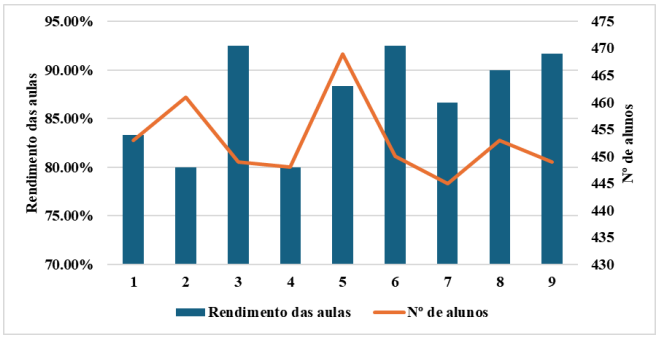
A análise integrada dos dados de comparecimento e rendimento acadêmico para o Módulo 2 (Biomas e Sociedade), direcionado ao 6º ano, revela uma sinergia fundamental entre a presença discente e a absorção de conhecimento técnico. Observa-se que a participação manteve uma base sólida e constante, com média próxima a 395 alunos, atingindo seu ápice na aula 05 com 416 participantes, volume expressivo que demonstra o alto poder de mobilização do Programa Conectando Saberes em Maragogi-AL (Gráfico 1). Simultaneamente, o rendimento acadêmico acompanhou essa tendência de engajamento, mantendo-se invariavelmente acima de 80% e alcançando seu ponto máximo de 95,5% de aproveitamento na mesma aula 05. Essa convergência estatística comprova que a temática dos biomas locais, quando associada às dinâmicas da sociedade e às pressões antrópicas na Mata Atlântica, gera um senso de pertencimento que não apenas atrai o aluno para a sala de aula, mas garante uma alfabetização científica efetiva (Gráfico 1).

Essa consistência nos indicadores ratifica a eficácia da substituição de modelos de ensino fragmentados por uma abordagem que utiliza o território como laboratório vivo, reduzindo a "inteligência cega" e promovendo a religação dos saberes conforme proposto por Morin (2016). Do ponto de vista da educação ambiental (EA) a manutenção de altos índices de

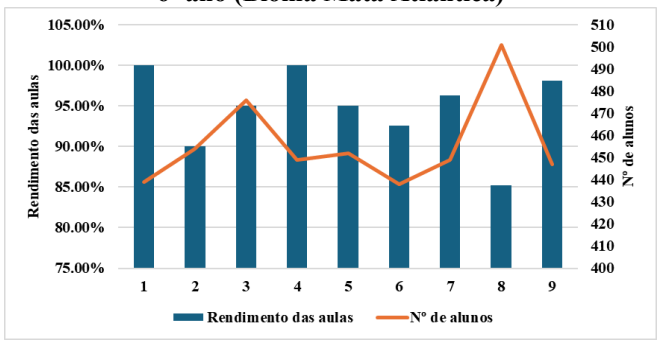
participação e rendimento ao longo das nove aulas do módulo sinaliza a formação de uma base social tecnicamente informada e consciente das vocações regionais. Ao compreenderem a fragmentação florestal e a importância dos serviços ecossistêmicos em sua própria realidade, os discentes deixam de ser espectadores passivos para se tornarem agentes de transformação. Assim, a integração desses resultados consolida a educação ambiental contextualizada como uma ferramenta estratégica de gestão territorial, essencial para a sustentabilidade e para a mitigação de conflitos socioambientais no litoral norte alagoano.



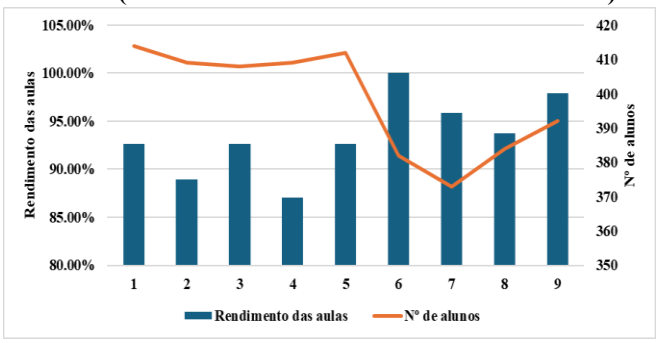
6º ano (Bioma Mata Atlântica)



7º ano (Turismo Sustentável de Base Comunitária)



8º ano (Economia Solidária)



9º ano (Agenda Global)

Gráfico 1: Frequência absoluta e rendimento acadêmico dos alunos do 6º ao 9º ano durante o Módulo 2.

A análise integrada dos indicadores de participação e aproveitamento para o 7º ano, durante o Módulo 2 (Turismo Sustentável de Base Comunitária), revela um engajamento superior em termos de volume de discentes, mantendo uma base constante acima de 445 alunos. O ápice de comparecimento ocorreu na aula 05, registrando aproximadamente 469 participantes, o que demonstra a ressonância do tema "pertencimento" e "saber local" junto a essa faixa etária. Em estreita correlação, o rendimento acadêmico apresenta picos notáveis de 92,5% nas aulas 03 e 06, evidenciando que a transposição didática focada no turismo sustentável, que é o pilar econômico de Maragogi, potencializa a retenção de conceitos técnicos (Gráfico 1). Essa consistência nos dados reforça que, à medida que o aluno avança no Ensino Fundamental II, a conexão entre o conteúdo científico e as possibilidades de atuação profissional e social no território torna-se um fator determinante para o sucesso pedagógico (Gráfico 1).

Do ponto de vista da EA os resultados do 7º ano são fundamentais, pois abordam a valorização do saber local como estratégia de conservação. O rendimento médio, situado em patamares elevados (entre 80% e 93%), indica que os discentes estão assimilando a complexidade de equilibrar o desenvolvimento econômico turístico com a preservação dos serviços ecossistêmicos. Ao compreenderem o turismo sob a ótica da sustentabilidade de base comunitária, os alunos superam a visão fragmentada da exploração ambiental e passam a visualizar o território como um ativo a ser gerido de forma resiliente. Portanto, o fortalecimento desse elo entre vocação regional e educação científica, observado nos índices de participação e desempenho, consolida o programa como um instrumento eficaz na formação de cidadãos aptos a promover a territorialização e a gestão sustentável no litoral alagoano.

A análise dos indicadores para o 8º ano revela o ápice do engajamento quantitativo e do aproveitamento técnico no Programa Conectando Saberes. O Gráfico (1) ilustra um crescimento sólido, culminando na marca de aproximadamente 500 alunos na aula 08, o que evidencia que a temática da Economia Solidária ressoa profundamente com os discentes nesta fase de maturidade escolar. De forma extraordinária, no rendimento é registrado um aproveitamento de 100% nas aulas 01 e 04, mantendo-se, na maior parte do cronograma, acima de 90%. Esses resultados indicam que a transposição didática foi capaz de simplificar conceitos complexos de cooperativismo e sustentabilidade, transformando-os em conhecimentos pertinentes e aplicáveis, o que reduz drasticamente a "inteligência cega" sobre as dinâmicas econômicas e ambientais do litoral alagoano.

Sob a ótica da EA os dados do 8º ano são cruciais, pois validam a educação ambiental como suporte para a viabilidade de modelos de desenvolvimento resilientes. O altíssimo rendimento acadêmico (com picos de excelência total) prova que os discentes assimilaram a economia solidária não apenas como teoria, mas como uma alternativa real de renda que respeita os limites dos serviços ecossistêmicos de Maragogi. Ao compreenderem o cooperativismo e as práticas agrícolas resilientes,

também previstas na estrutura curricular do ano, os estudantes consolidam o processo de territorialização, reconhecendo-se como sujeitos capazes de gerir recursos de forma coletiva e sustentável. Esse nível de alfabetização científica e social é o indicador mais forte de que o programa está formando uma base cidadã apta a apoiar e protagonizar soluções de engenharia voltadas à conservação ambiental e ao progresso regional.

A análise dos indicadores do 9º ano demonstra a consolidação do pensamento crítico e a maturidade acadêmica dos discentes frente aos desafios globais. O gráfico de participação revela uma adesão robusta desde o início do módulo, com 414 alunos na aula 01 e uma manutenção constante acima de 370 participantes, evidenciando que o interesse pela Agenda Global permanece latente mesmo na reta final do ciclo escolar (Gráfico 1). Em termos de desempenho, os resultados são notáveis: o rendimento acadêmico não apenas se manteve em patamares elevados (acima de 87%), como atingiu a excelência total de 100% na aula 06. Esse dado sugere que a transposição didática dos ODS para a realidade do litoral alagoano foi plenamente absorvida, permitindo que os estudantes relacionassem metas globais com as necessidades locais de Maragogi (Gráfico 1).

Sob a perspectiva da EA os resultados obtidos no 9º ano refletem a consolidação da consciência crítica e o êxito do processo de territorialização do conhecimento. O alto índice de aproveitamento indica que os alunos agora possuem o repertório técnico necessário para compreender políticas públicas, mudanças climáticas e gestão de recursos naturais sob uma ótica sistêmica. Ao atingir 100% de rendimento em tópicos estratégicos da agenda global, o programa entrega à sociedade cidadãos alfabetizados cientificamente e aptos a atuar como agentes de transformação. Essa percepção ampliada, que une o local ao global, é essencial para a mitigação de impactos ambientais e para a construção de soluções de engenharia que sejam socialmente justas e ecologicamente resilientes, garantindo que a conservação do litoral norte alagoano esteja alinhada às melhores práticas internacionais.

Caracterização do Engajamento: Matrículas e Índices de Absenteísmo

Para a análise da abrangência do Programa Conectando Saberes, é preciso analisar o universo de alunos matriculados e o desafio do absenteísmo escolar. O gráfico de matriculados revela que o programa atende a uma massa crítica significativa, com o 8º ano apresentando o maior contingente (aproximadamente 566 alunos), seguido pelo 7º e 6º anos. O 9º ano, embora possua o menor número absoluto de matrículas (cerca de 498), demonstrou, como visto anteriormente, os maiores índices de rendimento técnico, sugerindo que a maturidade acadêmica compensa o menor volume amostral (Gráfico 2).

Contudo, o Gráfico 2 que também representa o percentual de faltosos em um panorama desafiador, o 6º ano deteve o maior índice de ausência (cerca de 23%), enquanto o 7º ano apresentou a maior assiduidade, com apenas 16% de faltas. Para a Engenharia Ambiental e a gestão de políticas públicas, esses dados são cruciais para o cálculo da efetividade real do projeto. O fato de o 8º ano e o 9º ano manterem faltas em torno de 20% ressalta ainda mais o sucesso do programa: mesmo diante de um cenário de absenteísmo histórico ou sazonal na região, o Módulo 2 conseguiu manter rendimentos próximos a 100% entre os alunos presentes. Isso prova que a metodologia de territorialização e o uso de temas como Economia Solidária e Agenda Global possuem uma força de atração capaz de mitigar os impactos da evasão escolar temporária.

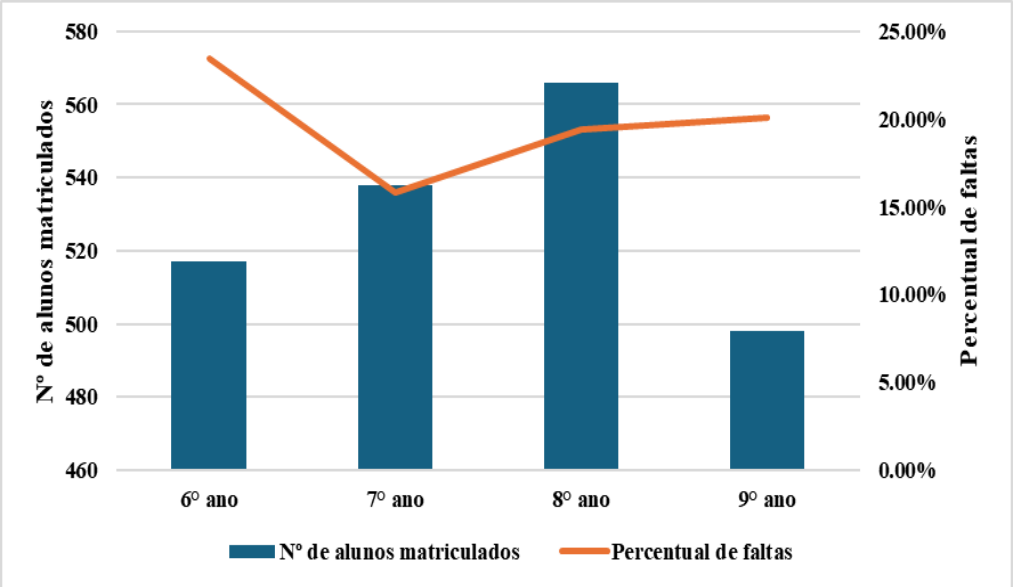


Gráfico 2: Distribuição de matrículas e índices de absenteísmo por etapa do Ensino Fundamental II (Módulo 2).

Análise do desempenho pedagógico e alcance dos objetivos de aprendizagem no Módulo 2

Os resultados da avaliação do Módulo 2 evidenciam variações no alcance dos objetivos pedagógicos entre os anos do ensino fundamental II (6º ao 9º ano), considerando as nove aulas ministradas. A análise foi conduzida com base na percepção dos professores quanto ao atingimento dos objetivos específicos de cada aula, permitindo identificar tanto os maiores quanto os menores rendimentos temáticos (Figura 1).

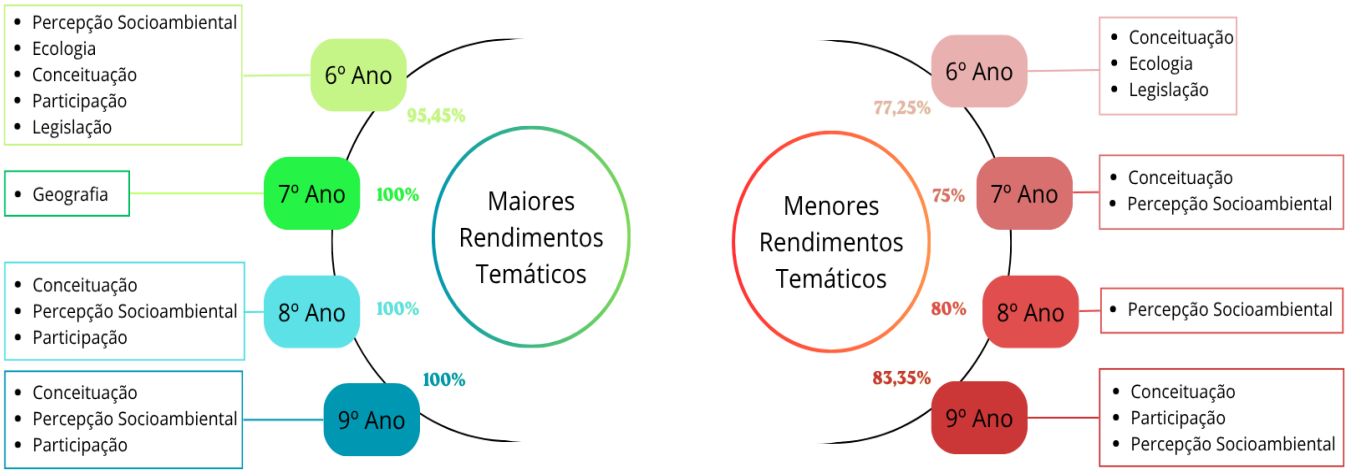


Figura 1 - Principais temas associados aos maiores e menores rendimentos por ano escolar (6º ao 9º ano).
Fonte: Autores (2025)

De modo geral, observou-se elevado desempenho para a maioria dos conteúdos trabalhados, com destaque para os 7º, 8º e 9º anos nos maiores rendimentos temáticos, os quais atingiram 100% de alcance dos objetivos em determinadas aulas. No 6º ano, embora o desempenho também tenha sido expressivo, apresentou valor ligeiramente inferior (95,45%). Entre os temas com maior rendimento, destacam-se "Percepção Socioambiental", "Conceituação" e "Participação", recorrentes em diferentes anos, além de "Ecologia" e "Legislação" no 6º ano e "Geografia" no 7º ano. Esses resultados sugerem boa aderência entre o conteúdo proposto e a capacidade de assimilação dos alunos, segundo a avaliação docente.

O 6º ano apresentou o menor desempenho (77,25%), seguido pelo 7º ano (75%), 8º ano (80%) e 9º ano (83,35%). Nesses casos, os temas com menor alcance incluíram "Conceituação", "Percepção Socioambiental", "Participação", "Ecologia" e "Legislação". A recorrência desses temas nos maiores e menores rendimentos reforça que o desempenho está mais associado à especificidade de cada aula, incluindo abordagem metodológica, complexidade do conteúdo e dinâmica em sala.

Embora classificados como de menor rendimento, os resultados com percentuais iguais ou superiores a 80% ainda configuram um desempenho satisfatório no contexto educacional analisado. Esse patamar indica que a maior parte dos objetivos propostos foi alcançado, refletindo uma assimilação consistente dos conteúdos por parte dos alunos. Assim, tais valores não devem ser interpretados como indicativos de baixo desempenho, mas sim como evidências de eficácia parcial, com potencial de aprimoramento. Nesse sentido, as variações observadas sugerem oportunidades de ajustes pontuais nas estratégias didático-pedagógicas, visando elevar ainda mais o alcance dos objetivos e promover maior uniformidade nos resultados entre as aulas e os diferentes anos escolares.

Análise da equipe técnica

O quadro 2 apresenta a caracterização das escolas participantes, bem como a distribuição de professores, turmas e alunos no Ensino Fundamental II. No ano de 2025, ao todo, nove Escolas Municipais de Educação Básica (EMEBs) participaram da implementação do módulo, envolvendo 17 professores com formação em diversas áreas do conhecimento, incluindo Ciências Biológicas, Química, Pedagogia, Letras, Matemática, Sociologia, Direito, Geografia, Inglês e Literatura. Os professores responsáveis pela condução das aulas são designados pela Secretaria de Educação, conforme a necessidade de complementação da carga horária curricular. No que se refere à organização das turmas, foram contempladas 40 turmas, 11 turmas de 6º ano, 10 de 7º ano, 10 de 8º ano e 09 de 9º ano. Em relação ao número de alunos matriculados, observou-se um total de 517 no 6º ano, 538 no 7º, 566 no 8º e 498 no 9º, evidenciando a abrangência do programa nas diferentes etapas do Ensino Fundamental II.

Quadro 2. Escolas municipais integradas ao Programa Conectando Saberes.

Escolas	Áreas de formação dos professores	6º ano	7º ano	8º ano	9º ano
• EMEB Esperidião Francisco Nogueira; • EMEB Ayres Pereira da Costa; • EMEB Arlindo Estanislau da Silva; • EMEB Yone Silvia Henzel; • EMEB Othon Berardo; • EMEB Eurico Acioly Wanderley; • EMEB Manuel de Medeiros Costa; • EMEB Antônio Verçosa Coelho; • EMEB Doutor José Jorge de Farias Sales.	• Ciências Biológicas; • Química; • Pedagogia; • Letras; • Matemática; • Sociologia; • Direito; • Geografia; • Inglês; • Literatura.	**Nº de turmas**			
		11	10	10	9
		Nº de alunos matriculados			
		517	538	566	498
Nº total de professores: 17					

A diversidade de formação dos professores responsáveis pela aplicação do conteúdo evidencia a consonância com o Art. 8º das Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental (Resolução nº 2/2012), que preconiza o respeito à autonomia das dinâmicas escolar e acadêmica e a incorporação da educação ambiental como uma prática educativa integrada, interdisciplinar, contínua e permanente. Nesse sentido, a atuação de docentes de diferentes áreas do conhecimento reforça o caráter transversal da temática, evitando sua fragmentação e a restrição a um componente curricular específico, em alinhamento com o que orienta a referida normativa.

As figuras 2, 3 e 4 evidenciam a atuação do Programa Conectando Saberes no processo formativo dos estudantes da rede pública de ensino do município de Maragogi.



Figura 2 - Distribuição do segundo módulo para os alunos do 7° ano da EMEB. Manoel de Medeiros Costa.
Fonte: Autores (2025).



Figura 3 - Visita técnica à Reserva Biológica de Saltinho com os alunos do 6° ano da EMEB. Esperidião Francisco Nogueira.
Fonte: Autores (2025).



Figura 4 - Alunos do 9° ano da EMEB. Antônio Verçosa Coelho na Feira de Saberes de encerramento do primeiro módulo.
Fonte: Autores (2025).

A figura 2 evidencia uma das etapas do Programa Conectando Saberes, que foi a distribuição dos materiais didáticos elaborados, estruturados em 12 volumes destinados ao Ensino Fundamental II e organizados conforme etapas de aprendizagem alinhadas às vocações territoriais. Essa abordagem pedagógica converge com as premissas da EA crítica, ao integrar multidimensionalidade e interdisciplinaridade, favorecendo a problematização da realidade e a formação de sujeitos críticos e emancipados (Freire, 2005; Lima, 2009).

A figura 3 retrata uma das visitas técnicas realizadas, elemento estruturante do programa, ao viabilizar a integração entre os conteúdos teóricos e as experiências empíricas em campo. Destacam-se outras visitas técnicas realizadas, tais como: visita à Reserva Biológica de Saltinho, em Tamandaré (PE), à Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (APACC), à Fazenda Marrecas, em empreendimentos do setor hoteleiro e à Feira de Economia Solidária, localizados em Maragogi (AL). A incorporação dessas práticas ao ambiente escolar contribui para a ressignificação do processo de ensino e aprendizagem, consolidando a escola como espaço de formação ativa, no qual os estudantes são estimulados a mobilizar e aplicar os conhecimentos construídos em contextos sociais concretos (Perondi *et al*., 2025).

Por sua vez, a figura 4 evidencia a consolidação do protagonismo estudantil por meio da execução de atividades práticas voltadas à socialização dos conhecimentos construídos, especialmente nas feiras de saberes, onde os estudantes apresentaram maquetes e protótipos. Essas iniciativas são compatíveis com a aprendizagem construtivista, ao promover processos formativos centrados na construção ativa e compartilhada do conhecimento, em uma perspectiva interdisciplinar e contextualizada. Favorecem o pensamento crítico, ao estimular a análise, proposição de soluções, curiosidade investigativa e a autonomia dos estudantes (Roman *et a*l., 2017).

Comentários finais

Em consonância com a superação do conceito de um ensino fragmentado, o Programa Conectando Saberes, desenvolvido em Maragogi, evidencia o potencial de uma educação ambiental prática, contextualizada a realidade local e transformadora. Os resultados observados indicam a efetividade da iniciativa na promoção da educação ambiental crítica e no resgate do sentimento de pertencimento territorial. Portanto, ao articular vocação regional, educação científica e participação social, o programa demonstra ser um instrumento efetivo na formação cidadã e no protagonismo de soluções voltadas à conservação ambiental e ao desenvolvimento sustentável.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à Prefeitura Municipal de Maragogi, à Associação Barretense de Ecologia e Meio Ambiente Ipê Amarelo (ABEMAIA), à Universidade de São Paulo (USP), à Universidade Federal de

Pernambuco (UFPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio e suporte recebidos para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018, p. 600. Disponível em: https://basenacionalcomum.mec.gov.br/. Acesso em: 28 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação; Conselho Pleno. **Resolução nº 2, de 15 de junho de 2012**. Estabelece as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, 18 de junho de 2012, Seção 1, p. 70. Disponível em: https://portal.mec.gov.br/dmdocuments/rcp002_12.pdf. Acesso em: 28 abr. 2026.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia do oprimido**. 42. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2005.

LIMA, G. F. C. Educação Ambiental crítica: do socioambientalismo às sociedades sustentáveis. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 145-163, jan./abr. 2009.

MORIN, E. **Os Sete Saberes Necessários à Educação do Futur**o. 5ª Ed., Rio de Janeiro: Corteza, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 28 abr. 2026.

PERONDI, L., CATOSSO, M. C. E., LEMOS, A. A. G., & BARBA, C. H. de. (2025). **O papel da educação ambiental nos anos iniciais diante das queimadas urbanas**. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, 23(8), e11185. https://doi.org/10.55905/oelv23n8-148.

ROMAN, C.; ELLWANGER, J.; BECKER, G. C.; SILVEIRA, A. D.; MACHADO, C. L. B.; MANFRO, W. C. **Metodologias ativas de ensino-aprendizagem no processo de ensino em saúde no Brasil: uma revisão narrativa**. Clinical & Biomedical Research, Porto Alegre, v. 37, n. 4, p. 349-357, 2017. DOI: https://dx.doi.org/10.4322/2357-9730.73911. Disponível em:https://seer.ufrgs.br/hcpa/article/view/73911. Acesso em: 13 fev. 2023.

ALGAS DE ÁGUA DOCE: UM MUNDO MICROSCÓPICO DO PANTANAL DE POCONÉ - PORTO CERCADO E SUA IMPORTÂNCIA PARA A EDUCAÇÃO AMBIENTAL

1 João Victor Ribeiro da Silva, 2 Maria Eduarda Pereira de Andrade, 3 Maria Francisca Alves dos Santos Souza, 4 Rodney Ferreira Nunes Junior, 5 Heitor Nicolao de Siqueira, 6 Yasmin Mariana Zardo Magalhães

UFMT, e-mail: joao.silva64@sou.ufmt.br; UFMT, e-mail: maria.andrade2@sou.ufmt.br; UFMT, e-mail: maria.souza23@sou.ufmt.br; UFMT, e-mail: rodney.junior@sou.ufmt.br; UFMT, e-mail:heitor.siqueira@sou.ufmt.br; UFMT, e-mail: yasmin.magalhaes@sou.ufmt.br

Palavras-chave: Algas; Pantanal; Educação Ambiental.

Resumo

O Pantanal mato-grossense destaca-se mundialmente como uma das maiores e mais complexas áreas úmidas do planeta, apresentando uma grande biodiversidade e exercendo uma importância ecológica inestimável para a manutenção dos ecossistemas aquáticos, além de atuar ativamente na regulação climática e no ciclo hidrológico em escala macrorregional. Nesse intrincado contexto sistêmico, as algas de água doce assumem um protagonismo e desempenham papel fundamental como produtores primários na base das teias tróficas e como bioindicadores altamente sensíveis da qualidade da água. Essa sensibilidade permite avaliar com precisão as condições ambientais vigentes e identificar precocemente alterações limnológicas decorrentes tanto de processos naturais, a exemplo do atual período de estiagem que regula a dinâmica hídrica, quanto de intensas atividades antrópicas que impactam direta e indiretamente a bacia hidrográfica. Sob essa perspectiva, o presente estudo teve como objetivo central analisar a ocorrência, a estrutura e a diversidade taxonômica de algas em ambientes aquáticos representativos localizados na região de Porto Cercado, município de Poconé, estado de Mato Grosso, relacionando a presença estrutural dessas comunidades microscópicas com aspectos qualitativos da água e destacando, de forma incisiva, sua relevância para a promoção de ações de educação ambiental. A pesquisa foi desenvolvida a partir de uma visita técnica a campo no mês de agosto de 2025, abrangendo um gradiente espacial composto pelo Rio Bento Gomes, um corixo marginal à estrada e o canal principal do Rio Cuiabá. Foram realizadas rigorosas observações diretas e coletas sistemáticas de amostras biológicas com o auxílio de redes de plâncton, integrando medições *in situ* de variáveis limnológicas determinantes tais como pH, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica, saturação de oxigênio e turbidez, compondo um quadro diagnóstico detalhado. Posteriormente, as análises conduzidas no Laboratório de Físico - Química de Água e Resíduos e no Laboratório de Microbiologia Aplicada (UFMT) permitiram a identificação de 11 espécies fitoplanctônicas por meio de microscopia óptica. Os resultados abióticos indicaram conformidade com a Resolução CONAMA nº 357/2005 (Classe 2), porém com evidente supersaturação de oxigênio (110,2%). A análise biológica revelou uma comunidade complexa, com predominância de clorofíceas e desmídias, além do registro de um nítido gradiente espacial: o Rio Bento Gomes e o corixo apresentaram maior riqueza de gêneros tolerantes e indicadores de enriquecimento orgânico, como *Euglena* sp., *Phacus* sp. e *Microcystis* sp., enquanto o Rio Cuiabá exibiu menor diversidade, refletindo sua maior estabilidade hidrodinâmica e capacidade de diluição. Dessa forma, conclui-se que o aprofundamento do estudo das algas constitui uma ferramenta científica, técnica e pedagógica de excepcional valia para o acompanhamento ambiental estratégico e para o desenvolvimento de práticas de educação ambiental aplicadas. Tais iniciativas de integração entre ciência laboratorial e sociedade contribuem diretamente para a sensibilização coletiva sobre a premência da conservação dos ciclos hidrológicos e a preservação perene dos frágeis ecossistemas que compõem o bioma Pantanal.

Introdução

Os ambientes aquáticos desempenham papel fundamental na manutenção da biodiversidade e no equilíbrio ecológico global, especialmente em regiões que apresentam grande complexidade biótica e variações sazonais marcantes no regime hidrológico, como o Pantanal mato-grossense. Este bioma, caracterizado como uma das maiores planícies inundáveis do planeta, funciona como um ecossistema macro-hídrico altamente dinâmico, onde a alternância entre os períodos de cheia e seca dita a produtividade biológica, a estruturação de habitats e a complexa ciclagem de nutrientes. A compreensão da estrutura dessas comunidades exige uma análise integrada, uma vez que as propriedades da água e a dinâmica dos nutrientes são determinantes para o estabelecimento da biomassa e da sucessão das espécies, conforme destaca Esteves (2011). Nesse ecossistema de extrema relevância, a presença de organismos microscópicos, como as algas, está diretamente e intimamente relacionada às contínuas variações das condições limnológicas e à integridade da qualidade da água, tornando seu estudo aprofundado essencial para o monitoramento estratégico e a conservação perene dos vastos recursos hídricos da Bacia do Alto Paraguai.

De acordo com Esteves (2011), a composição, a biomassa e a dinâmica estrutural da comunidade fitoplanctônica refletem prontamente as menores alterações nas condições físico-químicas dos ambientes aquáticos. Devido aos seus ciclos de vida curtos e altas taxas de reprodução, esses microrganismos respondem quase que imediatamente a perturbações no meio, o que permite seu uso consolidado como uma ferramenta de altíssima sensibilidade e eficiência na avaliação da saúde ambiental, complementando de forma indispensável as análises físico-químicas tradicionais.

No estado de Mato Grosso, o município de Poconé está inserido em uma macrorregião altamente representativa do ecossistema do Pantanal, apresentando uma multiplicidade de ambientes aquáticos interconectados, como rios principais, baías, lagoas e corixos que favorecem imensamente o desenvolvimento de diversas comunidades de organismos microscópicos. Esses ambientes sofrem intensa regulação e são influenciados de forma drástica pelas variações sazonais naturais do regime hidrológico, que afetam diretamente as propriedades físico-químicas e a qualidade da água, bem como a distribuição e a sucessão ecológica dos organismos aquáticos, tornando seu monitoramento técnico e científico de suma importância para a compreensão holística das condições ambientais em cenários de variabilidade climática.

As algas de água doce desempenham um papel ecológico insubstituível nos ecossistemas aquáticos, atuando como os principais produtores primários e constituindo a base energética vital da teia alimentar aquática, além de contribuírem massivamente para a produção de oxigênio dissolvido por meio da fotossíntese. No contexto do monitoramento, sendo sua identificação baseada em características morfológicas e estruturas celulares precisas (BICUDO; MENEZES, 2017) esses microrganismos são amplamente utilizados e validados como bioindicadores ambientais de excelência, pois sua presença, diversidade taxonômica e abundância relativa permitem avaliar com rigor a qualidade da água e identificar possíveis impactos ambientais, muitas vezes de origem antrópica. A ocorrência e a dominância de determinados grupos morfológicos e funcionais de algas podem indicar com clareza tanto ambientes hídricos perfeitamente preservados quanto áreas submetidas a uma maior concentração de matéria orgânica e nutrientes (como fósforo e nitrogênio), fenômeno amplamente conhecido como eutrofização, que pode comprometer o uso múltiplo das águas.

Além de sua inegável relevância biológica, ecológica e científica, o estudo aprofundado desses microrganismos constitui um elo fundamental e transformador entre a pesquisa técnica de laboratório e as práticas de educação ambiental. Ao materializar e dar visibilidade a um universo invisível a olho nu, essa abordagem proporciona ao público e à comunidade acadêmica uma compreensão muito mais profunda e tangível sobre a extrema fragilidade dos sistemas hídricos, reforçando a urgência e a necessidade de se fomentar práticas de manejo sustentáveis e políticas de preservação efetivas. Conforme aponta Jacobi (2003), a educação ambiental deve ser um processo de formação de consciência crítica, essencial para fomentar práticas de manejo sustentável e políticas de preservação efetivas.

Diante da complexidade desse cenário ecológico e educacional, o presente estudo foi idealizado e desenvolvido na região estratégica de Porto Cercado, localizada no município de Poconé, Mato Grosso, a partir de uma rigorosa visita técnica realizada no mês de agosto de 2025. Este período específico, correspondente à fase aguda de estiagem no bioma Pantanal, caracteriza-se pela significativa redução dos níveis d'água, aumento do tempo de residência e maior estabilidade hidrodinâmica da coluna hídrica, permitindo uma análise muito mais detalhada, controlada e precisa da ocorrência e diversidade de algas na região. O estudo foi conduzido com o intuito final de consolidar a importância dessas comunidades não apenas como alvo de pesquisa limnológica, mas também como um robusto instrumento pedagógico e científico essencial para a promoção da educação ambiental e para a garantia da preservação a longo prazo dos frágeis ecossistemas pantaneiros.

Materiais e Métodos

A metodologia aplicada neste estudo foi estruturada para garantir uma amostragem representativa da diversidade ficológica na região, estabelecendo uma correlação direta entre os microrganismos e as variáveis ambientais. As coletas das amostras de água foram realizadas em três pontos estratégicos ao longo da rodovia Poconé–Porto Cercado, selecionados por sua relevância hidrológica e por apresentarem diferentes dinâmicas de fluxo: o Rio Bento Gomes (Ponto 1), um corixo localizado às margens da estrada (Ponto 2) e o Rio Cuiabá (Ponto 3). Essa amostragem em gradiente permitiu a análise de organismos em ambientes com diferentes velocidades de correnteza e níveis de conectividade, refletindo a heterogeneidade típica dos sistemas aquáticos pantaneiros

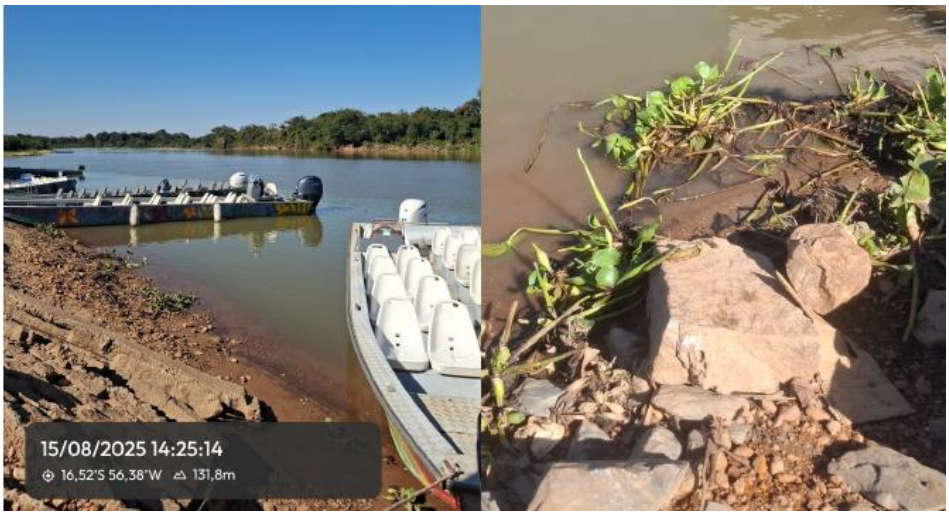


Figura 01: Local de coleta no Rio Cuiabá.
Fonte: Autoral (2025)

Para a captura das comunidades fitoplanctônicas, utilizou-se uma rede de plâncton com malha de abertura micrométrica, instrumento fundamental para a concentração de algas presentes na zona eufótica da coluna d'água. Imediatamente após a coleta, as amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno devidamente higienizados e submetidas a um processo de fixação em solução conservante de álcool e formol, procedimento técnico indispensável para a manutenção das características morfológicas e estruturas celulares necessárias para a precisão na identificação taxonômica posterior.



Figura 02: Momento da coleta de água superficial.
Fonte: Autoral (2025)

As análises físico-químicas das amostras de água foram realizadas no Laboratório de Físico-Química de Água e Resíduos, enquanto a etapa de processamento e análise biológica foi conduzida no Laboratório de Microbiologia Aplicada. Ambos os laboratórios pertencem ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia (FAET) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). A identificação das algas ocorreu por meio de observação minuciosa em microscópio óptico de luz transmitida, realizando-se a varredura de lâminas para o reconhecimento dos gêneros e grupos funcionais predominantes.

De forma concomitante à coleta biológica, realizou-se a caracterização limnológica *in situ* dos corpos hídricos utilizando-se uma sonda multiparâmetros de alta precisão. Foram mensuradas variáveis físico-químicas determinantes para o metabolismo desses produtores primários, incluindo temperatura da água, oxigênio dissolvido, saturação de oxigênio, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos (STD), salinidade, pH e turbidez. A avaliação da conformidade ambiental desses parâmetros tomou como referência os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces de Classe 2, que são destinadas à proteção das comunidades aquáticas e ao abastecimento público após tratamento convencional. Essa abordagem metodológica integrada assegura a robustez dos dados científicos e reforça o potencial pedagógico do estudo, servindo de base para o desenvolvimento de estratégias de educação ambiental fundamentadas na realidade ecológica local.



Figura 03: Momento da coleta de dados físico-químicas.
Fonte: Autoral (2025)

Resultados e Discussão

Análise dos Parâmetros Físico-Químicos

Os dados físico-químicos obtidos (Tabela 1) indicam que o sistema hídrico apresenta conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para águas de Classe 2. Observou-se um pH levemente alcalino (8,14) e níveis adequados de Oxigênio Dissolvido (9,03 mg/L). Contudo, o valor de saturação de OD (110,2%) sugere um estado de supersaturação, frequentemente associado à elevada atividade fotossintética da comunidade fitoplanctônica presente. Esses fatores, aliados à condutividade de 83,3 $\mu S/cm$, criam o ambiente propício para o desenvolvimento das espécies identificadas, refletindo um ecossistema com produtividade biológica ativa e disponibilidade de nutrientes característica do período amostrado.

Parâmetro	Valor obtido	Unidade	Referência CONAMA 357/2005 (Classe 2)
Temperatura	24,9	°C	–
Pressão atmosférica	748,7	mmHg	–
Oxigênio dissolvido (OD)	9,03	mg/L	≥ 5,0 mg/L
Saturação de OD	110,2	%	–
Condutividade elétrica	83,3	µS/cm	–
Sólidos totais dissolvidos	53,95	mg/L	≤ 500 mg/L
Salinidade	0,04	ppt	–
pH	8,14	–	6,0 – 9,0
Turbidez	21	NTU	≤ 100 NTU

Tabela 01: Parâmetros físico-químicos.
Fonte: Autoral (2026)

Análise das coletas

A análise taxonômica das algas identificadas nas amostras de água coletadas ao longo da rodovia Poconé–Porto Cercado evidenciou composição diversificada, totalizando 11 espécies distribuídas entre os principais grupos de algas de água doce. Esse resultado reflete a heterogeneidade dos ambientes aquáticos estudados no Pantanal de Poconé, indicando a influência de diferentes condições hidrológicas e tróficas na estrutura da comunidade fitoplanctônica.

As clorofíceas e desmídias foram os grupos mais representativos em número de espécies, com destaque para Hariotina reticulata, Pediastrum duplex, Desmodesmus sp., Staurastrum sp. e Closterium sp.. Esses organismos são frequentemente associados a diferentes condições ecológicas, podendo ocorrer em ambientes relativamente preservados ou sob leve enriquecimento de nutrientes, contribuindo para a caracterização da dinâmica ambiental local.

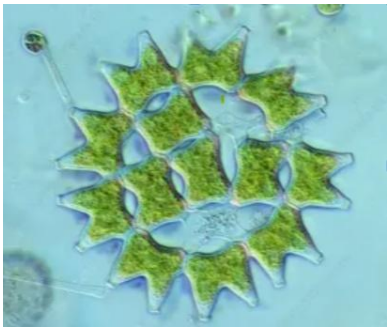


Figura 04: Pediastrum sp (Clorofícea).
Fonte: https://www.biolib.cz (2026)



Figura 05: Phacus sp. (Euglenofícea).
Fonte: https://www.biolib.cz (2025)

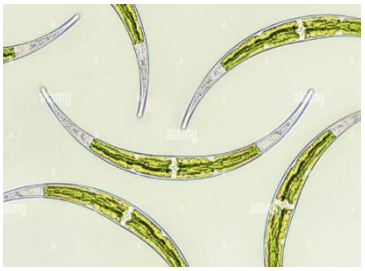


Figura 06: Closterium sp (Clorofícea).
Fonte: https://www.alamy.com/closterium-sp (2026)

O grupo das euglenófitas, representado por Phacus sp., Euglena sp. e Trachelomonas sp., é amplamente reconhecido como indicador de elevada carga de matéria orgânica e condições de menor qualidade da água, sendo comumente associado a ambientes com maior influência de processos de decomposição e enriquecimento nutricional. As diatomáceas, representadas por Navicula sp. e Aulacoseira sp., são consideradas bioindicadoras sensíveis de variações físico-químicas e, em geral, estão relacionadas a ambientes com maior estabilidade e melhor qualidade ambiental. Já as cianobactérias, evidenciadas por Microcystis sp., estão frequentemente associadas a processos de eutrofização, podendo indicar enriquecimento excessivo de nutrientes e desequilíbrio ecológico.

PRINCIPAIS ESPÉCIES DE ALGAS IDENTIFICADAS		
Grupo Taxonômico	**Gênero / Espécie**	**Importância / Bioindicação**
Clorofícea	***Pediastrum sp***	Comum em águas ricas em nutrientes; indicadora de águas paradas ou de baixa correnteza.
Desmídias	***Closterium sp.***	Comuns em águas com boa disponibilidade de nutrientes.
Diatomáceas	***Navicula sp.***	Vivem geralmente aderidas a algum substrato, como raízes de plantas aquáticas, como aguapés
	Aulacoseira sp.	Típica de ambientes lóticos (rios); gostam de ambientes túrbidos
Cianobactérias	***Microcystis sp.***	Podem formar florações tóxicas e indicar excesso de matéria orgânica
Euglenofícea	***Euglena sp.***	Indicadoras de ambientes ricos em matéria orgânica e desequilíbrio
	Trachelomonas sp.	Identificada pela carapaça rígida (lorica); indica águas com orgânica em decomposição.

Tabela 02: Principais espécies de algas identificadas.
Fonte: Autoral (2026)

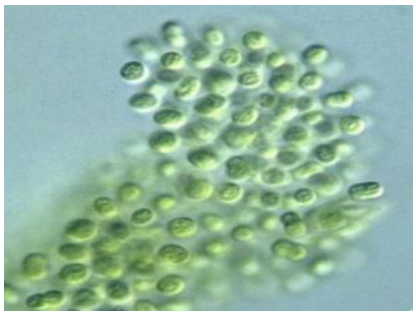


Figura 07: Microcystis sp (Cianobactéria).
Fonte: https://www.biolib.cz (2026)

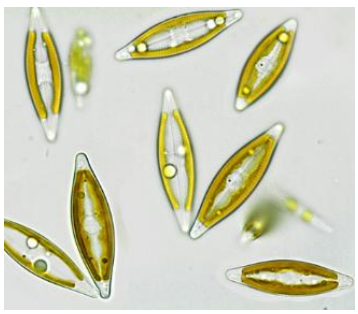


Figura 08: Navicula sp (Diatomácea).
Fonte: https://naturalhistory.museumwales.ac.uk/diatoms (2026)



Figura 09: Trachelomonas sp (Euglenofícea).
Fonte: https://www.alamy.com/closterium-sp (2026)

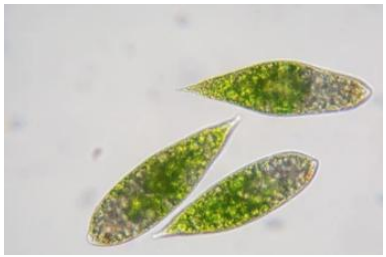


Figura 10: Euglena sp (Euglenofícea).
Fonte: https://www.alamy.com/closterium-sp (2026)

Observou-se um gradiente espacial na composição das algas entre os pontos amostrados. No Rio Bento Gomes e no corpo hídrico do tipo corixo adjacente à estrada, verificou-se maior riqueza e diversidade de espécies, com predominância de algas associadas a ambientes com maior disponibilidade de matéria orgânica. Esse padrão está relacionado ao período de estiagem na região, no qual ocorre redução do volume hídrico, concentração de nutrientes e consequente alteração nas condições tróficas, favorecendo o desenvolvimento de algas oportunistas.

Por outro lado, no Rio Cuiabá foi registrada menor riqueza de espécies, o que pode estar associado às suas características hidrodinâmicas, como maior volume de água e maior capacidade de diluição. Essas condições tendem a promover maior estabilidade ambiental e menor concentração de nutrientes na coluna d'água, influenciando diretamente a estrutura da comunidade fitoplanctônica.

Do ponto de vista ecológico, as algas desempenham papel central como bioindicadores da qualidade da água, uma vez que sua composição e abundância respondem rapidamente a alterações ambientais. A predominância de diatomáceas está geralmente associada a melhores condições de qualidade da água, enquanto a presença de euglenófitas e cianobactérias pode indicar aumento da carga orgânica e possível processo de eutrofização. Dessa forma, a análise do fitoplâncton permite inferir o estado trófico dos ecossistemas aquáticos e identificar variações ambientais entre os diferentes pontos amostrados.

Além disso, a utilização das algas como ferramenta de estudo apresenta elevada relevância para a educação ambiental, pois possibilita a compreensão prática das interações entre biodiversidade, qualidade da água e impactos ambientais. A observação desses organismos microscópicos contribui para a sensibilização sobre a importância da conservação dos recursos hídricos e para o entendimento dos processos ecológicos que estruturam os ecossistemas do Pantanal.

Considerações Finais

O presente estudo evidenciou de forma clara a significativa diversidade de algas de água doce na região de Porto Cercado, município de Poconé (MT), destacando com precisão sua relevância estratégica como bioindicadores da condição trófica e da integridade ambiental dos corpos hídricos analisados na bacia pantaneira. A composição taxonômica da comunidade fitoplanctônica apresentou variações nítidas entre os pontos amostrados, refletindo a elevada heterogeneidade ambiental da região e as marcantes influências sazonais típicas do período de estiagem no Pantanal. Este regime hidrológico, caracterizado pela retração dos espelhos d'água, promove a concentração natural de nutrientes e a alteração drástica de variáveis físico-químicas como a condutividade e o oxigênio dissolvido, fatores que moldam a sucessão das espécies microscópicas.

A presença de grupos funcionais distintos, com destaque para a ocorrência de diatomáceas, euglenófitas e cianobactérias, permitiu inferir diferentes níveis de qualidade da água entre os ambientes avaliados, evidenciando um gradiente ecológico intrinsecamente associado às características hidrodinâmicas locais e ao aporte de matéria orgânica. Tais resultados corroboram a elevada sensibilidade das algas às pressões ambientais e antrópicas, consolidando seu papel como uma ferramenta de monitoramento ecológico de baixo custo e alta eficiência para a gestão de ecossistemas aquáticos complexos.

Para além do rigor científico e do caráter ecológico, a investigação acerca das comunidades algais demonstra uma relevância singular no contexto da educação ambiental, ao viabilizar a integração entre a observação científica laboratorial e a compreensão sistêmica dos processos ecológicos em nível microscópico, muitas vezes invisíveis aos olhos do público geral. Esta abordagem pedagógica facilita a tradução de conceitos limnológicos complexos em informações palpáveis, contribuindo diretamente para a formação de uma consciência crítica sobre a fragilidade dos recursos hídricos e a urgência na preservação dos ecossistemas pantaneiros frente às mudanças globais.

Dessa forma, conclui-se que o monitoramento contínuo das algas constitui um instrumento indispensável de diagnóstico ambiental e um suporte valioso para práticas de educação ambiental transformadoras, sendo fundamental para o entendimento da dinâmica biológica e da resiliência dos ambientes aquáticos do Pantanal. Assim, as algas se consolidam não apenas como sentinelas biológicas da qualidade da água, mas também como um elo poderoso para a sensibilização social e a construção coletiva de uma ética de conservação ambiental para as futuras gerações.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Universidade Federal de Mato Grosso e, de modo especial, ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, pelo imprescindível apoio institucional e pelo constante incentivo ao desenvolvimento da pesquisa científica e à submissão de trabalhos acadêmicos em eventos de grande relevância, como o 5º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental.

Um agradecimento especial à Dra. Daniela Maimoni de Figueiredo, cuja orientação e acompanhamento em todas as etapas da pesquisa, em especial durante as coletas de campo na região do Pantanal, foram os alicerces para o sucesso deste estudo. Estendemos nossa gratidão às técnicas Rossean, Luana e Aline, pelo suporte técnico, auxílio no manejo das amostras e pela disponibilidade que viabilizou as análises deste projeto.

Referências Bibliográficas

BARSANO, P. R.; BARBOSA, R. P.; VIANA, V. J. **Biologia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2014. *E-book*.

BICUDO, C. E. M.; MENEZES, M. **Gêneros de algas de águas continentais do Brasil**: chave para identificação e descrições. 3. ed. São Carlos: RiMa, 2017.

BICUDO, C. E. M.; BICUDO, D. C. (org.). **Amostragem em limnologia**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Standard methods for the examination of water and wastewater**: métodos de coleta e análise de amostras de água. São Paulo: CETESB, 2011.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FELLENBERG, G. **Introdução aos problemas da poluição ambiental**. São Paulo: EPU, 1980.

HECKMAN, C. W. **The Pantanal of Poconé**: biota and ecology in the northern section of the world's largest pristine wetland. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.

JACOBI, P. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. **Cadernos de Pesquisa**, São Paulo, n. 118, p. 189-205, mar. 2003.

JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. *In*: DODGE, D. P. (ed.). **Proceedings of the International Large River Symposium**. Ottawa: Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 106, p. 110-127, 1989.

LOVERDE-OLIVEIRA, S. M.; HUSZAR, V. L. M. Phytoplankton ecological responses to the flood pulse in Pantanal lakes (Brazil). **Hydrobiologia**, [s. l.], v. 583, n. 1, p. 147-159, 2007.

REYNOLDS, C. S. **The ecology of phytoplankton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

SILVA, J. S. V.; ABDON, M. M. Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, p. 1703-1711, out. 1998.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL: CONTRIBUIÇÃO PARA RESILIÊNCIA CLIMÁTICA URBANA

1 Leda Maria de Almeida Nelo, 2 Luanne Gabriela Barbosa Pereira
1 Universidade Nove de Julho -UNINOVE, e-mail: leda.nelo@uni9.edu.br; 2 Faculdade Metropolitana, e-mail:luannepereira23@gmail.com

Palavras-chave: Justiça climática; Meio ambiente; Mudanças climáticas.

Resumo

A expansão urbana caótica potencializa riscos climáticos, ameaçando a saúde, a segurança alimentar e a infraestrutura urbana. No contexto da vulnerabilidade urbana atribuída aos riscos ambientais, a educação ambiental é um pilar essencial no combate e busca disseminar saberes acerca das crises socioambientais, adotando práticas sustentáveis para o equilíbrio ambiental e a resliência urbana. O estudo busca fortalecer a adaptação e a resiliência climática, com o objetivo de identificar como a educação ambiental contribui para a resiliência climática. A metodologia configura-se em um estudo descritivo com abordagem qualitativa, através do levantamento bibliográfico para a revisão da literatura, utilizando bases de dados ScienceDirect, Periódicos Capes e Google Acadêmico, considerando publicações entre 2020 e 2025. Os resultados indicam que os estudos fundamentados na literatura, mesmo havendo alinhamento da educação ambiental às suas diversas terminologias, a educação ambiental oferece contribuições variadas, e um forte vies investigativo. A revisão bibliográfica permitiu mostrar que a educação ambiental permeia diversas áreas do conhecimento, conectando-se a variadas temáticas, e sendo alicerce para conscientização e engajamento.

Introdução

A urbanização desordenada e supressiva potencializa as mudanças climáticas, ameaçando a infraestrutura, a saúde e a segurança alimentar nas cidades. Eventos como inundações, deslizamentos, ondas de calor e má qualidade do ar tornaram-se crises recorrentes no ambiente urbano global. Somado a isso, observa-se o aprofundamento da injustiça socioambiental, uma vez que as populações periferizadas e comunidades tradicionais constituem os grupos mais afetados por tais eventos (Jacobi; Pombo, 2025).

Para mitigar esse cenário, o IPCC (2022) enfatiza a adaptação através de mudanças adaptativas (estruturais ou ecológicas, reativas ou preventivas) como resposta imperativa para a redução de riscos. Neste cenário, a educação ambiental atua como uma estratégia estruturada para elevar a conscientização sobre as problemáticas ecológicas (Gabaudan, 2022. Seu propósito é engajar as indivíduos, fomentando o conhecimento, valores e motivação essenciais para a preservação e melhoria do meio ambiente (Gabaudan, 2022).

A educação ambiental é um pilar essencial no combate à crise ecológica global, que abrange desde a destruição de habitats até as mudanças climáticas (Salazar et al., 2024). Visto que, segundo Sitorus e Wiyami (2024), os efeitos do clima já afetam todo o planeta, é urgente que as pessoas se posicionem como agentes transformadores, agindo ativamente para mitigar os desafios ambientais agora e no futuro. Sob essa ótica, a educação configura-se como um processo político não neutro, focado na formação autônoma do indivíduo. Esse processo incorpora a historicidade, os valores e a cultura constituintes dos sujeitos, acompanhando-os em sua trajetória existencial (FREIRE, 2018).

Neste contexto, a educação ambiental busca disseminar saberes acerca das crises ecológicas e suas alternativas de mitigação, promovendo a atuação ativa da sociedade em prol da preservação ambiental e da utilização sustentável dos recursos naturais (Gabaudan, 2022; Keong, 2020; Board, 2019). A intensificação da segregação socioambiental sublinha a imperatividade de estratégias inovadoras, evidenciando a ineficácia dos métodos convencionais na promoção da resiliência urbana (Anguelska; Carmin, 2015).

Portanto, torna-se urgente a adoção de novas práticas sustentáveis (Almond et al., 2020; Díaz-Lópes, 2020). Diante disso, a educação ambiental é essencial para incentivar a sociedade a agir de forma mais sustentável e equilibrada ambientalmente para a resiliência em geral (Broman; Robèrt, 2017).

Pretende-se, portanto, que esta pesquisa agregue valor à literatura, evidenciando a educação ambiental como elemento crucial para intervenções transformadoras. Busca-se, assim, fortalecer a adaptação e resiliência climática urbana, transcedendo o escopo particular da investigação.

Em razão disso, este artigo tem por objetivo identificar de que maneira a educação ambiental contribui para a resiliência climática, explorando os diversos focos investigativos voltados a essa temática.

Referencial Teórico

Educação Ambiental e Adaptação Climática

A educação climática é o processo de estruturar saberes e condutas essenciais para o enfrentamento da crise do clima, sendo um pilar central da justiça ambiental (Jorgenson et al., 2019; Trott et al., 2023). Esta última investiga a desigualdade na partilha de impactos e recursos naturais, destacando que populações marginalizadas costumam sofrer mais com os riscos ecológicos enquanto possuem menor acesso à formação e ao letramento climático (Hendricks; Van Zandt, 2021).

Trott et al. (2023) sustentam que a junção de fatores como mudanças climáticas e disparidades educacionais e ambientais é uma das questões mais críticas enfrentadas neste século.

A disparidade na educação climática é um padrão global que impõe escolhas complexas aos países em desenvolvimento, enfrentam o desafio de conciliar carências educacionais imediatas com o aporte necessário para o letramento climático.

Conforme Sageidet e Heggen (2021), a educação voltada ao clima é tratada pela UNESCO como um pilar essencial do ensino de qualidade. Nessa diretriz, o domínio de conhecimentos climáticos é elevado ao status de direito humano, sendo fundamental para o exercício da cidadania e para a sustentabilidade. Sob essa ótica, a falta de equidade no acesso a essa formação é vista como uma violação que prejudica tanto o progresso individual quanto a estabilidade social.

A educação ambiental é uma ferramenta transformadora para a adaptação às mudanças climáticas. Neste sentido, Feinstein e Mach (2020) propõem três eixos políticos interconectados para a educação: o fortalecimento da infraestrutura educacional (foco em resiliência), a melhoria dos índices educacionais gerais (foco em adaptação) e o suporte à aprendizagem para a adaptação (foco em mudança social). Os autores destacam que, embora os três eixos sejam relevantes, é o apoio à aprendizagem para adaptação que oferece a contribuição mais transformadora.

A adaptação climática tende a ser inserida em estruturas de planejamento urbano já vigentes, operando como uma extensão são de políticas setoriais em vez de uma nova diretriz (Uittenbroek et al., 2014). Por sua natureza interconectada, o planejamento urbano é a ferramenta ideal para promover essa adaptação, integrando esforços de diversas áreas públicas (Teixeira; Pessoa, 2021). Para Mauad (2018), a intersetorialidade no planejamento urbano possibilita a elaboração de estratégias de mitigação climática, resultado, consequentemente, em ganhos socioambientais na escala local.

Reconhecidas como decisivas no contexto das mudanças climáticas, as áreas urbanas concentram esforços em mitigação e adaptação, consolidando-se como atores principais nesse enfrentamento, como apontado anteriormente (Huitema; Boasson; Beunen, 2018).

Nessa perspectiva, observa-se que, apesar do planejamento urbano ser um instrumento crucial para a adaptação climática, ele constitui um desafio prático. Segundo Chu, Anguelovski e Roberts (2017), há uma resistência local na incorporação dessas estratégias, visto que o planejamento urbano é indissociável da regulação fundiária e dos valores da terra.

Justiça Climática e Racismo Ambiental

Segundo a EEA (2024), a vulnerabilidade das pessoas aos riscos climáticos é determinada pela combinação de três fatores: a intensidade da exposição ao perigo, a localização geográfica onde vivem e sua situação socioeconômica. Por outro lado, O IPCC (2023) aponta para uma lacuna de adaptação urbana, constatando que a maioria das cidades ainda não está preparada para os riscos que enfrenta. Neste contexto, as pessoas vivenciam os impactos climáticos de forma distinta, apresentando níveis variados de vulnerabilidade, apesar de enfrentarem as mesmas ameaças. Swanson (2021) categoriza o cenário urbano em duas frentes: a elite, protegida dos efeitos climáticos, e os pobres, altamente vulneráveis. Conforme corroborado por Tee Lewis et al. (2023), essa estruturação social resulta em uma distribuição desigual dos impactos climáticos, afetando desproporcionalmente os vulneráveis.

Consequentemente, discutir justiça climática urbana implica reconhecer que a vulnerabilidade social potencializa os riscos climáticos, exigindo, por sua vez, o fortalecimento da capacidade adaptativa das comunidades.

Ao planejar a adaptação às mudanças climáticas nas cidades, a justiça é estruturada em quatro pilares principais, conforme apontam Juhola et al. (2022) e Prall et al. (2023): reconhecimento, distribuição, procedimento e reparação. Reconhecimento, sob a ótica das mudanças climáticas nas cidades, refere-se à compreensão das influências estruturais sobre a (in) justiça, operando, por exemplo, através do campo político e das políticas públicas (Fraser, 2005). A distribuição diz respeito à forma como os riscos e as medidas de adaptação climática são repartidos no espaço urbano e entre os diferentes grupos populacionais Prall et al., 2023. Juhola et al. (2022) definem o procedimento de planejamento da adaptação como o exame da inclusão e da representação populacional nas decisões tomadas. Entendida como uma nova dimensão tradicional da justiça, a restauração envolve o reconhecimento dos danos passados ou presentes das mudanças climáticas e injustiças, responsabilizando os atores envolvidos.

A justiça climática, segundo Sultana (2022b, p. 118), concentra-se em como a crise climática afeta as populações de maneira desigual. Ela envolve, fundamentalmente, corrigir essas injustiças de forma justa, com o propósito de combater a opressão e fomentar a equidade. Sob essa ótica, a justiça climática fundamenta-se nos princípios da justiça ambiental para integrar direitos humanos e desenvolvimento, promovendo uma perspectiva centrada no ser humano (Sultana, 2022b; Wolverton et al., 2023).

Segundo Agyemang et al. (2024), Cole e Foster (2000), o racismo ambiental é a distribuição desigual de riscos, penalizando desproporcionalmente pessoas de cor e populações pobres em relação às mais ricas e brancas.

Resiliência Urbana

Para maximizar a resiliência das cidades, é necessário implementar um plano unificado que enfrente, de forma integrada, os desafios ambientais, sociais, econômicos e de inundações. Isso exige mudanças estruturais nas práticas e políticas, fomentando o trabalho colaborativo entre diferentes setores (Starkey et al., 2025).

Segundo Adger (2000), a resiliência define a capacidade de adaptação e recuperação diante de estresses externos. Ribeiro e Gonçalves (2019) observam empiricamente que comunidades resilientes se adaptam com maior eficácia a desastres, restaurando sua funcionalidade. Conclui-se, assim, que a resiliência abrange a habilidade de resistir a perturbações e recuperar o equilíbrio, podendo restabelecer a linha de base original ou evoluir para um novo estado (Ribeiro; Gonçalves, 2019).

Segundo Holling (1973), a resiliência foi introduzida na ciência para medir o quanto sistemas ecológicos conseguem absorver mudanças — sejam elas nas variáveis de estado, de condução ou parâmetros — e ainda assim continuar existindo. Nessa perspectiva, o autor distingue a resiliência (a propriedade de absorver mudanças) do resultado dessa propriedade (a persistência ou extinção do sistema).

Fortalecer a resiliência é crucial para comunidades urbanas, com ênfase especial nas áreas mais vulneráveis. Apesar do caráter trágico dos desastres, os processos de reconstrução oferecem uma chance ímpar de corrigir falhas estruturais, minimizando riscos futuros e aumentando a capacidade de adaptação local (Tumini et al., 2017).

A resiliência urbana pode ser construída de baixo para cima, quando os moradores assumem o protagonismo no planejamento e na governança, fortalecendo laços sociais que consolidam a identidade local (Ercoskun; Ozuduru, 2014; Gunduz; Oner; Knox, 2016) .

Adicionalmente, no contexto da mitigação - adaptação às mudanças climáticas e da definição do uso dos recursos naturais, o modelo de desenvolvimento, governança e construção das cidades exerce influência direta na sustentabilidade e resiliência, transbordando os limites físicos urbanos (Klug, 2018).

O V Relatório de Avaliação do IPCC (2014) conceitua resiliência como a habilidade de sistemas socioecológicos e econômicos gerenciarem eventos adversos. Ela permite que esses sistemas mantenham sua integridade, identidade e funcionamento, enquanto evoluem através de adaptação e transformação em resposta às mudanças.

Saccaro Junior e Coelho (2016) defendem que, para garantir cidades sustentáveis e com maior bem-estar, é indispensável integrar diversos pilares, tais como: governança, instituições, crescimento econômico, planejamento e capacidades técnicas, sempre respeitando os limites ambientais e tecnológicos.

Para Jacobi e Pombo (2025),A busca crescente por resiliência urbana e pela reintegração da natureza nas cidades exige, fundamentalmente, uma abordagem baseada na participação ativa da sociedade e no intercâmbio efetivo de saberes.

Material e Métodos

Esta pesquisa configura-se como um estudo descritivo de abordagem qualitativa, fundamentado na compreensão interpretativa dos fenômenos e na diversidade de instrumentos para coleta de dados (Flick, 2009; Kripka et al., 2015). O percurso metodológico baseou-se em uma revisão bibliográfica estruturada em três etapas: (i) levantamento bibliográfico pelas plataformas de dados ScienceDirect, Periódicos CAPES e a biblioteca Google Acadêmico, utilizando o cruzamento dos termos “communities “ and “environment” and climate change”, considerando dois fatores-chave, título e palavras-chave, no recorte temporal de 2020 a 2025; (ii) a triagem baseada na aderência de títulos e palavras-chave, resultando em sete artigos nacionais; e (iii) análise qualitativa final, aplicando critérios de inclusão específicos que exigiam a presença de termos correlatos à educação ambiental (crítica), meio ambiente, emergência climática, justiça climática, mudanças climáticas tanto nos títulos quanto nas palavras-chave (Quadro 1).

SEQUÊNCIA	TÍTULO	AUTORES	PALAVRAS-CHAVE
01	Educação Ambiental e Mudanças Climáticas: Análise do Programa Escolas Sustentáveis	Oliveira et al., 2021	Educação ambiental; Políticas públicas; Mudanças climáticas Projeto pedagógico.
02	A Educação Ambiental Frente ao Desafio da Crise Climática na Visão de um Material Pedagógico da UNESCO Reprodutivista ou Transformadora	Pedrosa; Tamoio, 2022	Educação ambiental crítica; Educação para o Desenvolvimento Sustentável; Emergência climática, Comunidades escolares.
03	Educação Ambiental no Desenvolvimento das Mudanças Climáticas: Um Estado de Arte	Taverna; Pedroso, 2024	Mudanças climáticas; Educação ambiental; Meio ambiente; Estado de arte.
04	A Abordagem das Mudanças Climáticas na Educação Ambiental de Escolas Públicas: Uma Revisão Integrativa	Pires et al., 2025	Emergência Climática; Educação ambiental crítica; Sustentabilidade; Escola pública; Brasil.
05	A Educação Ambiental Crítica como Promotora de uma Justiça Ambiental	Da Silva; Chaves, 2025	Favelas; Áreas de risco; Justiça ambiental; Educação ambiental crítica.
06	Educação Ambiental e Mudanças Climáticas: Percepções de Estudantes de uma Instituição Federal de Ensino a Respeito dos Impactos Socioeconômicos e Ambientais.	Grings et al., 2025	Meio ambiente; Ações antrópicas; IFRS Campus Rolante; Ecossistema.
07	Etnoecologia e Educação Ambiental Sobre Manguezais com Indígenas.	Oliveira; De Queiroz; Maia, 2021	Comunidades tradicionais; Mangue; Meio ambiente.

Quadro 1: Levantamento bibliográfico coletado para análise.
Fonte: Autoras (2026)

A literatura científica selecionada (Quadro1), a serem analisadas, não aborda exatamente o mesmo tema deste estudo; contudo, foi considerada importante por alinhar-se aos fatores -chave descritos na seção material e métodos definidos para a busca.

Resultados e Discussão

Os resultados da revisão bibliográfica são apresentados a seguir, analisados à luz da literatura referenciada no Quadro 1 e estruturados conforme os fatores-chave e critérios estabelecidos.

A análise bibliográfica confirma que todos os artigos cumprem as regras definidas, e contêm, ao menos, um dos termos alinhados ao título deste estudo. Constatou-se também uma similaridade entre as palavras-chave, conforme consta no Quadro 2.

SEQUÊNCIA	TERMOS ALINHADOS	PALAVRAS-CHAVE SIMILAR
01	Educação ambiental e Mudanças climáticas	Mudanças climáticas
02	Educação ambiental	Educação ambiental crítica e Emergência climática
03	Educação ambiental e Mudanças climáticas	Mudanças climáticas e Meio ambiente
04	Mudanças climáticas e Educação ambiental	Emergência climática
05	Educação ambiental Crítica	Educação ambiental
06	Educação ambiental e Mudanças climáticas	Meio ambiente
07	Educação ambiental	Meio ambiente

Quadro 2: Similaridade de termos e palavras-chave.
Fonte: Autoras (2026)

Os resultados indicam que, apesar das semelhanças terminológicas nos títulos e palavras-chave (Quadro 2), os estudos científicos oferecem contribuições singulares para educação ambiental e abordagens distintas para o foco investigativo, conforme evidenciado no Quadro 3.

SEQUÊNCIA	CONTRIBUIÇÃO À EDUCAÇÃO AMBIENTAL	FOCO INVESTIGATIVO
01	Transformações socioambientais	Ambiente escolar
02	Material pedagógico	Ambiente escolar
03	Desenvolvimento de ações	Ambiente educacional
04	Formação de indivíduos engajados	Ambiente escolar
05	Conscientização social	Justiça ambiental
06	Conscientização social	Ambiente universitário
07	Capacitação	Sustentabilidade da população

Quadro 3: Conceitos da literatura analisada.
Fonte: Autoras (2026)

Os dados do Quadro 2 e Quadro 3, fundamentados na literatura, demonstram um esforço organizado para alinhar a educação ambiental às suas diversas terminologias. A educação ambiental oferece contribuições variadas para a consonantização social que através do desenvolvimento de ações propõem as transformações socioambientais (Silva; Chaves, 2025; Grings et al., 2025; Taverna; Pedroso, 2023; Oliveira et al., 2021). O fomento de práticas sustentáveis, fortalece a formação e capacitação de indivíduos engajados (Oliveira; De Queiroz; Maia, 2021; Pires et al., 2025), por meio de práticas sustentáveis. Utilizando ferramentas que vão desde materiais pedagógicos (Pedrosa; Tamoio, 2022) até estratégias de resiliência e adaptação climática.

Os resultados evidenciam um forte viés investigativo, concentrando-se majoritariamente no ambiente escolar para abordar a educação ambiental e as mudanças climáticas como ferramentas de sustentabilidade e adaptação (Oliveira et al., 2021; Pedrosa; Tamoio, 2022; Taverna; Pedroso, 2024; Pires et al., 2025). Em contrapartida, o contexto universitário surge como um impulsionador de percepções voltadas ao respeito socioambiental (Grings et al., 2025). No âmbito social, destaca-se a justiça ambiental como fator decisivo para a resiliência em favelas e comunidades, (Silva; Chaves, 2025), e adicionando a etnoecologia na educação ambiental para a sustentabilidade de uma população (Oliveira; De Queiroz; Maia, 2021).

Considerações Finais

A revisão bibliográfica realizada mostra que a Educação Ambiental permeia diversas áreas do conhecimento, conectando-se a variadas temáticas de forma interdisciplinar. Como apontam Costa e Loureiro (2017) e Nogueira (2023), essa prática investigativa não ignora as teias socioambientais, mas as integra para compreender a relação homem-universo. Em suma, a Educação Ambiental é o alicerce para o engajamento e a conscientização, sendo indispensável para construir cidades mais resilientes e sustentáveis diante dos desafios climáticos atuais.

Ademais, infere-se que a educação ambiental,sustenta-se em diferentes paradigmas, agregando conhecimento e promovendo ações mitigadoras através do uso sustentável de suas competências.

Agradecimentos

As Autoras agradecem a Universidade Nove de Julho pela bolsa de Doutorado e Mestrado concedidas.

Referências Bibliográficas

A SILVA, Dinário Dutra; CHAVES, Fredson Rocha. A Educação Ambiental Crítica como promotora de uma justiça ambiental. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 20, n. 5, p. 173-185, 2025.

ADGER, W. Neil. Social and ecological resilience: are they related?. Progress in human geography, v. 24, n. 3, p. 347-364, 2000.
AGYEMANG, Gloria. Let's have a relook at accountability. The British Accounting Review, v. 56, n. 1, p. 101262, 2024.

ALMOND, R. et al. Relatório Planeta Vivo 2020: revertendo a curva da perda de biodiversidade. [S. l.]: WWF, 2020.

ANGUELSKA, Antonia; CARMIN, Joann. Something borrowed, everything new: innovation and institutionalization in urban Climate governance. Current Opinion inEnvironmental Sustainability, v. 13, p. 17-24, 2015.

Board, U. E. Education for Sustainable Development (ESD) beyond. 2019.

BROMAN, Göran Ingvar; ROBÈRT, Karl-Henrik. Um quadro para o desenvolvimento estratégico sustentável. Revista de produção mais limpa , v. 140, p. 17-31, 2017.

CHU, E.; ANGUELOVSKI, I.; ROBERTS, D. Climate adaptation as strategic urbanism: assessing opportunities and uncertainties for equity and inclusive development in cities. Cities, v. 60, p. 378-387, 2017.

COLE, Luke W.; FOSTER, Sheila R. From the ground up: Environmental racism and the rise of the environmental justice movement. NYU Press, 2001.

COSTA, C. S., LOUREIRO, C. F. B. A interdisciplinaridade em Paulo Freire: aproximações político-pedagógicas para a Educação Ambiental critica. Revista Katálysis. v. 20, n. 1, p. 111 – 121, 2017.

DE BRITTO PEDROSA, Rebekah Farias Cardoso; TAMAIO, Irineu. A Educação Ambiental frente ao desafio da crise climática, na visão de um material pedagógico da Unesco: reprodutivista ou transformadora?. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 17, n. 6, p. 227-246, 2022.

DÍAZ-LÓPEZ, C. et al. Dinâmica das mudanças nas zonas climáticas e demanda energética em edifícios: um estudo de caso na Espanha. [S. l.: s. n.], 2020.

BERGER, Tania et al. Towards just resilience. Dr Kaustuv Kanti Bandyopadhyay, Director, PRIA, p. 171, 2023.

ERCOSKUN, Ozge; OZUDURU, Burcu. Urban resilience and main streets in Ankara. International Development Planning Review, v. 36, n. 3, p. 313-336, 2014.

FEINSTEIN, N. W.; MACH, K. J. Three roles for education in climate change adaptation. Climate policy, v. 20, n. 3, p. 317-322, 2020.

FLICK, Uwe. Introdução à pesquisa qualitativa. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

FRASER, Nancy. Social justice in the age of identity politics: Redistribution, recognition, and participation. In: Geographic thought. Routledge, 2008. p. 72-89.

FRASER, Nancy. Re-framing justice in a globalizing world. In: (Mis) recognition, social inequality and social justice. Routledge, 2007. p. 29-47.

FREIRE, Paulo. Conscientização. Cortez Editora, 2018. GABAUDAN, Odette. Em uma jornada rumo à Educação para o Desenvolvimento Sustentável no currículo de línguas estrangeiras. Aprendizagem de Línguas no Ensino Superior , v. 12, n. 2, p. 525-546, 2022.

GRINGS, Jacques André et al. Educação Ambiental e mudanças climáticas: percepções de estudantes de uma instituição federal de ensino a respeito dos impactos socioeconômicos e ambientais. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 20, n. 2, p. 334-353, 2025.

GUNDUZ, Can; ONER, Asli Ceylan; KNOX, Paul L. Social resilience in Aegean slow cities: slow city Seferihisar. Universal Journal of Management, v. 4, n. 4, p. 211-222, 2016.

Hendricks, M. D., & Van Zandt, S. (2021). Unequal protection revisited: Planning for environmental justice, hazard vulnerability, and critical infrastructure in communities of color. Environmental justice, 14(2), 87-97.

HOLLING, Crawford S. et al. Resilience and stability of ecological systems [em linha]. 1 nov. 1973.

HUITEMA, D.; BOASSON, E. L.; BEUNEN, R. Entrepreneurship in climate governance at the local and regional levels: concepts, methods, patterns, and effects. Regional Environmental Change, v. 18, p. 1247-1257, 2018.

IPCC,2023- JUHOLA, Sirkku et al. Connecting climate justice and adaptation planning: An adaptation justice index. Environmental Science & Policy, v. 136, p. 609-619, 2022.

IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. EUA, 2014. Disponível em:<https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.

JACOBI, Pedro Roberto; POMBO, Riciane. Resiliência urbana em tempos de emergência climática. Segurança hídrica, 2025.

JORGENSON, Simon N.; STEPHENS, Jennie C.; WHITE, Beth. Environmental education in transition: A critical review of recent research on climate change and energy education. The Journal of Environmental Education, v. 50, n. 3, p. 160-171, 2019.

JUHOLA, Sirkku et al. Connecting climate justice and adaptation planning: An adaptation justice index. Environmental Science & Policy, v. 136, p. 609-619, 2022.

KRIPKA, L. Rosana Maria; SCHELLER, Morgana; DE LARA BONOTTO, Danusa. Pesquisa documental na pesquisa qualitativa: conceitos e caracterização. Revista de Investigação de la UNAD. v.14, n. 2, 2015.

KLUG, Letícia Becalli. Resiliência e ecologia urbana. 2018.

KEONG, Choy Yee. Global environmental sustainability: case studies and analysis of the United Nations' journey toward sustainable development. [S.l.]: Elsevier, 2020.

LEWIS, P. Grace Tee et al. Characterizing vulnerabilities to climate change across the United States. Environment international, v. 172, p. 107772, 2023.

MAUAD, A. C. E. Are we there yet? Cities and the IPCC responding to climate change. Mundorama – Revista de Divulgação Científica em Relações Internacionais, 2018. Disponível em: file:///C:/Users/NOTE/Downloads/ArewethereyetCitiesandtheIPCCrespondingtoclimatechangebyAnaCarolinaMauad.pdf.

NOGUEIRA, Christiano. Contribuições para a Educação Ambiental crítica. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 18, n. 3, p. 156-171, 2023.

OLIVEIRA, Geovani; DE QUEIROZ, Lídia Nogueira; MAIA, Rafaela Camargo. Etnoecologia e Educação Ambiental sobre manguezais com indígenas. Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 16, n. 2, p. 88-104, 2021.

OLIVEIRA, Neyla Cristiane Rodrigues de; OLIVEIRA, Francisca Carla Silva de; CARVALHO, Denis Barros de. Educação ambiental e mudanças climáticas: análise do Programa Escolas Sustentáveis. Ciência & Educação, v. 27, 2021.

PIRES, Tânia Mara Souza; NEVES, Frederico Monteiro; RONER, Márcia Nunes Bandeira. A abordagem das mudanças climáticas na Educação Ambiental de escolas públicas: uma revisão integrativa. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 20, n. 3, p. 351-373, 2025.

PRALL, Mia; OLAZABAL, Marta; LEHMANN, Martin. Socio-economic projections in urban climate change adaptation planning: Practices and prospects for just adaptation. Habitat International, v. 142, p. 102946, 2023.

RIBEIRO, Paulo Jorge Gomes; GONÇALVES, Luís António Pena Jardim. Urban resilience: A conceptual framework. Sustainable cities and society, v. 50, p. 101625, 2019.

SACCARO JÚNIOR, N. L.; COELHO, O. F. Cidades resilientes e o ambiente natural: ecologia urbana, adaptação e gestão de riscos.

In: COSTA, M. A. (Org.). O Estatuto da Cidade e a Habitat III: um balanço de quinze anos de política urbana no Brasil e a Nova Agenda Urbana. Brasília: Ipea, 2016.

SAGEIDET, Barbara Maria; HEGGEN, Marianne Presthus. Global citizenship and the sustainable development goals. In: Reduced inequalities. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 299-309.

SALAZAR, César et al. Environmental education and children's pro-environmental behavior on plastic waste. Evidence from the green school certification program in Chile. International Journal of Educational Development, v. 109, p. 103106, 2024.

SITORUS, Suryadi; WIYARNI, Wiyarni. Abordando o impacto ambiental, econômico e social das empresas de mineração na Ilha de Taliabu, Maluku do Norte. Technium Soc. Sci. J. , v. 61, p. 270, 2024.

STARKEY, Eleanor et al. Maximising urban resilience using sustainable drainage systems (SuDS): Making the case for community-led urban water management. Land Use Policy, v. 158, p. 107732, 2025.

SULTANA, Farhana. Critical climate justice. The Geographical Journal, v. 188, n. 1, p. 118-124, 2022.

SWANSON, Kayleigh. Equity in urban climate change adaptation planning: A review of research. Urban Planning, v. 6, n. 4, p. 287-297, 2021.

TAVERNA, Maira Rosenente; PEDROSO, Daniele Saheb. Educação Ambiental no desenvolvimento das mudanças climáticas: um estado da arte. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 19, n. 3, p. 369-383, 2024.

TEIXEIRA, Rylanneive Leonardo Pontes; PESSOA, Zoraide Souza. Planejamento urbano e adaptação climática: entre possibilidades e desafios em duas grandes cidades brasileiras. Revista Brasileira de Estudos de População, v. 38, p. e0165, 2021.

TROTT, Carlie D. et al. Justice in climate change education: A systematic review. Environmental Education Research, v. 29, n. 11, p. 1535-1572, 2023.

TUMINI, Irina; VILLAGRA-ISLAS, Paula; HERRMANN-LUNECKE, Geraldine. Evaluating reconstruction effects on urban resilience: a comparison between two Chilean tsunami-prone cities. Natural Hazards, v. 85, n. 3, p. 1363-1392, 2017.

UITTENBROEK, Caroline J. et al. Compromisso político na organização de respostas municipais à adaptação climática: a abordagem dedicada versus a abordagem de integração. Environmental Politics , v. 23, n. 6, p. 1043-1063, 2014.

WOLVERTON, Steve; FIGUEROA, Robert Melchior; ARMSTRONG, Chelsey Geralda. Integrating historical ecology and environmental justice. Journal of Ethnobiology, v. 43, n. 1, p. 57-68, 2023.

REAPROVEITAMENTO DE MATERIAL FRESADO ASFÁLTICO (RAP) EM MISTURAS COM SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO SUSTENTÁVEL

1 Luana Dantas de Medeiros, 2 Noemia Ângelo Pereira, 3 Ana Maria Gonçalves Duarte, 4 Diego José Araújo Viégas, 5 Thiago Lucena Dias, 6 Maria Eduarda Velez, 7 Cayra Vitória Brito de Souza e Silva, 8 Valter Ferreira de Sousa Neto

1 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG, e-mail: luanadantas.engenheira@gmail.com; 2 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG, e-mail: noemia.angelo@estudante.ufcg.edu.br; 3 Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, e-mail: ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br; 4 Universidade Federal de Pernambuco-UPE, e-mail: diegoaraujoviegas@hotmil.com; 5Universidade Federal de Campina Grande -UFCG ,e-mail: thiago.lucena@estudante.ufcg.edu.br; 6Universidade Federal de Campina Grande -UFCG ,e-mail: duda.velez@hotmail.com; 7 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG ,e-mail: cayra.vitoria@estudante.ufcg.edu.b; 8 Universidade Federal de Campina Grande -UFCG ,e-mail: valterneto51@gmail.com

Palavras-chave: Sustentabilidade; Deformação Permanente; Solos lateríticos.

Resumo

Com o crescimento populacional e a intensificação das obras de engenharia em escala global, torna-se cada vez mais crítica a preocupação com a finitude dos recursos naturais e a adequada destinação dos resíduos da construção civil. Nesse contexto, o reaproveitamento do pavimento asfáltico recuperado (RAP) em misturas com solo desponta como alternativa alinhada aos princípios da pavimentação sustentável, ao reduzir a extração de agregados naturais, minimizar a geração de resíduos e mitigar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida das rodovias. A incorporação do RAP em camadas de base contribui para reduzir a deposição de material fresado em aterros sanitários, reduzindo a ocupação de áreas, a contaminação de solos e águas e as emissões decorrentes do transporte e do processamento de novos materiais, além de possibilitar soluções economicamente mais eficientes para a infraestrutura viária. Este trabalho avaliou a viabilidade técnica de misturas solo–RAP–cimento como base para pavimentos flexíveis. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão teórica, definição de dosagens e realização do ensaio de deformação permanente. As misturas foram produzidas com 2% de cimento e teores de 0%, 30%, 45% e 60% de RAP. Observou-se redução de aproximadamente 40% na deformação permanente com o aumento do teor de RAP, indicando melhoria significativa no desempenho sob solicitações de tráfego e maior durabilidade da estrutura do pavimento. Esses resultados apontam que a combinação de solo, baixo teor de cimento e elevados percentuais de RAP configura uma solução técnica e ambientalmente vantajosa, contribuindo para a conservação de recursos naturais, a redução de resíduos e a promoção de práticas de engenharia mais sustentáveis na construção e reabilitação de rodovias.

Introdução

Os pavimentos asfálticos constituem uma das soluções mais empregadas na construção de vias designada ao transporte rodoviário mundial, tendo em vista sua eficiência estrutural, entretanto, sua vida útil é limitada, havendo a necessidade de se realizar intervenções de manutenções e reabilitação frequentes, gerando assim uma grande quantidade de pavimento asfáltico recuperado (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) (Antunes, Neves & Freire, 2021; Mariyappan, Palammal & Balu, 2023). Em muitos contextos, esse material ainda é descartado de forma inadequada, outra parte destinada a aterros, contribuindo assim, para o esgotamento de áreas a disposição e, além disso, ainda tem a pressão sobre a mitigação dos recursos naturais, pois a construção rodoviária demanda bilhões de toneladas de agregados por anos e responde por uma parcela expressiva das emissões de gases do efeito estufa e do consumo energético do setor da construção (Bressi, Primavera & Santos, 2022; Zhao et al., 2025). Nesse cenário, a reutilização do RAP em camadas estruturais de pavimentos é analisada como uma estratégia-chave para economia circular, possibilitando conservação dos agregados naturais e redução da deposição de resíduos, além de ter uma pegada ambiental nas rodovias, sem ocasionar prejuízos no desempenho mecânico quando projetado e executado adequadamente (Khan & Puppala, 2022; Tsakoumaki & Plati, 2024).

Pesquisas recentes exibem que as misturas contendo RAP em bases granulares ou camadas de solo estabilizadas podem expor um aumento na resistência mecânica do solo, como aumento do módulo de resiliência e redução da deformação permanente quando comparado ao solo natural e a materiais convencionais, ampliando a capacidade de suporte e potencialmente prolongando a vida de serviço do pavimento (Pradhan, 2024; Zhao et al., 2025). Em paralelo, estudos com bases tratadas com cimento e altos teores de resíduos indicam que é possível combinar desempenho estrutural satisfatório com ganhos ambientais mensuráveis em análises de ciclo de vida, desde que se otimiza a proporção de RAP e de ligante hidráulico (Barmade, Patel & Dhamaniya, 2022; Bressi, Primavera & Santos, 2022).

No contexto brasileiro, a ampla disponibilidade de solos tropicais, como os solos lateríticos, que apresenta peculiaridades em suas propriedades e no seu comportamento, pois suas propriedades dependem da rocha ao qual foram originados, o grau de laterização e das condições ambientais locais, o que limita o seu uso direto em camadas de pavimento

devido à perda de desempenho em condições saturadas, havendo assim a necessidade de realizar a sua estabilização e abrindo espaço para sua combinação com o RAP e o cimento (Coelho et al., 2024; Santana & Paula, 2025). Diante desse panorama, torna-se relevante avaliar o desempenho de misturas solo laterítico–RAP estabilizadas com cimento Portland, portanto, este trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade técnica dessas misturas como camadas de base de pavimentos flexíveis, investigando em que medida a incorporação de RAP, em conjunto com baixo teor de cimento, permite controlar a deformação permanente e, simultaneamente, favorecer a conservação de recursos naturais e a redução da geração de resíduos em obras rodoviárias.

Materiais e Métodos

O solo laterítico utilizado na pesquisa foi coletado na cidade de Cabo de Santo Agostinho - PE, o pavimento asfáltico recuperado (RAP) foi advindo do serviço de fresagem da rodovia federal BR-230 localizada na Paraíba, entre os quilômetros 35,7 e 42, e o cimento CP-IV 32 foi adquirido em comércio local em Campina Grande - PB.

Conforme ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 1, a metodologia adotada está estruturada em três etapas principais: (i) seleção e caracterização física dos materiais constituintes, (ii) definição das dosagens das misturas solo–RAP-cimento e (iii) realização de ensaios de deformação permanente, com o intuito de analisar o comportamento mecânico das composições propostas.

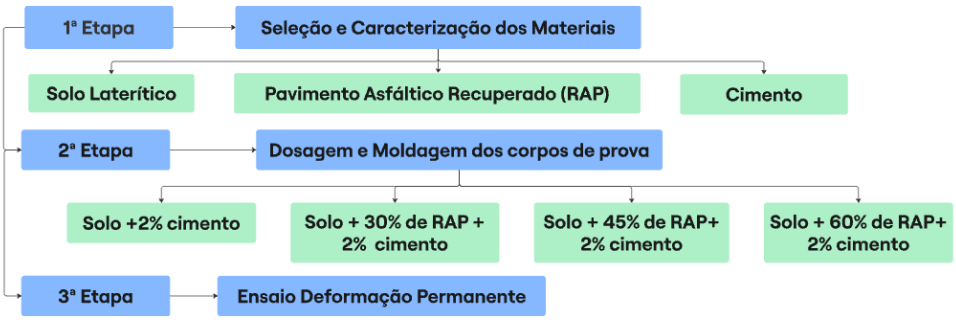


Figura 01: Fluxograma.
Fonte: Autores (2026)

A caracterização dos materiais foi conduzida com base em procedimentos normatizados, incluindo normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e normas internacionais da American Society for Testing and Material (ASTM), conforme apresentado na Tabela 1.

ENSAIO		NORMA	RESULT.	ENSAIO	NORMA	RESULT.
Solo				**Cimento**		
Fração Granulométrica	Finos Areia Pedregulho	NBR 7181/2016	57,39% 40,4% 2,22%	**Massa específica**	NBR 16605/2017	2,98g/cm³
Limite de liquidez		NBR 6459/2016	42%	**Índice de finura**	NBR 12826/2014	0,60%
Limite de plasticidade		NBR 7180/2016	29%	**Área específica**	NBR 16372/2015	4930 cm²/g
Índice de plasticidade		NBR 7180/2016	13%	**Perda ao fogo**	NBR 17086-6/2023	6,50%
Índice de grupo		-	6	**Tempo de início e fim de pega**	NBR16607/2018	Início: 4h 10min Fim: 5h 10min
Classificação TRB		-	A-7-6			
Densidade real		DNIT ME 93/1994	2,71 (g/cm³)			
RAP						
Granulometria		ASTM C136 C136M-14	-	**Resistência à compressão**	NBR 7215/2019	1 dia: 8,8 MPa 3 dias: 16,2 MPa 7 dias: 22,9 MPa 28 dias: 32,1 MPa
Determinação do teor de betume		ASTM D2172-05	5,6%			
Massa específica máxima medida		ASTM D2041/D2041M-19	2,512 g/m³			

Tabela 01: Ensaios de Caracterização.
Fonte: Adaptado de Farias (2023) e Macêdo (2025).

O solo utilizado nesta pesquisa é classificado como laterítico, cujas propriedades físicas apresentam elevada variabilidade, uma vez que são influenciadas pela rocha de origem, pelo grau de laterização e pelas condições ambientais locais. Entretanto, os resultados obtidos para o solo em estudo situam-se dentro das faixas reportadas na literatura, conforme apresentado por Liu et al. (2025). O ensaio de caracterização do RAP é fundamental para a compreensão do seu comportamento e da durabilidade das misturas. O ensaio de granulometria foi realizado em duas condições: antes e após a extração do ligante asfáltico, conforme ilustrado na Figura 02. Essa análise é relevante, pois permite avaliar se o processo de fresagem influencia o teor de finos presente na amostra e, consequentemente, a distribuição granulométrica do material (Macêdo, 2025).

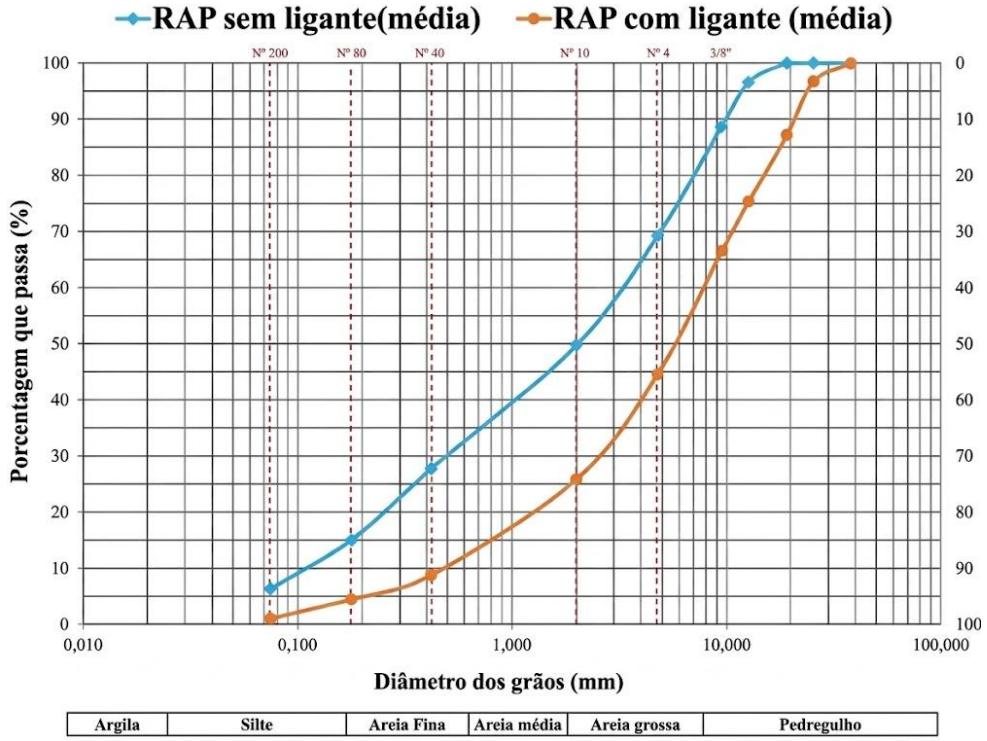


Figura 02: Curvas de distribuição granulométrica dos RAP.
Fonte: Macêdo (2025).

Na sequência, foi realizado o estudo de dosagem considerando o solo laterítico na condição seca, a partir do qual foram definidos os teores das misturas, fixando-se 2% de cimento e variações de 15%, 45% e 60% de RAP. Por meio do ensaio de compactação na energia intermediária, conforme a ABNT NBR 7182:2016, determinaram-se o teor de umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima. Esses parâmetros foram utilizados na moldagem dos corpos de prova em moldes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, que foram submetidos a um período de cura de 7 dias em câmara úmida, com os corpos de prova devidamente embalados para evitar a perda de umidade e, posteriormente, submetidos aos ensaios de deformação permanente, em conformidade com a especificação DNIT-IE 179.

Resultados e Discussão

Com os valores obtidos através do ensaio de compactação, pode-se elaborar a curva de compactação, que é essencial para obtenção do teor de umidade ótima e da massa específica aparente seca, como apresentada na Tabela 02 e na Figura 03. Com a adição do cimento, foi visível uma diminuição da massa específica aparente seca máxima, corroborando com Amadi et al. (2025); isso está relacionado com a hidratação do cimento e com a reação pozolânica que reduziu o teor de água das misturas e produziu produtos sólidos de cimentação (CSH e CAH), que preencheram os vazios e, consequentemente, aumentaram a massa específica do solo estabilizado. Já com o aumento do teor de RAP pode-se verificar uma redução no teor de umidade e um aumento na massa específica aparente seca, da mesma forma que foi observado por Pradhan (2024).

Mistura	Umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca (g/cm³)
Solo (natural)	19,6	1,712
Solo + 2% cimento	19,2	1,669
Solo + 30% RAP + 2% cimento	17,8	1,753
Solo + 45% RAP + 2% cimento	17,4	1,77
Solo + 60% RAP + 2% cimento	16,7	1,81

Tabela 02: Resultados na curva de compactação
Fonte: Autores (2026)

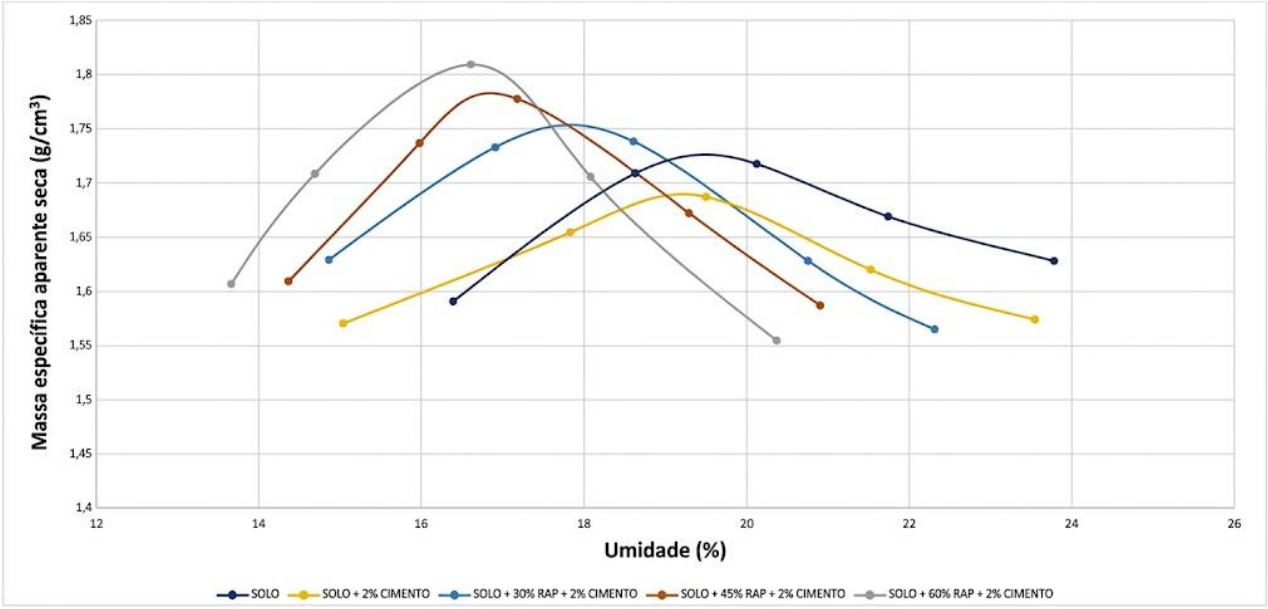


Figura 03: Curva do grau de compactação
Fonte: Autores (2026)

Seguindo o procedimento descrito na metodologia, foram realizados seis ensaios para cada condição, organizados em pares espaçados, conforme preconiza a norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT-ME 179/2018). Os corpos de prova foram submetidos a 150.000 ciclos de carregamento, com frequência de 1 Hz, e os resultados foram analisados com base no modelo proposto por Guimarães (2009), cuja formulação matemática encontra-se descrita na referida norma. Os resultados de deslocamento permanente acumulado e deformação permanente nas amostras de solo-RAP-cimento ensaiadas podem ser vistos nas Figuras 4, 5, 6 e 7 assim como o par de tensões submetidas.

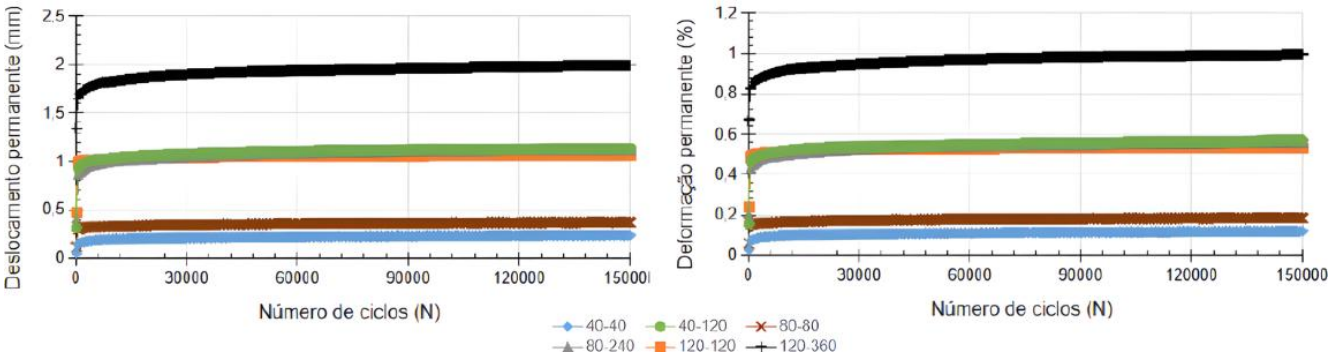


Figura 04: Deslocamento e deformação permanente em função dos ciclos para dosagem a 0% de RAP
Fonte: Autores (2026)

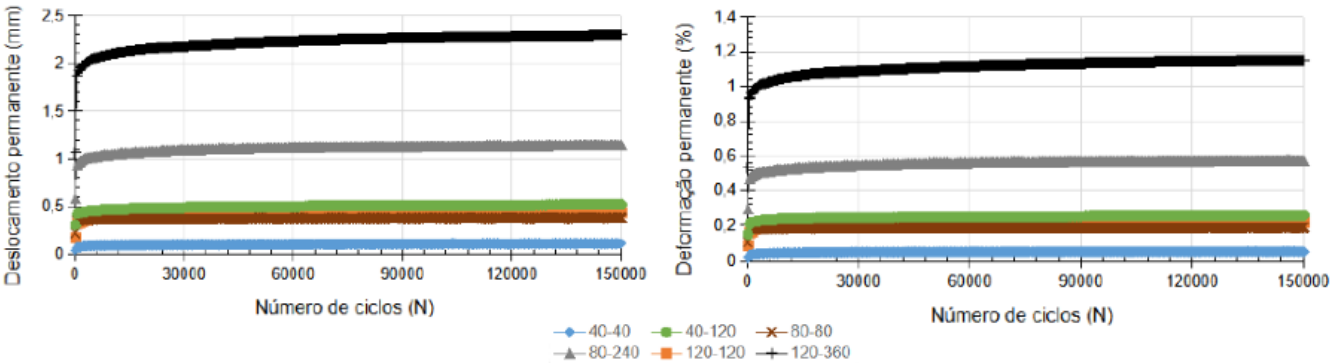


Figura 05: Deslocamento e deformação permanente em função dos ciclos para dosagem a 15% de RAP
Fonte: Autores (2026)

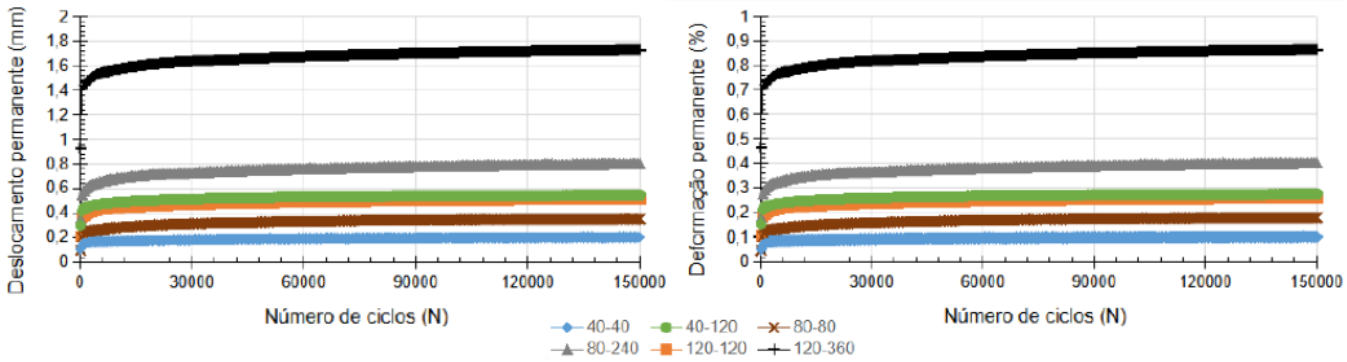


Figura 06: Deslocamento e deformação permanente em função dos ciclos para dosagem a 45% de RAP
Fonte: Autores (2026)

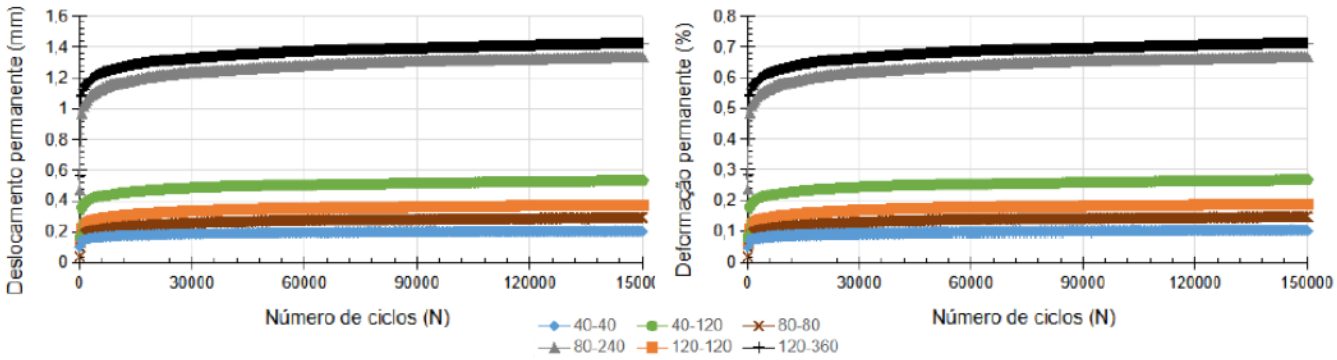


Figura 07: Deslocamento e deformação permanente em função dos ciclos para dosagem a 60% de RAP
Fonte: Autores (2026)

Diante dos resultados obtidos, observa-se maior magnitude de deformação para o par de tensões σ_3 = 120 kPa e σd = 360 kPa. De modo geral, verificou-se que o aumento dos níveis de tensão resultou no acréscimo das deformações permanentes. As misturas analisadas apresentaram comportamento típico de acomodamento plástico, caracterizado pela tendência de estabilização da deformação ao longo dos ciclos de carregamento. Destaca-se que o melhor desempenho, em termos de menor deformação acumulada, foi observado na mistura com 60% de RAP, que atingiu estabilização em aproximadamente 1,42 mm.

Adicionalmente, constatou-se que a variação da tensão desviadora exerceu maior influência na magnitude das deformações permanentes, resultado que corrobora os achados de Farias (2023), ao analisar ensaios semelhantes em amostras de solo natural e solo estabilizado. Esses resultados também reforçam as conclusões de Boaventura et al. (2024), que evidenciaram o bom desempenho mecânico de misturas solo–RAP com baixos teores de cimento. Sob a perspectiva da sustentabilidade, o emprego de RAP associado a reduzidas dosagens de cimento contribui para a diminuição do consumo de materiais naturais e da emissão de gases de efeito estufa, além de promover a valorização de resíduos da construção rodoviária, alinhando-se aos princípios da economia circular e ao desenvolvimento de soluções mais ambientalmente eficientes para pavimentação.

Com base nos resultados obtidos, procedeu-se à análise por regressão múltipla não linear, utilizando o software STATISTICA (versão 10), visando à determinação dos parâmetros do modelo proposto por Guimarães (2009) para as misturas estudadas. Os parâmetros estimados encontram-se apresentados na Tabela 03.

Modelo de Guimarães (2009)

Teor de RAP	Ψ1	Ψ2	Ψ3	Ψ4	R²
0%	0,237	0,019	0,748	0,037	0,84
30%	0,12	0,095	1,377	0,039	0,99
45%	0,124	0,268	1,029	0,045	0,95
60%	0,086	-0,504	1,257	0,056	0,95

Tabela 03: Parâmetros de regressão obtidos por meio do modelo de Guimarães (2009)
Fonte: Autores (2026)

Observa-se, a partir dos resultados, que o coeficiente de determinação (R^2) apresenta valores superiores a 0,84, indicando um bom ajuste do modelo aos dados experimentais. Verifica-se também, por meio do parâmetro ψ_2, que apenas a mistura com 60% de RAP apresentou valor negativo, o que indica uma tendência de redução da deformação permanente com o aumento da tensão confinante (σ_3). No que se refere ao parâmetro ψ_3, associado à tensão desviadora (σd), observa-se uma elevada variabilidade entre as misturas, evidenciando comportamentos distintos em resposta à aplicação dessa tensão, o que sugere diferentes níveis de sensibilidade das composições analisadas à variação da tensão de desvio.

De forma geral, os resultados reforçam que o uso de RAP promove a economia circular ao transformar um passivo ambiental em um insumo estrutural de alto desempenho. Ao reduzir a deformação permanente em 40%, a mistura de 60% de RAP valida a viabilidade de converter resíduos de fresagem em camadas eficientes, mitigando a extração de agregados naturais. Essa abordagem cumpre o rigor normativo do DNIT. Assim, a solução consolida-se como uma alternativa economicamente competitiva e essencial para a transição rumo a uma infraestrutura verde e sustentável.

Considerações Finais

Os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa consolidam a viabilidade técnica da utilização do Material Asfáltico Reciclado (RAP) como um agregado otimizador em matrizes de solo laterítico estabilizado. A análise da deformação permanente revelou que a incorporação de teores crescentes de RAP promove uma estruturação granular superior, resultando em uma redução de até 40% no acúmulo de deformações plásticas em comparação ao solo estabilizado isoladamente. Esse comportamento é atribuído ao esqueleto mineral de alta qualidade do material fresado, que oferece maior resistência ao cisalhamento e reduz a suscetibilidade da camada ao afundamento em trilha de roda, garantindo maior integridade estrutural ao pavimento ao longo do tempo.

No âmbito da sustentabilidade, o reaproveitamento do RAP transita de uma simples gestão de resíduos para uma estratégia de economia circular na engenharia rodoviária. Ao substituir parte do solo e dos agregados virgens por material fresado, reduzem-se drasticamente a necessidade de abertura de novas jazidas e o impacto ambiental associado à extração de recursos naturais finitos. Além disso, a destinação do RAP como insumo nobre evita o seu descarte em aterros sanitários ou áreas de bota-fora, mitigando passivos ambientais e reduzindo a pegada de carbono das obras de pavimentação por meio da otimização logística e do menor consumo de energia.

Em suma, a integração de 60% de RAP e 2% de cimento em solos lateríticos apresenta-se como uma solução de engenharia de alto desempenho, equilibrando rigor técnico e responsabilidade ecológica. O estudo confirma que é possível conciliar a redução de custos executivos com o incremento da qualidade estrutural das camadas de base. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a investigação da durabilidade dessas misturas frente a ciclos de umedecimento e secagem, visando consolidar ainda mais a aplicação dessa tecnologia em diferentes cenários climáticos e níveis de solicitação de tráfego.

Referências Bibliográficas

Amadi, A., Kolo, S., Yusuf, A., Eze, F., & Salihu, U. Stabilization Characteristics of Cemented Lateritic Soil Produced with Selected Cement Types. CEMENT, 2025. https://doi.org/10.1016/j.cement.2025.100136.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 ASTM. C136/C136M: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 ASTM. D2041/D2041M: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 ASTM. D2172: Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures. 2005.

Antunes, V., Neves, J., & Freire, A. Performance Assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Surface Mixtures., 6, 32, 2021. https://doi.org/10.3390/recycling6020032.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2025. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7181: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12826: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16372: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar de cimento Portland Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 17086-6: Cimento Portland — Análise química - Parte 6: Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2023.

Barmade, S., Patel, S., & Dhamaniya, A.Performance Evaluation of Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement as Base Layer in Flexible Pavement. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2022. https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000656.

BOAVENTURA, A. et al. The influence of residual asphalt material in the mechanical behaviour of soil-RAP mixtures for use in paving. International Journal of Pavement Engineering, v. 25, 2024. https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2407901.

Bressi, S., Primavera, M., & Santos, J. A comparative life cycle assessment study with uncertainty analysis of cement treated base (CTB) pavement layers containing recycled asphalt pavement (RAP) materials. Resources, Conservation and Recycling, 2022. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106160.

Coelho, L., Guimarães, A., Azevedo, A., & Monteiro, S. Sustainable Reclaimed Asphalt Emulsified Granular Mixture for Pavement Base Stabilization: Prediction of Mechanical Behavior Based on Repeated Load Triaxial Tests. Sustainability, 2024. https://doi.org/10.3390/su16135335.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 093: Solos – determinação da densidade real – Método de Ensaio. DNIT, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT-IE 179: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. DNIT, 2018.

FARIAS, M. L. A. Estudo e classificação de solos lateríticos finos, arenosos e pedregulhosos naturais e melhorados com ligantes hidráulicos para utilização em camadas de pavimento flexível. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Campina Grande, p. 372. 2023.

GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, jun. 2009.

Khan, M., & Puppala, A. Sustainable pavement with geocell reinforced reclaimed-asphalt-pavement (RAP) base layer. Journal of Cleaner Production, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135802.

LIU, Weizheng et al. A review on improving the key engineering properties of lateritic soil by treating industrial by-products and wastes. Case Studies in Construction Materials, v. 23, 1 dez. 2025.

MACÊDO, Ana Leticia Feitosa de. Avaliação da capacidade de regeneração de misturas asfálticas recicladas com óleo de algodão residual encapsulado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2025.

Mariyappan, R., Palammal, J., & Balu, S. Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications—a review. Environmental Science and Pollution Research, 30, 45587-45606, 2023. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25847-3

Pradhan, S. Investigating the effect of cement-stabilized reclaimed asphalt pavement (RAP) materials on the mechanical behavior of granular subbase layers. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 7, 4413 – 4431, 2024. https://doi.org/10.1007/s41939-024-00486-4.

Santana, E., & Paula, J. A literature review based on the potential of use of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) in the base and subbase layers of flexible pavements. Soils and Rocks, 2025. https://doi.org/10.28927/sr.2025.010224.

Tsakoumaki, M., & Plati, C. A Critical Overview of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Pavement Construction. Infrastructures, 2024. https://doi.org/10.3390/infrastructures9080128.

Zhao, X., Wen, Y., Guerrero-Bustamante, O., Guillén, A., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez, M., & Sol-Sánchez, M. Suitable Granular Road Base from Reclaimed Asphalt Pavement. Materials, 18, 2025. https://doi.org/10.3390/ma18040854.

ESTUDO TÉCNICO-AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DE RAP EM SOLOS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO

1 Ramon de Souza Lima Filho; 2 Ana Maria Gonçalves Duarte, 3 Diego José Araújo Viégas; 4 Manoel Leandro Araújo e Farias; 5 Auanny Alícia Alves da Silva; 6 Maria Eduarda Velez Martins; 7 Loredanna Melyssa Costa Almeida; 8 Arthur dos Santos Sauza

1 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: ramon.souza@estudante.ufcg.edu.br; 2 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br;3 Universidade de Pernambuco-UPE, e-mail: diegoaraujoviegas@hotmail.com; 4Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: mlaf@engcivil@gmail.com; 5Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br;6 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail:duda.velez@hotmail.com;7 Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, e-mail: loredanna.costa@servidor.uepb.edu.br; 8 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: arthurdossantossouza5@gmail.com

Palavras-chave: Pavimentação sustentável; Material fresado; Solo-RAP-cimento, Economia circular

Resumo

O crescente volume de resíduos provenientes da fresagem de pavimentos asfálticos, aliado à necessidade de redução da extração de recursos naturais, tem impulsionado a busca por soluções sustentáveis na engenharia rodoviária. Nesse contexto, o presente estudo avaliou a viabilidade técnica e ambiental da incorporação de material fresado de pavimentos asfálticos (RAP) em misturas estabilizadas com solo laterítico e cimento, visando o reaproveitamento de materiais em novas obras de pavimentação. Foram analisadas composições com substituição parcial do solo por RAP nos teores de 45% e 60%, com adição de 2% de cimento Portland pozolânico. Os ensaios de compactação indicaram aumento da densidade máxima, acompanhado da redução da umidade ótima em ambas as misturas. No comportamento mecânico, os resultados de módulo de resiliência demonstraram ganho significativo de rigidez, com valores de até 880 MPa para a mistura com 60% de RAP sob maiores níveis de confinamento, representando aumento significativo em relação ao solo natural. Do ponto de vista ambiental, a substituição de até 60% do solo por RAP minimiza a aquisição de novos materiais e proporciona uma destinação ambientalmente adequada ao RAP, cujo volume de 1,8 bilhão de toneladas por ano acarreta sérios impactos ambientais. Conclui-se assim que a utilização de elevados teores de RAP constitui uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente eficiente para aplicações em obras de infraestrutura, o que promove a circularidade dos resíduos dentro da pavimentação.

Introdução

A infraestrutura de transporte constitui um dos grandes pilares para o desenvolvimento socioeconômico de um país, ao mesmo tempo que se destaca como uma das atividades de maior impacto ambiental, em função do elevado consumo de recursos não renováveis e das significativas emissões de gases de efeito estufa (Mariyappan; Palammal; Balu, 2023; Nnamdi; Amuda; Ibrahim, 2024; Suksan et al., 2024). Estimativas de Mariyappan, Palammal e Balu (2023) indicam que a construção de um único quilômetro de rodovia pode demandar cerca de 15.000 toneladas de agregados virgens, cuja extração contínua contribui para o esgotamento de jazidas naturais e implica alto consumo energético de processamento. Além disso, atividades de manutenção e reabilitação rodoviária geram aproximadamente 1,8 bilhão de toneladas anuais de material fresado, conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), o que se apresenta como um passivo ambiental de grande magnitude (Endale et al., 2022).

Nesse contexto, a incorporação de princípios da economia circular apresenta-se como uma alternativa estratégica para mitigar tais impactos. A utilização do RAP em camadas estruturais de pavimentos representa uma aplicação de maior valor dentro da hierarquia de reciclagem, sendo preferível ao seu emprego em aplicações de baixo desempenho (Tarsi et al., 2020). Além de reduzir a pressão sobre jazidas naturais, o reaproveitamento desse material contribui para a diminuição da pegada de carbono, podendo diminuir o potencial de aquecimento global em até 20% e as emissões de CO_2 em até 52% em comparação com misturas convencionais (Endale et al., 2022; Santana; De Paula, 2025).

No Brasil, essa prática converge com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) – que impõe a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e prioriza a não geração, redução e reciclagem de resíduos sólidos – e o uso de material fresado encontra amparo em normativas técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), como a norma DNIT 033/2021-ES, a qual já preconiza a reciclagem de pavimentos (Brasil, 2010; DNIT, 2021). A nível global, a pesquisa se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), especificamente ao ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

O RAP pode ser empregado na estabilização de solos lateríticos, amplamente disponíveis em regiões tropicais, mas que frequentemente não atendem aos requisitos para aplicação em camadas estruturais (Alhaji et al., 2019; Guimarães et al., 2024; Silva et al., 2024). E, apesar dos avanços científicos, a incorporação de material fresado apresenta lacunas na literatura quanto ao desempenho global das misturas, sobretudo quando ocorre em porcentagens acima de 40%. Especialmente no que se refere à rigidez e durabilidade a longo prazo, é necessário analisar a coesão e o comportamento tensão-deformação, a fim de garantir um desempenho compatível com as exigências projetadas.

Diante disso, o presente estudo investiga a incorporação de elevadas taxas de RAP na estabilização de um solo tropical brasileiro, utilizando dosagens de 45% e 60% de material reciclado, associadas a um teor fixo de 2% de cimento. Essa abordagem visa maximizar o reaproveitamento de resíduos, avaliando o desempenho mecânico das misturas. Busca-se, assim, contribuir para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis para a engenharia de pavimentos.

Materiais e Métodos

Foi utilizado um solo tropical proveniente da região de Cabo de Santo Agostinho/PE (Figura 01), classificado como laterítico arenoso (LA') segundo a metodologia MCT. Esse solo é representativo de materiais frequentemente disponíveis em regiões de clima quente e úmido, o que compõe a maior parcela do território brasileiro.

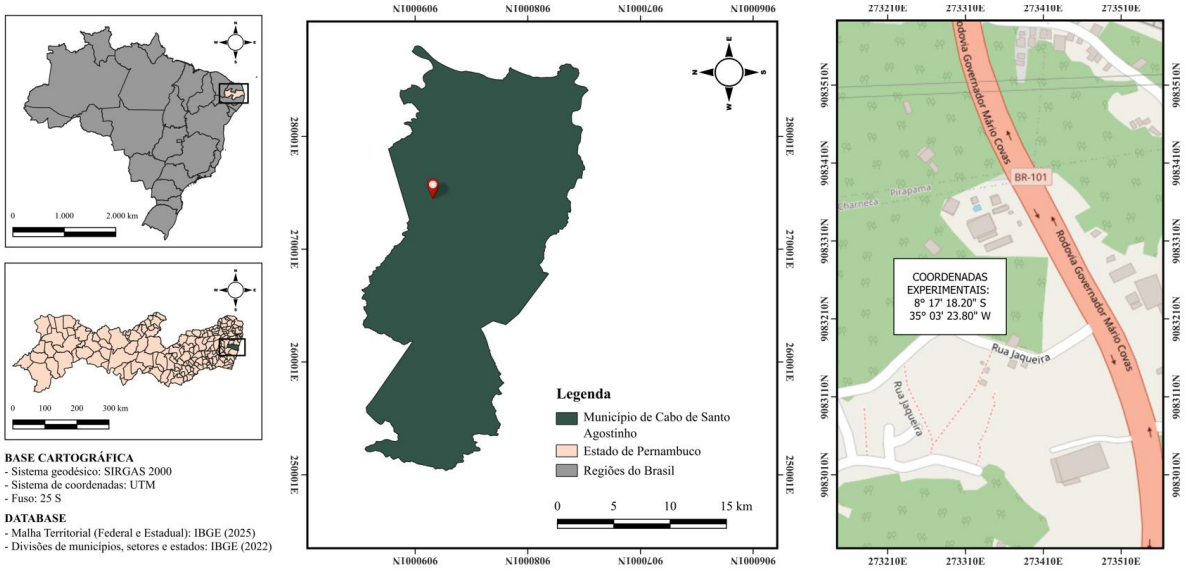


Figura 01: Mapa da localização do local da coleta de solo.
Fonte: Os autores (2026).

O RAP foi obtido a partir da fresagem da rodovia BR-230, especificamente na zona do município de Campina Grande/PB. O material foi previamente homogeneizado para garantir a representatividade das amostras.

A caracterização dos materiais constituintes, tanto o solo quanto o RAP, foi realizada por meio de ensaios geotécnicos convencionais, incluindo análise granulométrica, determinação dos limites de consistência e massa específica dos grãos, cujos dados são apresentados na Figura 02 e na Tabela 01.

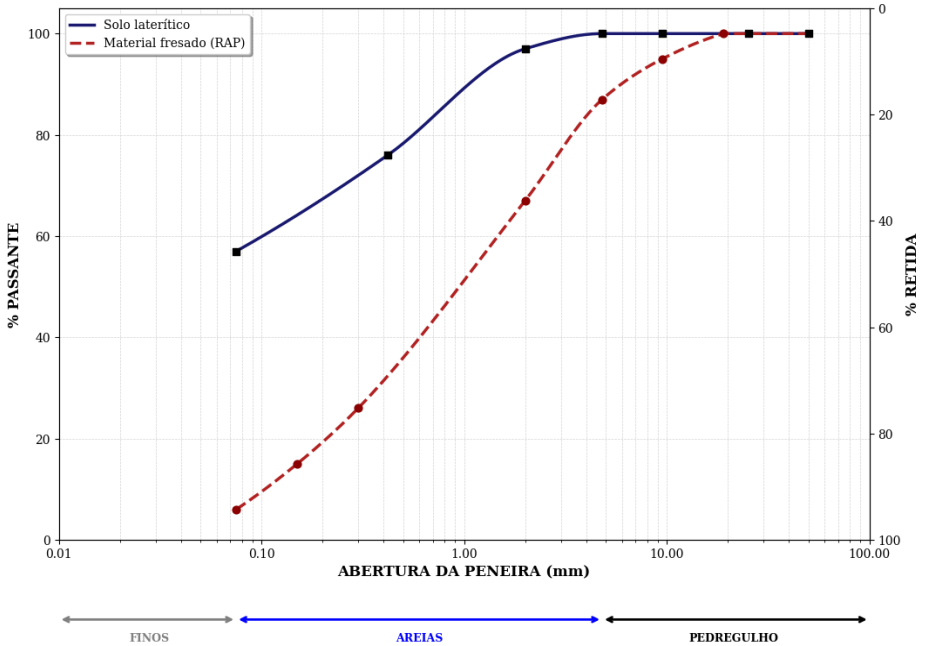


Figura 02: Curva granulométrica do solo e do material fresado.
Fonte: Os autores (2026).

Tabela 01: Propriedades dos materiais a partir dos ensaios de caracterização.

Material	Propriedade	Valor
Solo	Massa específica	1,71 g/cm³
	Limite de liquidez (LL)	42%
	Limite de plasticidade (LP)	29%
	Índice de plasticidade (IP)	13%
RAP	Massa específica	2,76 g/cm³
	Consistência	NP / NL
Cimento	Massa específica	2,98 g/cm³
	Índice de finura	0,60%
*NP/NL = Não plástico / não líquido		

Fonte: Os autores (2026).

Após o processo de secagem ao ar livre por 24 horas, as misturas solo-RAP-cimento foram definidas com substituição parcial do solo por RAP nos teores de 0%, 45% e 60% (em massa), sendo misturadas conforme apresentado na Figura 03. Em todas as composições, foi incorporado um teor fixo de 2% de cimento Portland pozolânico (CP IV-32), selecionado em função de sua menor pegada de carbono e baixo calor de hidratação, contribuindo para a mitigação de fissuração térmica e aumento da durabilidade das misturas.



Figura 03: Aspecto final da mistura solo-RAP-cimento.
Fonte: Os autores (2026).

A moldagem dos corpos de prova (Figura 04) foi realizada a partir da determinação prévia da umidade ótima e da massa específica seca máxima, obtidas por meio de ensaios de compactação na energia de Proctor Intermediário. Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a processo de cura em câmara úmida, sob temperatura de 23 °C ± 2 °C e umidade relativa superior a 95%, por um período de 7 dias, visando garantir o desenvolvimento adequado das reações de cimentação.



Figura 04: Corpos de prova moldados antes da submersão em câmara úmida.
Fonte: Os autores (2026).

A avaliação do desempenho mecânico foi conduzida por meio de ensaios que simulam as condições de carregamento em campo, com foco especificamente no Módulo de Resiliência (MR) conforme a norma DNIT-ME 134/2018, utilizado para determinar a resposta elástica das misturas.

A metodologia adotada permitiu integrar a avaliação do desempenho mecânico com a análise do potencial ambiental das misturas, considerando o impacto da substituição de materiais naturais por resíduos reciclados. Dessa forma, buscou-se estabelecer uma relação entre eficiência estrutural e sustentabilidade, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais resilientes e ecoeficientes para a engenharia de pavimentos.

Resultados e Discussão

A partir dos procedimentos descritos, os resultados obtidos evidenciam que a incorporação de RAP promove alterações significativas nas propriedades físicas e mecânicas das misturas, especialmente quanto ao comportamento na compactação (Tabela 02).

Tabela 02: Ensaio de compactação.

Mistura solo-RAP-cimento	Umidade ótima (%)	Densidade máxima (g/cm³)
Solo natural	20,30	1,71
Solo cimentado + 45% RAP	17,40	1,76
Solo cimentado + 60% RAP	16,70	1,78

Fonte: Os autores (2026).

É notável que a mistura de 60% de RAP apresentou aumento de 4,10% da massa específica aparente seca máxima em relação ao solo natural, enquanto a umidade ótima sofreu uma redução absoluta de 3,60 pontos percentuais. Vale ressaltar que os resultados obtidos apresentam forte convergência com a literatura recente, sobretudo com os estudos de Alhaji et al. (2019) e Lima et al. (2023), que indicam que tal comportamento é associado à melhoria do empacotamento granulométrico e ao caráter hidrofóbico do ligante residual presente no RAP.

Do ponto de vista mecânico, a análise dos dados revelou comportamentos distintos entre o solo natural e as misturas contendo RAP (Figura 05). Enquanto o solo natural apresentou uma redução de rigidez com o aumento da carga, indo de 520 MPa para 400 MPa, caracterizando um comportamento de amolecimento típico de solos finos. Por outro lado, as misturas solo-RAP-cimento apresentaram um comportamento inverso, expondo um ganho expressivo de capacidade de suporte conforme o aumento da pressão de confinamento.

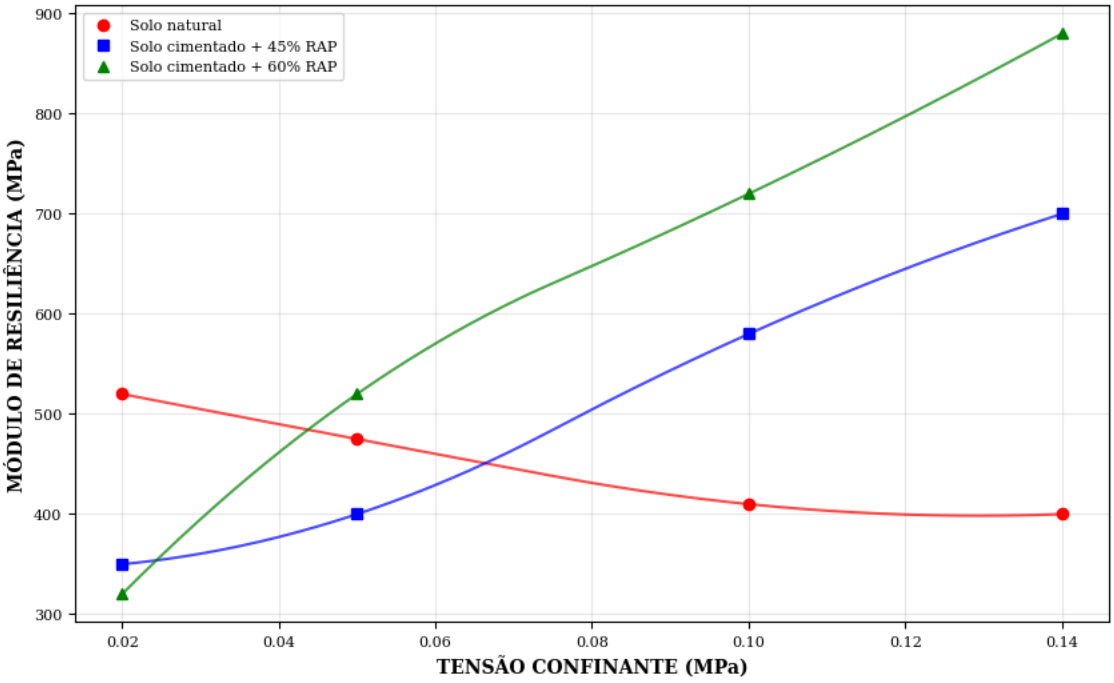


Figura 05: Dados experimentais da relação MR vs. Tensão confinante.
Fonte: Os autores (2026).

Destaca-se a composição com 60% de RAP, a qual demonstrou o desempenho mais expressivo sob condições de carga elevada, atingindo um MR de 880 MPa, valor aproximadamente duas vezes superior ao MR do solo natural (≈400 MPa) nas mesmas condições de tensão confinante de 0,14 MPa. Santana e De Paula (2025) e Lima et al. (2023) também indicam aumento proporcional da rigidez conforme a adição de RAP.

Esses resultados reforçam a hipótese de formação de um esqueleto granular mais estável, conforme discutido por Mousa, El-Badawy e Azam (2021). As partículas granulares do RAP, ao serem confinadas e pressionadas pelas camadas superiores, promovem maior travamento dos agregados e aumentam a rigidez do sistema, logo proporciona-se maior capacidade de suporte sob tensões de confinamento, o que é extremamente vantajoso na produção de novos pavimentos.

Os valores de módulo de resiliência obtidos, especialmente para a mistura com 60% de RAP, são compatíveis com materiais empregados em camadas de base de pavimentos, indicando potencial aplicação estrutural em condições reais de campo.

Por fim, sob a ótica técnico-ambiental, os resultados indicam que a mistura com maior teor de resíduo é a que mais se beneficia de camadas estruturais bem compactadas, apresentando o maior potencial de substituição de materiais virgens em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Considerações Finais

A presente pesquisa demonstrou que a incorporação de material fresado (RAP) em misturas estabilizadas com solo laterítico e cimento constitui uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica para aplicação em camadas de pavimentos flexíveis.

Os resultados evidenciaram que a adição de RAP promove melhorias simultâneas no comportamento físico e mecânico das misturas. A composição com 60% de RAP apresentou maior eficiência de compactação, com densidade máxima de 1,78 g/cm³ e umidade ótima de 16,70%, e desempenho mecânico superior, caracterizado pelo aumento expressivo do módulo de resiliência sob condições de confinamento. Esses resultados confirmam o papel do RAP como elemento estruturante da matriz granular, contribuindo para o aumento da rigidez e da capacidade de suporte do material.

Esses parâmetros são diretamente associados, na literatura, ao desempenho estrutural de camadas de pavimentos, especialmente no que se refere à resistência à deformação permanente e à evolução de danos por fadiga. Dessa forma, infere-se que a utilização da mistura com 45% ou 60% de RAP tende a proporcionar maior durabilidade estrutural, o que, sob a ótica do ciclo de vida, implica redução na frequência de intervenções de manutenção.

Para além do desempenho mecânico, a incorporação de RAP apresenta implicações ambientais diretas mensuráveis. A substituição de 60% do solo natural corresponde à economia de aproximadamente 0,60 t de material virgem por tonelada de mistura produzida, configurando um indicador direto de redução na demanda por recursos naturais. Considerando que as etapas de extração, processamento e transporte de materiais são responsáveis por parcela significativa dos impactos ambientais em obras rodoviárias, essa substituição implica potencial redução proporcional no consumo energético e nas emissões associadas ao ciclo de vida do pavimento. Adicionalmente, o aumento da rigidez e da capacidade de suporte das misturas sugere maior durabilidade estrutural, o que pode resultar na diminuição da frequência de intervenções de manutenção e, consequentemente, na mitigação indireta de impactos ambientais ao longo da vida útil da estrutura.

Dessa forma, a utilização de elevados teores de RAP não apenas atende aos requisitos técnicos de desempenho, mas também se consolida como uma solução alinhada aos princípios da economia circular e da engenharia sustentável. Sua adoção representa um avanço na integração entre eficiência estrutural e responsabilidade ambiental na engenharia de pavimentos, desde que acompanhada por critérios adequados de controle tecnológico.

Ressalta-se que os resultados apresentados referem-se ao comportamento mecânico em escala laboratorial, sendo recomendada, em estudos futuros, a avaliação do desempenho a longo prazo das misturas, especialmente quanto à resistência à fadiga e à deformação permanente sob condições reais de carregamento.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), especialmente ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), pelo suporte acadêmico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

ALHAJI, M. M.; ALHASSAN, M.; ADEJUMO, T. W.; UMAR, A. T. Laboratory and field evaluation of a-6 lateritic soil treated with reclaimed asphalt pavement and ordinary portland cement. **International Journal of GEOMATE**, v. 17, n. 63, 1 nov. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT)**. DNIT 033/2021-ES:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT**). DNIT 134/2018-ME:** Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

ENDALE, A. A.; GHATAORA, G. S.; BURROW, M. P. N. Asphalt Pavement Cold Recycling and Basic Characteristics of RAP Materials and Their Application. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 16, n. 1, 28 jan. 2022.

GUIMARÃES, A. C. R.; LIMA, C. D. A.; ARAGÃO, F. T. S.; DA MOTTA, L. M. G.; SANTOS, J. T. A. Mechanical characterization of an alternative laterite gravel used as pavement material. **Soils and Rocks**, v. 47, n. 1, e2024010622, 30 dez. 2023.

MARIYAPPAN, R.; PALAMMAL, J. S.; BALU, S. Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications—a review. **Environmental Science and Pollution Research**, 23 fev. 2023.

MOUSA, E.; EL-BADAWY, S.; AZAM, A. Evaluation of reclaimed asphalt pavement as base/subbase material in Egypt. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 26, e100414, 2021.

NNAMDI, I. R.; AMUDA, A. IBRAHIM, A. Performance evaluation of laterite and pulverized reclaimed asphalt pavement stabilized with base seal and cement. **Nile Journal of Engineering and Applied Science**, v. 2, n. 1, p. 1, 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Brasília: ONU Brasil, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel. Acesso em: 23 abr. 2026.

SANTANA, E. K. G. S. B.; PAULA, J. N. A literature review based on the potential of use of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) in the base and subbase layers of flexible pavements. **Soils and Rocks**, v. 48, n. 2, e2025010224, 23 mai. 2025.

SILVA, P. A.; ALMEIDA, M. S. S.; PEREIRA, I. M. M.; ACHY, A. R. A.; COSTA, W. G. S.; LIMA, C. D. A.; BRITO, J. A. Mechanistic-empirical evaluation of soil-RAP mixtures for use as unbound granular layers of asphalt pavements. **Transportation Geotechnics**, v. 47, e101290, 1 jul. 2024.

SUKSAN, A.; HORPIBULSUK, S.; MOBKRATHOK, M. CHINKULKIJNIWAT, A. Drained Shear Response of Cement-Stabilized Recycled Asphalt Pavement–Lateritic Soil Blends. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 10, n. 1, 17 jan. 2024.

EDUCAÇÃO CLIMÁTICA E RECURSOS HÍDRICOS: A PROPOSTA DA OFICINA "DO CICLO DA ÁGUA À AÇÃO - ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS PARA O DIA A DIA"

1 Jhenifer de Carvalho, 2 Marco Rodrigo Redlich, 3 Marcio de França Santos, 4 Rodrigo Porto Santos, 5 Brendon Máximo Clei dos Santos, 6 Gisele Victor Batista, 7Rogério Simões, 8 João Marcos Bosi Mendonça de Moura

1 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: jhenifer.carvalho28@edu.udesc.br; 2 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: marco.redlich@edu.udesc.br; 3 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: marcio.santos@edu.udesc.br; 4 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: rodrigo.ps@edu.udesc.br; 5 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: brendon.santos@edu.udesc.br; 6 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: gisele.batista@udesc.br; 7 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: rogerio.simoes@udesc.br; 8 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: joao.moura@udesc.br.

Palavras-chave: Educação ambiental; Recursos hídricos; Sustentabilidade.

Resumo

A gestão sustentável dos recursos hídricos urbanos exige não apenas avanços técnicos e regulatórios, mas também a formação de uma consciência coletiva capaz de transformar práticas cotidianas. Nesse contexto, este trabalho apresenta a oficina "Do Ciclo da Água à Ação — Estratégias Sustentáveis para o Dia a Dia", desenvolvida por equipe multidisciplinar do Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua/Udesc), com o objetivo de aproximar ciência, legislação e sociedade por meio da educação ambiental aplicada. A oficina foi realizada de forma remota, via Google Meet, em sessão única de aproximadamente uma hora, com mais de 60 participantes de diferentes formações acadêmicas e profissionais. O conteúdo foi estruturado em cinco módulos temáticos: ciclo hidrológico natural e urbano; destinação e tratamento de esgotos domésticos; Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e preservação de nascentes, com estudo de caso em São Bento do Sul (SC); jardins de chuva como solução baseada na natureza para drenagem urbana; e sistemas domésticos de aproveitamento de águas pluviais. A abordagem expositivo-dialogada, com linguagem acessível e respaldo em normas técnicas da ABNT e referências nacionais e internacionais, favoreceu a compreensão de temas complexos por um público diversificado. Os resultados evidenciaram engajamento expressivo dos participantes e impacto positivo na percepção sobre saneamento, conservação hídrica e soluções de baixo custo replicáveis em escala doméstica e comunitária. A iniciativa alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 (ODS 4, 6, 11, 12, 13 e 15) e consolida-se como prática replicável de educação ambiental para o uso sustentável da água.

Introdução

A gestão sustentável da água é um dos maiores desafios contemporâneos, em função da crescente pressão exercida pelo crescimento populacional, urbanização acelerada e efeitos das mudanças climáticas. Esses fatores aumentam a vulnerabilidade de ecossistemas e populações, intensificando crises de escassez, degradação da qualidade da água, inundações e estiagens. No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997) estabelece fundamentos para a gestão descentralizada e participativa da água.

Nesse contexto, a educação ambiental surge como instrumento estratégico de mobilização, contribuindo para a mudança de práticas cotidianas e para o fortalecimento de políticas públicas. A oficina "Do Ciclo da Água à Ação – Estratégias Sustentáveis para o Dia a Dia" foi desenvolvida no âmbito do ProfÁgua com o objetivo de aproximar ciência, gestão e sociedade, integrando conceitos hidrológicos, legislação e soluções baseadas na natureza aplicáveis em escala doméstica e comunitária.

A relevância da oficina relaciona-se diretamente às metas globais da Agenda 2030, com contribuições específicas e mensuráveis para diferentes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). No âmbito do ODS 4 – Educação de Qualidade, a iniciativa atende, especialmente, à meta 4.7, ao promover processos formativos participativos, inclusivos e orientados à sustentabilidade. Em relação ao ODS 6 – Água Potável e Saneamento, contribui para as metas 6.5 e 6.b, ao fomentar a gestão integrada dos recursos hídricos e fortalecer a participação das comunidades locais para melhorar a gestão da água e do saneamento. Adicionalmente, a oficina se articula com o ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, em especial com a meta 12.8, ao incentivar práticas acessíveis de uso eficiente da água e a conscientização ambiental. No âmbito do ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima, contribui para as metas 13.1 e 13.3, ao estimular medidas de adaptação, mitigação e educação climática.

Nesse sentido, a iniciativa está em consonância direta com a Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999), que estabelece a educação ambiental como componente essencial e permanente da educação nacional, devendo estar presente de forma articulada em todos os níveis e modalidades de ensino. Tal alinhamento é reforçado pela recente Lei nº 14.926/2024, que amplia o escopo da política ao incorporar explicitamente a educação climática, a biodiversidade e a prevenção de desastres naturais, fortalecendo a integração entre educação, ciência e gestão de riscos.

Metodologia

A oficina foi planejada e conduzida por uma equipe multidisciplinar formada por profissionais e estudantes das áreas de Agronomia, Engenharia Sanitária, Geografia, Administração e Engenharia de Produção, todos vinculados ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua. A diversidade formativa possibilitou a integração de abordagens técnicas, ambientais e sociais, assegurando a transdisciplinaridade do processo.

O desenvolvimento metodológico ocorreu em três etapas principais: (1) preparação e fundamentação teórica, (2) organização pedagógica e (3) execução da oficina. Na preparação, foram selecionadas referências nacionais e internacionais em saneamento e gestão da água, com destaque para (Metcalf & Eddy *et al.*, 2016) e (Sperling, 2016; 2017) além de normas técnicas da ABNT (ABNT, 2019; ABNT, 1993; ABNT, 1997). Esse arcabouço teórico forneceu respaldo científico e alinhamento com as políticas públicas vigentes.

A organização pedagógica incluiu a elaboração de um roteiro didático estruturado em cinco módulos temáticos, apresentados de forma remota por meio da plataforma Google Meet, em sessão única de aproximadamente uma hora. O material utilizado consistiu em apresentações em slides com linguagem acessível, recursos visuais e esquemas simplificados, permitindo diálogo com diferentes perfis de público. O formato adotado foi expositivo-dialogado, com abertura para debates após cada módulo.

O processo de divulgação da oficina envolveu redes acadêmicas e comunitárias, o que possibilitou ampla adesão. O perfil dos participantes foi levantado por meio de um questionário que tratava de idade, escolaridade e área de atuação.

Resultados e Discussão

O registro da oficina encontra-se ilustrado na Figura 01, evidenciando a interação online e a apresentação dos conteúdos em tempo real.

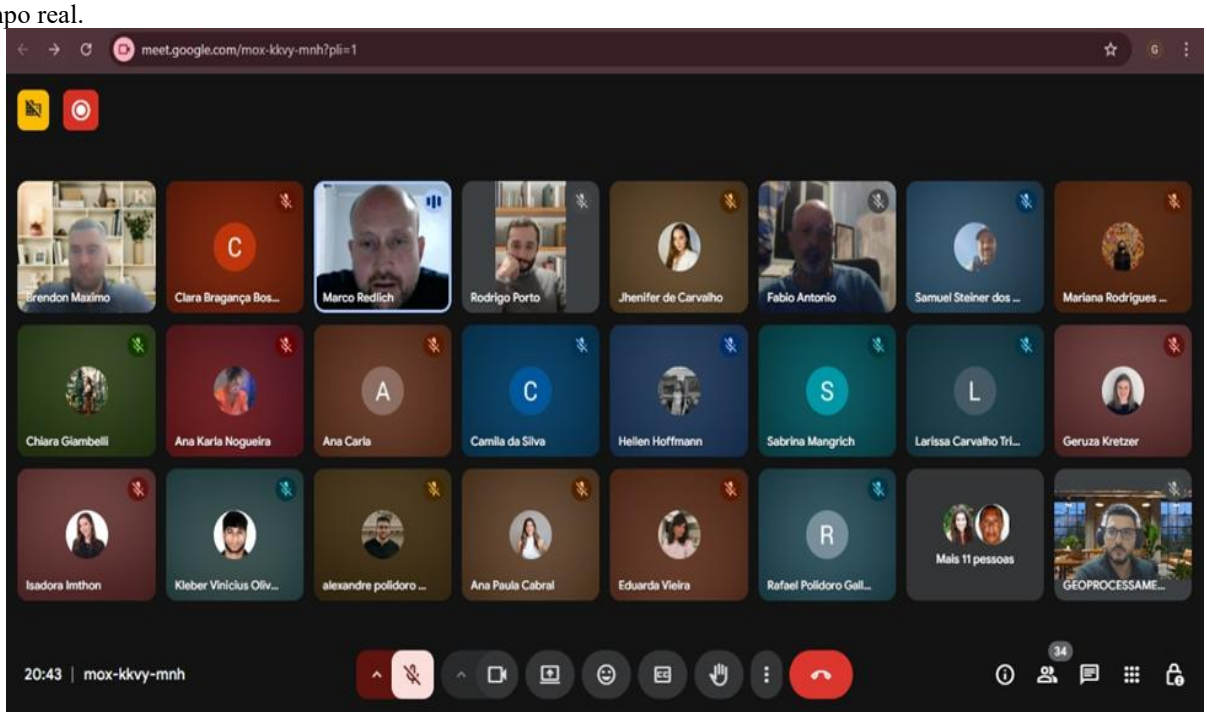


Figura 01: Registro da oficina online realizada em 23/09/2025 (Google Meet).
Fonte: Autores (2025).

Os módulos da oficina abordaram os seguintes conteúdos:

- Módulo 1 – Ciclo da água: natural e urbano – discussão dos processos hidrológicos e impactos da urbanização sobre a dinâmica da água.
- Módulo 2 – Qual a importância de se saber para onde vai o esgoto da sua casa – reflexão sobre saneamento básico, tratamento de efluentes e implicações para a saúde pública e o meio ambiente.

Nesses módulos foram trabalhos conteúdos sobre os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico, com ênfase na destinação do esgoto doméstico. O desconhecimento generalizado acerca do percurso dos efluentes após o uso residencial impede a formação de uma consciência sanitária coletiva, essencial para a valorização das infraestruturas de coleta e tratamento. A água utilizada em atividades cotidianas transforma-se em esgoto ao incorporar contaminantes físicos, químicos e biológicos, cuja trajetória subsequente depende criticamente da infraestrutura de saneamento disponível. Em áreas urbanizadas, redes coletoras transportam os efluentes para Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), nas quais processos de depuração removem poluentes antes da devolução aos corpos hídricos. Contudo, em locais sem cobertura de rede, a ausência de alternativas para tratamento

"no lote", como fossas sépticas e filtros anaeróbios, resulta no lançamento direto de esgoto não tratado no ambiente, gerando graves riscos sanitários e ecológicos (Metcalf e Eddy, 2016).

A oficina permitiu conscientizar os participantes de que o tratamento de esgoto é fundamental para mitigar a disseminação de doenças de veiculação hídrica, como hepatites, cólera e gastroenterites, que encontram no esgoto bruto um vetor eficaz de transmissão (WHO, 2006). Além do impacto na saúde, o lançamento de efluentes sem tratamento desencadeia o processo de eutrofização nos corpos d'água, um fenômeno caracterizado pela proliferação excessiva de algas devido ao excesso de nutrientes, que consome o oxigênio dissolvido e aniquila a vida aquática. A gestão dos efluentes é, portanto, uma política de saúde e de proteção dos recursos hídricos (Heller; Castro, 2007). Os sistemas de tratamento podem ser classificados em centralizados, que atendem grandes populações com alta eficiência, e descentralizados, adequados para áreas rurais ou de baixa densidade demográfica. Aos participantes, foi esclarecido que a escolha tecnológica pode variar entre sistemas intensivos, que demandam menor área e maior controle operacional, como os lodos ativados, e sistemas extensivos, como as lagoas de estabilização, que utilizam processos naturais em grandes áreas. A complexidade e os custos associados a cada sistema exigem um planejamento criterioso, adaptado às condições locais e à capacidade de investimento e operação (Sperling, 2014).

A eficácia de qualquer solução, no entanto, transcende a engenharia e a infraestrutura, dependendo intrinsecamente da percepção pública sobre a importância do saneamento. Portanto, compreender o destino do esgoto é reconhecer a interdependência entre as ações individuais, a saúde coletiva e a integridade dos ecossistemas, reforçando o saneamento como um direito e um dever de todos.

Além disso, estabeleceu-se a conexão com o tema das mudanças climáticas e dos recursos hídricos, destacando que a ausência ou inadequação do tratamento de esgoto pode intensificar a emissão de gases de efeito estufa, especialmente metano proveniente da decomposição da matéria orgânica. Ao mesmo tempo, compromete a qualidade dos ecossistemas aquáticos e reduz sua capacidade de adaptação frente às alterações climáticas, como eventos extremos de seca. Esse cenário reforça a necessidade de uma abordagem integrada, complexa e sistêmica, na qual o saneamento básico se configura não apenas como infraestrutura essencial, mas também como estratégia de mitigação climática e de fortalecimento da resiliência da sociedade.

Um terceiro módulo da oficina procurou tratar de aspectos hidrológicos e benefícios associados ao Pagamento por Serviços Ambientais, com apresentação de um estudo de caso no município de São Bento do Sul/SC:

- Módulo 3 – Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e preservação de nascentes – apresentação de conceitos e estudo de caso aplicado no município de São Bento do Sul (SC).

Aos participantes da oficina, foi abordado que o ciclo hidrológico em seu estado natural se configura como um sistema equilibrado de circulação hídrica, onde os processos de precipitação, infiltração e evapotranspiração são regulados primordialmente pela cobertura vegetal e pela capacidade de armazenamento do solo. Conforme fundamentado por Meyer (1948) e Tucci (2003a), a presença de ecossistemas preservados é determinante para a manutenção do fluxo de base dos rios e para a recarga dos aquíferos, uma vez que a vegetação amortece o impacto direto das chuvas e favorece a percolação. Todavia, a urbanização impõe uma ruptura severa nessa dinâmica, substituindo áreas permeáveis por superfícies seladas. Essa impermeabilização, aliada à canalização de cursos d'água, resulta em um aumento exponencial do escoamento superficial e na redução drástica do tempo de concentração da bacia hidrográfica. Como consequência, observam-se picos de vazão mais elevados e precoces, que não apenas intensificam a magnitude das inundações, mas também degradam a qualidade hídrica através do carreamento de poluentes difusos acumulados no ambiente urbano (Benini, 2015; Tucci, 2003b).

Nesse sentido, os palestrantes ressaltaram que os impactos da urbanização na dinâmica da água exigem uma gestão integrada de recursos hídricos que priorize a resiliência urbana e a sustentabilidade ambiental (Braga *et al.*, 1998). A alteração antropogênica dos processos hidrológicos sobrecarrega as infraestruturas de drenagem convencional, tornando imperativa a adoção de soluções baseadas na natureza (SbN) que busquem mimetizar o ciclo natural e contribuir para a prestação de serviços de saneamento que fortaleçam a resiliência climáticas das comunidades.

Nesse contexto, o conceito de "Cidades-Esponja", proposto por Yu (2017), destaca a importância de se criar espaços de retenção e infiltração, como os jardins de chuva, para restaurar as funções ecossistêmicas de absorção do solo. Complementarmente, estratégias como o aproveitamento de águas pluviais no lote (Tomaz, 2003) e mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) para a proteção de nascentes surgem como ferramentas essenciais para reduzir a pressão sobre os mananciais superficiais e mitigar os desequilíbrios hidrológicos causados pela expansão urbana desordenada.

No Brasil, o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) evoluiu de iniciativas isoladas para uma política pública centralizada pela Lei nº 14.119/2021, aplicando o princípio do "protetor-recebedor" para remunerar a preservação de serviços ecossistêmicos. O município de São Bento do Sul (SC) foi citado como um caso de referência na oficina, com seu Programa Produtor de Água do Rio Vermelho, que oferece subsídios a proprietários rurais para proteger o manancial de abastecimento hídrico desde 2010.

O PSA é um instrumento econômico para a conservação do meio ambiente, em que os que se beneficiam dos serviços ambientais pagam, e os que contribuem para a geração e conservação desses serviços recebem por esse motivo (Pagiola; Bishop; Landell-Mills, 2006). O objetivo do PSA é prevenir a manutenção ou aumentar a qualidade dos serviços ecossistêmicos (Godecke; Hupfer; Chaves, 2014).

O PSA em São Bento do Sul teve início em 2010, com a criação da legislação pertinente, passando a ter seu primeiro pagamento aos produtores em 2011. A área de abrangência do Projeto é a Microbacia do Rio Vermelho, desde a captação de

água do município até a nascente mais distante do Rio, já no município de Campo Alegre. O pagamento aos produtores rurais é feito pelo SAMAE - Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, ou seja, os valores investidos no PSA são oriundos de parte das faturas de água pagas por todos habitantes da cidade. Atualmente o programa tem 31 propriedades inscritas, perfazendo um pagamento anual de mais de R$ 100.000,00 (cem mil reais) na soma de todas. Os proprietários são avaliados anualmente por suas ações realizadas nas propriedades, com vistas a recompor as áreas de APP, rever utilização de defensivos na agricultura, realizar o cercamento de nascentes e rios, plantar vegetação nativa, entre outros. O projeto conta com uma grande rede de parceiros entre universidades, empresas públicas e privadas, garantindo a realização de diversas ações de conservação nos mais de 1500 hectares já inseridos no Projeto.

Além da experiência do PSA também foi apresentado o método caxambu para preservação de nascentes, que consiste em uma tecnologia de baixo custo, desenvolvida no final da década de 80, evitando contaminação e garantindo a qualidade da água para o consumo. Consiste em construir uma pequena barragem com uma mistura de terra local e cimento, instalando tubulações para limpeza, captação e extravasamento da água, além de preencher a estrutura com pedras para proteger o olho d´água. Após breve explanação sobre a experiência do PSA no município catarinense, os seguintes módulos foram abordados:

- Módulo 4 – Jardim de chuva para infiltração de água em lote e recarga do lençol freático – discussão de soluções baseadas na natureza para drenagem urbana e aumento da infiltração.

O Módulo 4 abordou os jardins de chuva como uma solução sustentável para os problemas de drenagem urbana, destacando que a água da chuva não consegue infiltrar no solo em cidades muito impermeabilizadas por concreto e asfalto, e assim gerando enxurradas, alagamentos e poluição. Dessa forma, as fontes consultadas para abordar o tema nesse contexto afirmam que os jardins de chuva são apresentados como áreas rebaixadas com vegetação específica, capazes de captar, filtrar e infiltrar a água da chuva, contribuindo para a recarga do lençol freático e reduzindo os impactos das enchentes (Guedes, 2019).

A palestra enfatizou o papel dos jardins de chuva na adaptação da paisagem urbana. Os jardins de chuva foram descritos como elementos que aumentam a permeabilidade do solo, adicionam espaços verdes em áreas antes dominadas pelo concreto e funcionam como infraestrutura natural. Também foram apontados benefícios adicionais, como a filtragem de poluentes, a criação de habitats para polinizadores e a melhoria da qualidade de vida nas cidades. Dessa forma, os jardins de chuva foram apresentados não apenas como uma técnica de engenharia, mas como uma estratégia integrada de sustentabilidade e bem-estar urbano. O método busca equilibrar rigor científico com aplicabilidade prática, aproximando conteúdos técnicos da realidade cotidiana dos participantes e estimulando a adoção de práticas de baixo custo replicáveis em diferentes contextos sociais.

No Módulo 5 abordou a implementação de sistemas domésticos de aproveitamento de águas pluviais que representa uma estratégia eficaz para a gestão hídrica descentralizada, contribuindo para a redução do consumo de água potável e a mitigação da pressão sobre os mananciais urbanos:

- Módulo 5 – Como montar um sistema barato e simples (doméstico) de coleta de água da chuva – demonstração prática de montagem, destacando custos, componentes básicos e possibilidades de uso da água captada.

A viabilidade de tais sistemas reside na sua simplicidade construtiva e no baixo custo de implantação, características que os tornam acessíveis à população em geral. Conforme destacado por Tomaz (2003) e em consonância com as diretrizes da NBR 15527 (ABNT, 2019), um sistema básico compreende componentes essenciais como área de captação (telhado), calhas, condutores verticais, um filtro para descarte do primeiro fluxo (*first flush*) e um reservatório de armazenamento.

Na oficina foram apresentadas possibilidades de uso da água da chuva e como esse uso contribui para a sustentabilidade da residência. Embora não seja recomendada para consumo humano ou higiene pessoal sem tratamento avançado, a água da chuva é perfeitamente adequada para fins não potáveis, como irrigação de jardins, limpeza de áreas externas e descargas sanitárias (ABNT, 2019). Essas aplicações podem gerar uma economia substancial no consumo de água tratada, alcançando até 90% na irrigação e 30% no consumo residencial total, conforme destacado por Tomaz (2003). A manutenção periódica do sistema, incluindo a limpeza semestral do reservatório e a verificação mensal das calhas, é crucial para garantir a qualidade da água armazenada e a longevidade da infraestrutura. A adoção desses sistemas não apenas promove a economia financeira e a sustentabilidade ambiental, mas também atua como uma ferramenta prática de educação ambiental, conscientizando os usuários sobre a importância da conservação dos recursos hídricos.

Ao todo, foram contabilizados mais de 60 inscritos na oficina, oriundos de diferentes formações acadêmicas e profissionais, configurando um público diversificado e interdisciplinar. A análise do perfil revelou que a maior parte dos participantes possuía idade entre 26 e 35 anos, seguida pelo grupo de 36 a 45 anos, o que evidencia predominância de jovens adultos em fase de consolidação acadêmica e profissional (Figura 02). Esse perfil etário sugere que a oficina alcançou majoritariamente a população economicamente ativa, segmento que exerce papel estratégico na gestão e no uso dos recursos hídricos, seja por meio de suas atividades profissionais, seja pelas decisões cotidianas relacionadas ao consumo e ao uso da água. A presença predominante desse público amplia o potencial de efeito multiplicador das ações discutidas, uma vez que esses indivíduos tendem a ocupar posições de tomada de decisão, influenciar práticas institucionais e incorporar soluções sustentáveis em diferentes contextos produtivos e sociais. Além disso, indica uma oportunidade relevante para fortalecer a integração entre conhecimento técnico e aplicação prática, contribuindo para uma gestão hídrica mais consciente, eficiente e alinhada aos desafios contemporâneos.

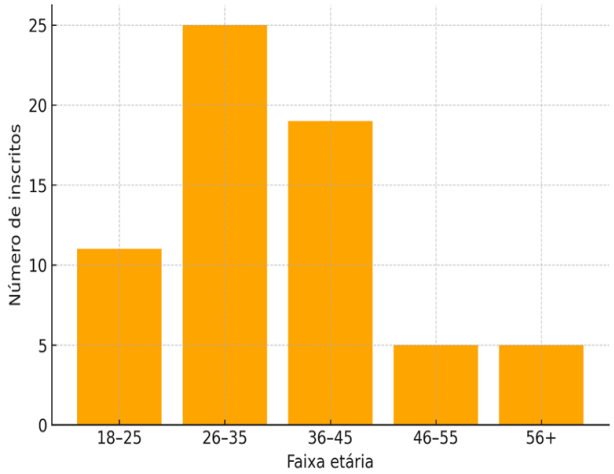


Figura 02: Faixa etária dos inscritos na oficina.
Fonte: Autores (2025).

Quanto à escolaridade, destacou-se a presença de inscritos com ensino superior completo e pós-graduação, além de significativa participação de estudantes de graduação, reforçando o caráter formativo e extensionista da atividade. No que se refere à área de atuação, houve predominância de profissionais de arquitetura e urbanismo, seguidos de engenheiros, geógrafos, biólogos, professores e técnicos administrativos, o que enriqueceu o debate ao incorporar diferentes perspectivas sobre os usos da água (Figura 03). A predominância de participantes oriundos das áreas de Arquitetura e Urbanismo e das Engenharias confere à oficina um alcance estratégico no contexto da gestão dos recursos hídricos. Trata-se de profissionais que costumam estar diretamente envolvidos no planejamento, projeto e execução de intervenções no território, cujas decisões influenciam de forma significativa o uso e a conservação da água em ambientes urbanos e rurais. Nesse sentido, a abordagem adotada pela oficina contribuiu para qualificar a atuação desses atores, incentivando a incorporação de práticas mais resilientes e sustentáveis em seus campos de atuação.

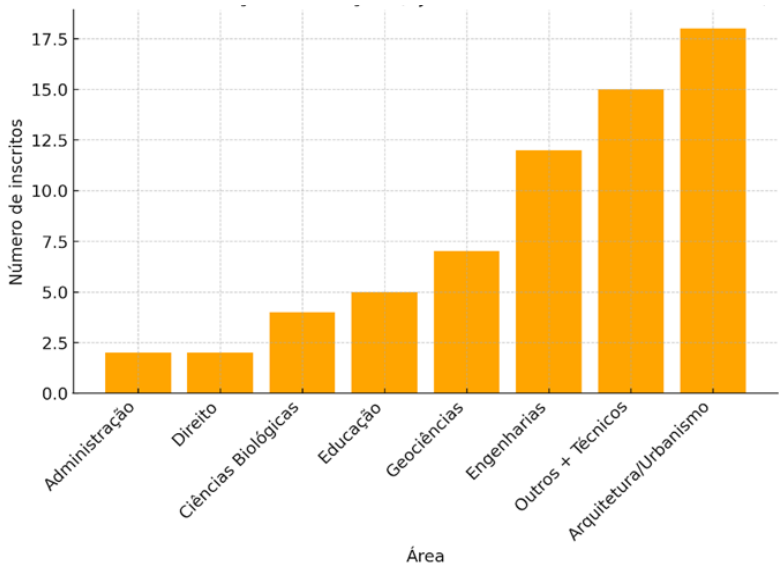


Figura 03: Área de atuação dos inscritos na oficina.
Fonte: Autores (2025).

Nos debates com os participantes, destacaram-se as seguintes contribuições:

- A necessidade de maior consciência sobre o destino do esgoto doméstico e sua relação direta com a qualidade da água e a saúde pública;
- O potencial do PSA como ferramenta de incentivo à preservação de nascentes;
- A eficácia de jardins de chuva como soluções de baixo custo para infiltração em áreas urbanas;
- A viabilidade de sistemas simplificados de captação de água de chuva, com aplicabilidade imediata no cotidiano.

A partir desse debate, a oficina demonstrou impacto positivo na educação para a sustentabilidade, articulando conteúdos técnicos com práticas acessíveis. Os participantes passaram a reconhecer de forma mais clara a interdependência entre saneamento, recursos hídricos, saúde pública e mudanças climáticas, superando uma visão fragmentada desses temas. Em termos

de engajamento, os conteúdos que envolveram demonstrações práticas e soluções de baixo custo — como os jardins de chuva e os sistemas de captação de água pluvial — despertaram maior interesse e participação ativa. Esses temas estimularam discussões mais aprofundadas e a troca de experiências entre os participantes, indicando seu potencial como estratégias pedagógicas eficazes. Tais resultados reforçam que abordagens participativas e contextualizadas contribuem não apenas para a assimilação de conteúdo, mas também para a promoção de mudanças concretas frente aos desafios da sustentabilidade no âmbito pessoal e profissional dos participantes.

Considerações Finais

A experiência da oficina confirmou que a transposição de conceitos técnicos para práticas simples e acessíveis fortalece a gestão participativa da água e contribui para a sensibilização comunitária. Entre os pontos fortes, destacaram-se a interdisciplinaridade da equipe, a clareza pedagógica e o alinhamento com políticas públicas — como a Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999) — e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU. Como fragilidade, observou-se a limitação de tempo, que restringiu o aprofundamento prático e a consolidação de algumas habilidades aplicadas. Para futuras edições, sugere-se ampliar a carga horária, incorporar dinâmicas interativas presenciais e estruturar instrumentos de avaliação pré e pós-oficina, de modo a mensurar de forma mais sistemática as mudanças de percepção e o aprendizado dos participantes.

Conclui-se que a oficina contribuiu para a formação acadêmica e profissional dos participantes e também dos autores, ao promover a integração entre teoria e prática em um contexto interdisciplinar. Ademais, estimulou a reflexão crítica dos envolvidos e consolidou-se como uma prática replicável de educação ambiental, com potencial de adaptação a diferentes realidades territoriais e institucionais.

Para além de seu caráter formativo, a oficina pode ser compreendida como um instrumento de apoio à governança da água, ao aproximar conhecimento técnico, tomada de decisão e práticas sociais. Ao qualificar atores inseridos em contextos profissionais e comunitários, a iniciativa contribui para decisões mais informadas e alinhadas à sustentabilidade, fortalecendo a gestão integrada dos recursos hídricos. Nesse sentido, a experiência avança de uma ação educativa pontual para um modelo aplicável de educação ambiental, com capacidade de influenciar processos decisórios, apoiar a implementação de políticas públicas e fomentar uma cultura de participação ativa na gestão dos recursos hídricos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), do Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Grupo de Trabalho de Educação Ambiental da Região Hidrográfica 07 de Santa Catarina (GTEA RH07SC).

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15527:** água de chuva — aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis — requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7229:** projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13969:** tanques sépticos — unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos — projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BENINI, R. M. Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n.2, 2015

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, 1997.

BRAGA, B. P. F. *et al.* **Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

GODECKE, M. V.; HUPFFER, H. M.; CHAVES, I. R. O futuro dos pagamentos por serviços ambientais no Brasil a partir da análise da Lei 12.651/2012 e da Lei 12.305/2010. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 31, p. 31–42, ago. 2014.

GUEDES, Leandro. **Jardins de chuva**. Vereda Urbana, 7 jan. 2019. Disponível em: https://www.veredaurbana.com.br/jardins-de-chuva. Acesso em: 27 fev. 2026.

HELLER, L.; CASTRO, J. E. (org.). **Política pública e gestão de serviços de saneamento.** Belo Horizonte: Editora UFMG; Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 2007.

METCALF & EDDY, Inc.; TCHOBANOGLOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. L. **Wastewater engineering:** treatment and resource recovery. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

MEYER, A. F. **The elements of hydrology.** New York: John Wiley & Sons, 1948.

PAGIOLA, S.; BISHOP, J.; LANDELL-MILLS, N. **La venta de servicios ambientales forestales.** 2. ed. Cidade do México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología, 2006.

SPERLING, M. von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2016.

SPERLING, M. von. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** *Vol. 3: lagoas de estabilização*. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2017.

SPERLING, M. von. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Vol. 1: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis.** São Paulo: Navegar, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** Ciência e Aplicação. Editora da UFRGS, 2003a.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem Urbana.** Ciência e Cultura, 2003b.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater.** Volume 2: wastewater use in agriculture. Geneva: WHO, 2006.

YU, K. **Sponge Cities:** Concept, Practice and Policy. 2017.

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS A PARTIR DO USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UM ESTUDO LUZ DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

1 Arthur dos Santos Souza: 2 Manoel Leandro Araújo e Farias; 3 Ana Maria Gonçalves Duarte; 4 Diego José Araújo Viégas; 5 Noêmia Angelo Pereira; 6 Luana Dantas Medeiros; 7 Hillary de Oliveira Marinho; 8 Vanessa Silva Santos

1 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: arthurdossantossouza5@gmail.com; 2 Universidade Federal de Campina grande, e-mail: mlaf.engcivil@gmail.com; 3 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br; 4 Universidade de Pernambuco -UPE, e-mail: diegoaraujoviegas@hotmail.com; 5 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: noemia.angelo@estudante.ufcg.edu.br; ;6 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: luanadantas.engenheira@gmail.com; 7 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail:hillary.marinho@estudante.ufcg.edu.br; 8 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: vanessa.silva@estudante.ufcg.edu.br

Palavras-chave: Resíduos; Solos; Ambiental.

Resumo

Um dos principais problemas relacionados à degradação ambiental é o descarte inadequado de grandes volumes de resíduos industriais, oriundos de processos de beneficiamento e da produção de matérias-primas ou de produtos amplamente comercializados. Esse descarte, além de expressivo em quantidade, envolve materiais com composições mineralógicas peculiares, potencializando os impactos negativos ao meio ambiente. Nesse contexto, a elevada disponibilidade desses resíduos, associada às suas características físico-químicas, configura-se como uma alternativa promissora frente à escassez de materiais adequados para aplicações em pavimentação e geotecnia. Sua incorporação em misturas de solos visa não apenas à melhoria do desempenho mecânico dos materiais, tornando-os aptos às solicitações estruturais, mas também à mitigação dos impactos ambientais decorrentes de sua disposição inadequada. Dessa forma, o presente trabalho propõe a incorporação de teores (10%, 20% e 30%) de resíduos de polimento de porcelanato (RPP) a um solo de baixa capacidade de suporte, com o objetivo de promover seu melhoramento e viabilizar sua aplicação em obras de pavimentação e geotecnia

Introdução

Segundo Pinto (2008), os solos constituem-se como um sistema de partículas sólidas agregadas, cujos vazios são preenchidos por água (ou outro fluido) e ar. Ademais, sua origem está associada aos processos de decomposição e intemperismo das rochas que compõem a crosta terrestre. Em consonância, a GEOSSINTEC (2023) define o solo como uma camada de material mineral e orgânico que recobre a superfície terrestre, composta essencialmente por partículas minerais, matéria orgânica e água.

Entre suas diversas aplicações, destaca-se o uso do solo como material constituinte das camadas de pavimentação, tanto em pavimentos rígidos quanto flexíveis. Contudo, para esse fim, é imprescindível que o material atenda a requisitos técnicos mínimos, como resistência mecânica, densidade adequada e estabilidade volumétrica, condições nem sempre verificadas em todos os tipos de solo. Nesse contexto, os solos lateríticos, que recobrem aproximadamente 28 milhões de quilômetros quadrados (cerca de 19% da superfície terrestre), apresentam ampla disponibilidade e potencial de uso. Entretanto, conforme apontado por Silva et al. (2023), esses materiais frequentemente não atendem aos critérios normativos exigidos para camadas estruturais de pavimentos rígidos e flexíveis, em razão de sua heterogeneidade mecânica e de índices de consistência inadequados. Adicionalmente, Lima e Santos (2022) destacam que solos de granulometria fina, associados a elevados limites de Limites de Atterberg, tendem a apresentar significativa instabilidade volumétrica e redução acentuada da capacidade de suporte quando submetidos a variações de umidade.

Diante das limitações que restringem sua aplicação, a estabilização de solos configura-se como uma intervenção estratégica voltada à adequação de suas propriedades geotécnicas às solicitações estruturais, promovendo ganhos de rigidez e resistência à ruptura, conforme destacado por Gomes et al. (2023). Sob a perspectiva da sustentabilidade da infraestrutura, os mesmos autores ressaltam que a estabilização constitui uma alternativa de baixo impacto ambiental, contribuindo para a redução da degradação associada à exploração de jazidas naturais. Nesse sentido, Souza e Ferreira (2024) evidenciam que o emprego de agentes estabilizantes, como a cal e o resíduo de polimento de porcelanato (RPP), não apenas aprimora as propriedades mecânicas do solo, como também minimiza o passivo ambiental de obras rodoviárias, viabilizando soluções ecoeficientes que conciliam desempenho estrutural e preservação ambiental.

A incorporação de cal hidratada ao solo promove modificações estruturais significativas, resultando na melhoria de parâmetros geotécnicos essenciais, como a rigidez, a estabilidade volumétrica — mitigando a expansibilidade — e a durabilidade frente a ciclos de umedecimento e secagem, conforme destacado por Nascimento et al. (2023). Esse comportamento decorre de reações pozolânicas de longo prazo, nas quais o hidróxido de cálcio interage com a sílica e a

alumina reativas do solo, formando compostos cimentantes, como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, responsáveis pelo ganho de resistência e coesão do material.

Como alternativa à exploração de jazidas naturais, tem-se intensificado o uso de materiais estabilizantes provenientes de resíduos industriais, os quais se mostram promissores tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental, ao contribuírem para a redução de impactos associados ao descarte inadequado. Nesse cenário, destaca-se o resíduo de polimento de porcelanato (RPP) como uma solução viável, especialmente em função da elevada produção cerâmica nacional. Nesse contexto, o RPP ganha relevância devido à expressiva geração desse subproduto no Brasil, terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos. Segundo a ANFACER (2022), a produção nacional atingiu cerca de 1.048,6 milhões de m² em 2021, o que resulta na geração de mais de 74 mil toneladas anuais de RPP, conforme indicado por Matos et al. (2018).

Com o objetivo de mitigar os impactos ambientais associados à exploração de jazidas naturais, tem-se intensificado o uso de materiais alternativos como agentes estabilizantes. Nesse contexto, resíduos industriais oriundos da indústria química têm se mostrado tecnicamente promissores, contribuindo simultaneamente para a sustentabilidade. De acordo com Martins et al. (2023), a incorporação de teores crescentes (3%, 6% e 9%) de resíduo de polimento de porcelanato (RPP) em um solo laterítico fino resultou em uma correlação direta entre o teor adicionado e o aumento do Índice de Suporte Califórnia (CBR), evidenciando sua eficácia como agente de reforço da capacidade de suporte e sua viabilidade para aplicação em camadas de pavimentação e outras finalidades geotécnicas. Complementarmente, Santos et al. (2025) destacam que essa modificação físico-química apresenta relevância ambiental significativa, ao contribuir para a redução dos elevados volumes de resíduos descartados de forma inadequada.

Pesquisas recentes voltadas à valorização de subprodutos industriais indicam que a incorporação de resíduo de polimento de porcelanato (RPP) em matrizes de solo natural promove ganhos expressivos no desempenho mecânico das misturas. Conforme observado por Martins et al. (2023), estudos experimentais com dosagens crescentes de RPP (3%, 6% e 9%) evidenciaram uma relação diretamente proporcional entre o teor incorporado e o aumento do Índice de Suporte Califórnia (CBR), consolidando o material como um agente eficaz de reforço da capacidade de carga. Adicionalmente, Ferreira e Costa (2024) verificaram que a adição de 9% de RPP promove significativa redução da plasticidade, com decréscimo do Índice de Plasticidade (IP) de valores elevados (25%) para níveis compatíveis com maior estabilidade (5%). Sob a ótica ambiental, Santos et al. (2025) ressaltam que tais modificações físico-químicas contribuem para a mitigação da instabilidade volumétrica, além de viabilizarem o aproveitamento de solos locais que, em condições naturais, seriam descartados em função de sua elevada expansividade.

Além dos ganhos técnicos, a utilização e transformação desses resíduos em agentes estabilizantes contribuem significativamente para a mitigação de problemas ambientais críticos. Conforme destacam Araujo e Moura (2024), o acúmulo decorrente do descarte inadequado pode levar à contaminação de corpos hídricos, à degradação ambiental e ao comprometimento da biodiversidade local, afetando também a segurança hídrica de bacias hidrográficas. Nesse contexto, a adoção do resíduo de polimento de porcelanato (RPP) justifica-se por sua ampla disponibilidade em âmbito nacional, facilidade de aplicação e pelos benefícios técnicos já comprovados na literatura. Contudo, seu principal potencial reside na expressiva contribuição para a redução de impactos ambientais, ao promover a mitigação de agentes poluidores e a destinação adequada de resíduos industriais.

Portanto, a presente investigação, objetiva-se na avaliação do comportamento mecânico da mistura do solo, cal e do resíduo industrial. A qual, busca-se corroborar e justificar o aproveitamento do citado resíduo, com alto potência de agressão ambiental

Materiais e Métodos

Para este trabalho, foram usados os seguintes materiais.

- Solo Laterítico Fino (PE-1), extraído em Cabo de Santo Agostinho (Pernambuco);



Figura 1 - Solo Laterítico Fino (PE-1)
Fonte: O autor (2026)

- Cal-Hidratada;



Figura 2 - Cal Hidratada
Fonte: O autor (2026)

- Resíduo de Polimento de Porcelanato.



Figura 3 - Resíduo de Polimento de Porcelanato
Fonte: O autor (2026)

Foram realizados ensaios de compactação conforme a norma DNIT ME 164/2018, cuja finalidade é a determinação da umidade ótima e da massa específica aparente seca dos materiais. O procedimento foi aplicado tanto ao solo natural quanto às misturas contendo 2% de cal e diferentes teores de resíduo de polimento de porcelanato (10%, 20% e 30%). De acordo com a referida norma, adotou-se a energia Proctor intermediária, caracterizada pela aplicação de 26 golpes em cada uma das cinco camadas de material compactado no interior do cilindro metálico.

Na sequência, com o objetivo de analisar o comportamento mecânico das misturas, realizou-se o ensaio de módulo de resiliência, conforme as normas DNIT ME 134/2018 e ME 181/2018. Esses ensaios submetem os materiais a solicitações de carregamentos cíclicos e repetidos, permitindo a avaliação de sua resposta elástica e/ou plástica. Dessa forma, torna-se possível estimar o desempenho estrutural de camadas de pavimento constituídas por tais materiais, bem como prever seu comportamento frente a diferentes condições de solicitação de carga. Nestes ensaios, foram utilizados os seguintes modelos os quais calibram os modelos analíticos que relacionam a resposta elástica (MR) aos níveis de tensão, utilizando regressão não linear. Para tal, seguem os modelos abaixo.

Modelo	Equação matemática
Clássico (Confinante) (BIAREZ, 1962)	$MR=k1\times\sigma 3^{k2}$
Clássico (Desvio) (SVENSON, 1980)	$MR=k1\times\sigma d^{k2}$
Composto (PEZO *et al.*, 1992)	$MR=k1\times\sigma 3k2\times\sigma d^{k3}$

Tabela 7 - Modelos de previsão do módulo de resiliência avaliado

Resultados e Discussões

Para com os resultados da compactação, do solo natural, do solo estabilizado com 2% de cal e com os três distintos teores de Resíduo (RPP), tem-se os seguintes resultados. Abaixo, segue o gráfico das curvas de compactação.

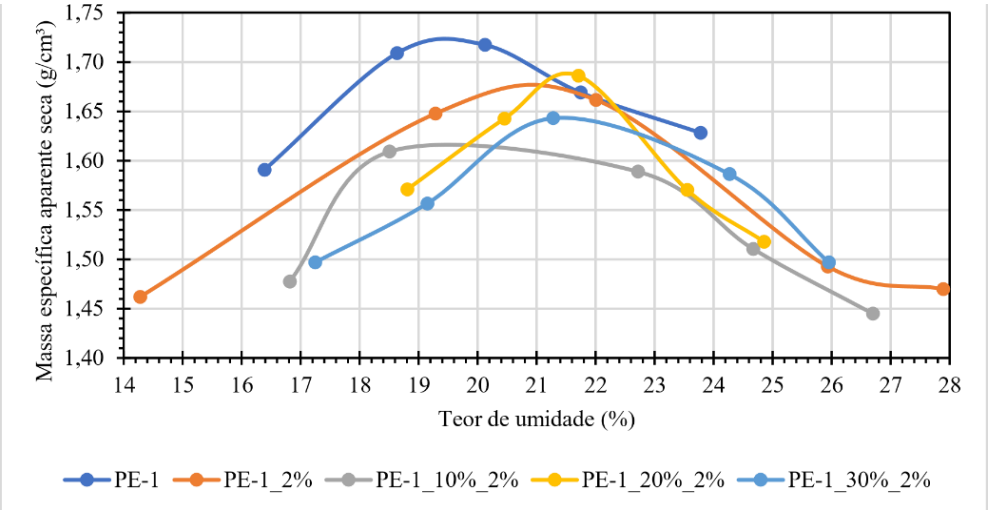


Figura 17 - Curvas de Compactação do solo e das misturas

A seguir, tem-se os resultados extraídos das curvas, dos valores de umidade ótima e de massa específica aparente seca, das amostras.

Amostras	Wótima (%)	ρd,max (g/cm³)
PE-1 (solo natural)	20,12	1,72
PE-1_2% (2% cal)	22,01	1,66
PE-1_10%_2% (10% RPP + 2% cal)	18,51	1,61
PE-1_20%_2% (20% RPP + 2% cal)	21,71	1,69
PE-1_30%_2% (30% RPP + 2% cal)	21,28	1,64

Tabela 8 - Resultados de umidade ótima e massa especifica aparente seca máxima das amostras

Os ensaios de compactação realizados no solo laterítico PE-1, estabilizado com 2% de cal e diferentes teores de resíduo de polimento de porcelanato (RPP), evidenciaram que a adição de cal promove o aumento da umidade ótima e melhora a trabalhabilidade do material, com leve redução da massa específica seca máxima. A incorporação de RPP apresentou comportamento não linear: o teor de 10% resultou em discreta redução da densidade, enquanto 20% proporcionou incremento da massa específica seca máxima, associado ao melhor arranjo e preenchimento dos vazios. Por outro lado, o teor de 30% ocasionou nova redução da densidade, indicando prejuízo à eficiência de compactação. O teor de 20% de RPP mostrou-se mais adequado para a otimização da densificação do solo estabilizado, com umidade ótima situada na faixa de 21% a 22%.

Estudos recentes têm corroborado o comportamento observado. De acordo com Oliveira et al. (2022), materiais finos com elevada área superficial específica, como o resíduo de polimento de porcelanato (RPP), demandam maiores teores de umidade para adequada lubrificação das partículas e obtenção de um arranjo estrutural mais eficiente durante a compactação de forma complementar, Costa e Almeida (2023) verificaram que a incorporação de resíduos cerâmicos finos promove aumento da massa específica seca máxima, associado à redução do índice de vazios, em função do melhor preenchimento dos poros pela fração fina (inferior a 0,075 mm). Resultados semelhantes foram reportados por Barbosa et al. (2024) e Ribeiro e Santos (2025), os quais evidenciaram melhorias na estrutura interna e na eficiência de compactação de solos estabilizados com resíduos industriais finos, reforçando a consistência dos achados desta pesquisa.

Em relação aos resultados de módulo de resiliência, tem-se que o solo natural (PE-1) apresentou MR médio inicial de 462 MPa, utilizado como referência. A adição de 2% de cal elevou significativamente a rigidez, atingindo 843 MPa aos 7 dias. Em contrapartida, a incorporação de RPP associada à cal promoveu redução inicial do MR, com valores de 404 MPa, 358 MPa e 326 MPa para teores de 10%, 20% e 30%, respectivamente. Com o avanço da cura, observou-se aumento progressivo do MR em todas as misturas, alcançando, aos 28 dias, 555 MPa, 474 MPa e 404 MPa, e, aos 84 dias, 535 MPa, 440 MPa e 501 MPa para 10%, 20% e 30% de RPP, respectivamente, indicando mitigação parcial da perda inicial de rigidez. Os modelos constitutivos confirmaram essas tendências: o modelo de confinamento apresentou aumento expressivo do parâmetro k_1 com a cal e valores intermediários com RPP; o modelo de desvio indicou menor sensibilidade; e o modelo composto apresentou melhor ajuste ($R^2 > 0,85$), sendo o mais representativo do comportamento mecânico. Em síntese, a cal promove ganho consistente de rigidez, enquanto o RPP reduz o MR inicial, com efeito parcialmente compensado ao longo da cura.

Amostra	Idade (dias)	Modelo	k1	k2	k3	R^2	MR médio
PE-1	0	Clássico (Confinante)	298,44	-0,15	-	0,16	462
		Clássico (Desvio)	27,24	-0,22	-	0,63	
		Composto	412,95	0,25	-0,36	0,85	
PE-1_2%	7	Clássico (Confinante)	1344,10	0,17	-	0,79	843
		Clássico (Desvio)	1008,76	0,08	-	0,31	
		Composto	1408,32	0,24	-0,07	0,87	
PE -1_10%_2%	7	Clássico (Confinante)	911,57	0,57	-	0,9597	404
		Clássico (Desvio)	850,48	0,35	-	0,587	
		Composto	1959,65	0,61	-0,04	0,9594	
PE-1_20%_2%	7	Clássico (Confinante)	625,43	0,20	-	0,4018	358
		Clássico (Desvio)	379,01	0,03	-	0,0109	
		Composto	759,53	0,52	-0,32	0,9483	
PE-1_30%_2%	7	Clássico (Confinante)	1008,26	0,41	-	0,8455	326
		Clássico (Desvio)	520,5	0,21	-	0,3679	
		Composto	1088,62	0,54	-0,14	0,9007	
PE-1_10%_2%	28	Clássico (Confinante)	1362,84	0,32	-	0,8477	555
		Clássico (Desvio)	827,45	0,18	-	0,4235	
		Composto	1429,83	0,40	-0,08	0,8765	
PE-1_20%_2%	28	Clássico (Confinante)	1050,23	0,28	-	0,8027	474
		Clássico (Desvio)	637,81	0,13	-	0,2753	
		Composto	1153,77	0,44	-0,16	0,9381	
PE-1_30%_2%	28	Clássico (Confinante)	1348,04	0,44	-	0,8885	404
		Clássico (Desvio)	729,49	0,27	-	0,5326	
		Composto	1364,49	0,46	-0,02	0,8901	
PE-1_10%_2%	84	Clássico (Confinante)	2292,82	0,53	-	0,958	535
		Clássico (Desvio)	1154,69	0,36	-	0,693	
		Composto	2225,13	0,48	0,05	0,9637	
PE-1_20%_2%	84	Clássico (Confinante)	2367,11	0,62	-	0,9551	440
		Clássico (Desvio)	2011,8	0,39	-	0,6258	
		Composto	2360,23	0,61	0	0,9551	
PE-1_30%_2%	84	Clássico (Confinante)	594,83	0,42	-	0,8174	501
		Clássico (Desvio)	818,75	0,22	-	0,378	
		Composto	1705,69	0,54	-0,12	0,8555	

Callegaro et al. (2022) conduziram estudos com um material de características semelhantes quanto à plasticidade e à granulometria, classificado como solo fino tropical. Os autores verificaram, por meio de ensaios de módulo de resiliência, valores na faixa de 100 a 400 MPa, próximos aos observados para o material deste estudo em seu estado natural. Em consonância com esses resultados, Silva e Santos (2024), ao estabilizarem um solo laterítico com brita e RAP em diferentes teores, observaram incremento significativo na resposta elástica. Na condição ótima, correspondente à mistura de 30% de solo, 35% de brita e 35% de RAP, foi obtido módulo de resiliência médio de 246,94 MPa. Dessa forma, evidencia-se que a incorporação de brita e RAP, assim como a adição de RPP e cal, contribui para a melhoria do desempenho mecânico, indicando potencial para adequação do material às exigências de uso em camadas de pavimentos.

Conclusões

O resíduo de polimento de porcelanato é descartado de forma inadequada e em grandes volumes, configurando-se como um potencial precursor de danos ambientais significativos e, por vezes, irreversíveis;

O solo laterítico fino não apresenta condições geotécnicas adequadas para aplicação em estruturas de pavimentação ou em outras obras de engenharia;

A aplicação do resíduo mostra-se viável e de interesse técnico, em função de sua elevada disponibilidade, o que favorece a logística de coleta e a realização de estudos;

resíduo demonstrou, com base nos ensaios realizados, ser uma alternativa sustentável para a estabilização de solos, justificando sua aplicação em obras de maior escala;

Verificaram-se melhorias significativas na rigidez e na resposta elástica das misturas com a incorporação de 20% de resíduo, apesar de se tratar de um teor elevado.

Agradecimentos

Ao altíssimo, por tudo em minha vida; sustentação, vigor e ânimo para com este trabalho e todos os demais.

A minha mãe Neuma Maria e meu irmão, Cícero Neto. Por comporem minha familia.

A professora Ana Maria, pelo o empenho e dedicação para com os alunos. Ao meu orientador Manoel Leandro, por toda orientação necessária. A toda a equipe do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP). Aos meus amigos, Anderson Tavares, Victor Leite, Alysson Santos, Alvaro Alvino, Geraldo Luiz, Asaffe Nilson, Felipe Borges, pelo o apoio e amizade valiosa.

A Maria de Fátima Coutinho Gurjão Macêdo, por todo o apoio e carinho, tal como nunca deixar de acreditar em minha pessoa.

Referências

ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. Setor de cerâmica. Panorama 2022: produção brasileira de revestimentos cerâmicos. Disponível em: https://www.anfacer.org.br/. Acesso em: 20 abr. 2026.

ARAUJO, J. L.; MOURA, F. R. Impactos da disposição inadequada de resíduos finos de porcelanato em ecossistemas terrestres. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 45-63, 2024.
BARBOSA, J. S.; FERREIRA, D. M.; CARVALHO, E. A. Aplicação de resíduos cerâmicos em solos para pavimentação: análise geotécnica. Revista Matéria, v. 29, n. 1, p. 1-12, 2024.

CALLEGARO, Rafael M.; SPECHT, Luciano P.; CERATTI, Jorge A. P. Análise estatística do módulo de resiliência de solos submetidos a diferentes sequências de tensões. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2022, Campinas. Anais [...]. Campinas: Galoá, 2022. Disponível em: https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/analise-estatistica-do-modulo-de-resiliencia-de-solos-submetidos-as-diferentes-s?lang=pt-br. Acesso em: 24 abr. 2026.

COSTA, R. L.; ALMEIDA, F. P. Influência de resíduos industriais na compactação de solos tropicais. Revista Transportes, v. 31, n. 2, p. 45-60, 2023.

GEOSSINTEC. Os principais tipos de solo e seus impactos para a engenharia geotécnica. [S. l.], 7 jun. 2023. Disponível em: https://www.geossintec.com.br/os-principais-tipos-de-solo-e-seus-impactos-para-a-engenharia-geotecnica. Acesso em: 20 abr. 2026.

GOMES, L. F. et al. Avaliação do desempenho mecânico de solos estabilizados quimicamente para fins rodoviários. Revista de Engenharia Civil e Urbana, Porto Alegre, v. 9, n. 2, p. 55-70, 2023.

LIMA, R. J.; SANTOS, P. H. Análise do comportamento expansivo de solos lateríticos finos sob diferentes estados de compactação. Geotecnia e Meio Ambiente, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 12-29, 2022.

MARTINS, L. A. et al. Influência da adição de resíduo de polimento de porcelanato nas propriedades geomecânicas de solos tropicais. Geotecnia e Construção, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 33-49, 2023.

OLIVEIRA, M. A.; SOUZA, T. R.; LIMA, G. S. Avaliação do comportamento de solos estabilizados com resíduos cerâmicos finos. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 15, n. 4, p. 1-15, 2022.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos: com exercícios resolvidos em unidades SI. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIBEIRO, L. C.; SANTOS, P. H. Estabilização de solos com resíduos industriais: efeitos na compactação e resistência. Revista Engenharia Civil, v. 35, n. 1, p. 77-92, 2025.

SANTOS, T. R. et al. Economia circular na pavimentação: análise do ciclo de vida de solos estabilizados com resíduos minerais. Sustainable Infrastructure Journal, Curitiba, v. 14, n. 3, p. 201-218, 2025.

SILVA, A. C. et al. Desafios na utilização de solos tropicais em camadas de base e sub-base de pavimentos asfálticos. Journal of Engineering and Technology, Brasília, v. 15, n. 3, p. 102-118, 2023.

SILVA, Letícia Urbano da; SANTOS, Adriana Goulart dos. Estudo do comportamento resiliente de um solo laterítico estabilizado com brita e RAP. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2023. Trabalho vinculado ao Programa de Iniciação Científica (PROBIC).

SOUZA, M. A.; FERREIRA, K. C. Efeito da adição de cal nas propriedades físico-químicas de solos tropicais: uma análise experimental. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 10, n. 3, p. 12450-12468, 2024.

ESTRATÉGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA POLÍTICA ESTADUAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM MATO GROSSO: O PROJETO "FOLHAS QUE FLORESCEM"

1 Rhaniely Félix Vasconcelos, 2 Marianny Ester Lima da Silva, 3 Leonardo da Silva Mendes, 4 Fernanda Facundes da Silva

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: rhaniely.vasconcelos@sou.ufmt.br; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: marianny.silva@sou.ufmt.br; 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail leonardo.mendes@sou.ufmt.br; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: fernanda.silva14@sou.ufmt.br

Palavras-chave: Mato Grosso; Educação Ambiental; Papel semente.

Resumo

Este trabalho apresenta a proposta metodológica do projeto "Folhas que Florescem", concebido como uma estratégia para viabilizar as diretrizes da Política Estadual de Educação Ambiental de Mato Grosso (Lei nº 10.903/2019). A proposta consiste na utilização da fabricação de papel semente como recurso pedagógico no ensino básico. A metodologia detalha o processo de reciclagem artesanal com a inclusão biológica de sementes, visando transformar o descarte de resíduos papelórios em uma atividade de plantio e sensibilização ecológica. Como resultado esperado, a proposta busca preencher a lacuna entre a teoria legislativa e a prática escolar, promovendo o engajamento entre a comunidade escolar e o fortalecimento da percepção ambiental de forma interdisciplinar e de baixo custo.

Introdução

A crise ambiental contemporânea exige que os processos educativos transcendam a mera transmissão de informações e se convertam em práticas transformadoras. A Educação Ambiental (EA), conforme definida pela Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999) e reforçada em nível regional pela Política Estadual de Mato Grosso (Lei nº 10.903/2019), é um componente essencial e permanente da educação nacional, devendo estar presente em todos os níveis e modalidades do processo educativo.

Mato Grosso, estado com vasta biodiversidade e complexos desafios ambientais decorrentes da expansão da fronteira agrícola e urbana, necessita de estratégias pedagógicas que conectem a realidade local com as metas globais de sustentabilidade. No entanto, observa-se que, apesar do robusto arcabouço legal, muitas instituições de ensino básico encontram barreiras para a implementação prática da EA. Essas dificuldades variam desde a falta de recursos financeiros até a ausência de metodologias que consigam integrar conteúdos de ciências, matemática e artes de forma orgânica.

Neste cenário, o projeto "Folhas que Florescem" propõe a técnica do papel semente como um objeto de aprendizagem multifacetado. O papel semente não é apenas um produto reciclado; é um suporte de vida que carrega em sua fibra a promessa de uma planta. A fabricação artesanal permite abordar temas como o ciclo da celulose, o gerenciamento de resíduos sólidos (conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei 12.305/2010), botânica, fisiologia vegetal e economia circular. O presente artigo detalha as bases dessa proposta, buscando oferecer um roteiro operacional para educadores e gestores públicos do estado.

Referencial Teórico

Política Estadual de Educação Ambiental em Mato Grosso

A Lei nº 10.903, de 11 de junho de 2019, estabelece princípios, objetivos e diretrizes para a educação ambiental no estado. Entre seus objetivos fundamentais, destaca-se o estímulo à "participação individual e coletiva, permanente e responsável, na preservação do equilíbrio do meio ambiente". O projeto "Folhas que Florescem" alinha-se diretamente ao Artigo 11 desta lei, que incentiva a criação de projetos que promovam a "interdisciplinaridade e a transversalidade das ações de educação ambiental".

Economia Circular e a Escola como Laboratório

A transição de uma economia linear (extrair – produzir - descartar) para uma economia circular é um dos pilares da sustentabilidade moderna. Na escola, isso se traduz em transformar o desperdício em insumo. O papel é um dos resíduos mais abundantes no ambiente escolar. Segundo dados da ABRELPE, o papel e o papelão representam cerca de 13% dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. Ao implementar oficinas de papel semente, a escola deixa de ser apenas uma consumidora de recursos e passa a ser uma unidade produtora de biotecnologia social.

A BNCC e a Educação Ambiental

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) coloca a "Responsabilidade e Cidadania" como uma de suas competências gerais. O projeto permite que o aluno "exerça a cidadania com base em princípios éticos, democráticos, sustentáveis e solidários". Na área de Ciências da Natureza, o projeto atende à competência de "analisar, compreender e explicar características, fenômenos e processos relativos ao mundo natural", especificamente no estudo das plantas e dos impactos ambientais.

Materiais e Métodos

A metodologia do projeto "Folhas que Florescem" foi desenhada para ser de baixo custo, utilizando materiais que podem ser encontrados na própria escola ou adquiridos com orçamento mínimo.

Cronograma de implementação

A implementação é sugerida em um ciclo de quatro semanas:

Semana	Fase	Principais Atividades
01	Sensibilização	Palestras sobre resíduos, diagnóstico do descarte de papel na escola e coleta seletiva interna.
02	Oficinas Técnicas	Triagem do papel, produção da polpa e inclusão das sementes.
03	Secagem e Acabamento	Monitoramento da umidade, corte do papel e personalização pedagógica.
04	Plantio e Avaliação	Distribuição dos papéis, plantio em hortas escolares/domésticas e relatórios de germinação.

Quadro 01: Cronograma de Implementação do Projeto.
Fonte: Autores (2026).

Procedimento Técnico Detalhado

As etapas técnicas são as seguintes:

1. **Triagem e Fragmentação:** Coleta de papéis sem películas plásticas, picados em pedaços de 2x2 cm.
2. **Hidratação e Maceração**: Molho em água por 12 a 24 horas para amolecer as fibras.
3. **Produção da Polpa:** Uso de liquidificador na proporção de 1 parte de papel para 3 de água, por 30 a 45 segundos.
4. **Neutralização e Coloração:** Uso opcional de corantes naturais (açafrão ou beterraba).
5. **Inoculação Biológica:** Adição manual de sementes após o uso do liquidificador para evitar danos.
6. **Moldagem e Prensagem:** Coleta da polpa com telas de nylon e remoção do excesso de água com panos absorventes.
7. **Secagem Controlada:** Secagem à sombra por 48 a 72 horas em local ventilado.

Especificação das Sementes Recomendadas

Espécie	Nome Científico	Vantagem Pedagógica
Manjericão	*Ocimum basilicum*	Fácil germinação e uso na culinária escolar.
Rúcula	*Eruca sativa*	Ciclo curto (colheita em 30 dias).
Tomate Cereja	*Solanum lycopersicum*	Estudo de polinização e frutificação.
Zínia	*Zinnia elegans*	Ornamental, atrai polinizadores.

Quadro 02: Especificação das Sementes Recomendadas para o Papel Semente.
Fonte: Autores (2026).

Resultados esperados e Discussão

Dimensão Pedagógica e Interdisciplinar

Ao produzir o próprio material, o aluno desenvolve um "sentimento de pertença", além de permitir cálculos matemáticos sobre redução de lixo, exploração artística de texturas e estudo geográfico sobre o impacto de aterros sanitários em Mato Grosso.

Dimensão Legal e Administrativa

O projeto oferece às Secretarias de Educação um método prático para cumprir as metas do Plano Estadual de Educação Ambiental, funcionando como um protocolo replicável para o Projeto Político Pedagógico (PPP).

Dimensão Técnico-Ambiental

A produção de 1 kg de papel reciclado artesanalmente economiza de 10 a 20 litros de água e evita emissões de metano. Estima-se o potencial de inserção de milhares de novas plantas na comunidade a partir da produção escolar.

Análise de Viabilidade Econômica

O investimento inicial estimado para uma escola média é:

Item	Quantidade Estimada	Custo Estimado (R$)
Liquidificador Industrial	01	450,00
Molduras de Madeira/Tela	10	150,00
Sementes (Sachê 50g)	20	120,00
Bacias Plásticas	05	60,00
TOTAL	**-**	**780,00**

Quadro 03: Estimativa de Custos para Implantação em Unidade Escolar Média.
Fonte: Autores (2026).

Considerações Finais

Conclui-se que o projeto "Folhas que Florescem" possui viabilidade técnica e pedagógica para atuar como braço operacional da legislação ambiental em Mato Grosso. A proposta reafirma o papel da universidade pública em desenvolver tecnologias sociais de baixo custo que solucionem demandas reais da sociedade. Acredita-se que, uma vez implantado, o projeto fortalecerá a cultura da sustentabilidade no estado, transformando a percepção dos alunos sobre o impacto humano no meio ambiente.

Critério Avaliado	Antes da Aplicação do Projeto	Após a Aplicação do Projeto	Evidência Esperada	Método de Avaliação
Consciência ambiental	Baixa	Moderada a alta	Maior cuidado com descarte de papel	Observação direta
Participação dos alunos	Limitada	Elevada	Engajamento nas oficinas práticas	Registro em aula
Compreensão sobre reciclagem	Superficial	Aplicada	Capacidade de explicar e executar o processo	Questionário simples
Interesse por práticas ambientais	Baixo	Alto	Relatos de interesse em plantio e reutilização	Relato dos alunos
Aplicação prática do conhecimento	Inexistente	Presente	Produção de papel semente e uso fora da escola	Atividade prática

Quadro 04: Avaliação qualitativa do impacto pedagógico do projeto “Folhas que Florescem”.
Fonte: Autores (2026) com base em BRASIL (2010) e REIGOTA (2017).

Variável Analisada	Condição Sem Reaproveitamento	Condição Com Papel Semente	Resultado Esperado	Forma de Verificação
Volume de resíduos	Alto descarte em lixo comum	Redução significativa	Diminuição do acúmulo de resíduos	Estimativa comparativa
Destinação do papel	Descarte sem reaproveitamento	Reutilização com função ecológica	Reintrodução no ciclo natural	Observação direta
Taxa de reaproveitamento	Nula ou muito baixa	Elevada (uso de resíduos escolares)	Aumento do reaproveitamento interno	Comparação prática
Germinação das sementes	Inexistente	Parcial a satisfatória	Desenvolvimento de plantas após plantio	Acompanhamento do plantio
Impacto ambiental	Negativo (geração de resíduos)	Positivo (educação + reaproveitamento)	Redução de impacto e aumento da consciência	Análise qualitativa

Quadro 05: Avaliação técnico-ambiental da reutilização de resíduos papelórios com inclusão de sementes. Fonte: Autores (2026) com base em BRASIL (2010) e REIGOTA (2017).

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pelo apoio ao desenvolvimento desta proposta, e ao incentivo às práticas de Engenharia Sanitária e Ambiental voltadas à educação.

Referências Bibliográficas

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, 2022.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular (BNCC)**. Ministério da Educação. Brasília, 2018.

BRASIL. **Lei no 9.795, de 27 de abril de 1999**. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Brasília, DF, 1999.

FREIRE, P. **Pedagogia da Autonomia: Saberes necessários à prática educativa**. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

LOUREIRO, C. F. B. **Trajetórias e Fundamentos da Educação Ambiental Crítica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Cortez, 2012.

MATO GROSSO. **Lei nº 10.903, de 11 de junho de 2019**. Dispõe sobre a Política Estadual de Educação Ambiental e o Sistema Estadual de Educação Ambiental do Estado de Mato Grosso. Cuiabá, MT: Assembleia Legislativa, 2019.

REIGOTA, M. **O que é Educação Ambiental**. São Paulo: Brasiliense, 2017.

SOUZA, R. A.; TAVARES, M. G. **Reciclagem de papel e sementes: uma proposta de ensino de botânica e sustentabilidade**. Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 14, n. 2, p. 88-102, 2019.

UNESCO. **Educação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**: objetivos de aprendizagem. Brasília: UNESCO, 2017.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL NA PRIMEIRA INFÂNCIA: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA G5 AMBIENTAL E GEORREFERENCIAMENTO NO ESTUDO DE CASO DE UMA ESCOLA PÚBLICA EM CARUARU - PE

1 Gilson Lima da Silva, 2 Cássia Gisele Dias Porto, 3 Marcos Antônio Paulo da Cunha, 4 Weverton Samuel Onofre de Farias, 5 José Floro de Arruda Neto e 6 José Vitor da Silva Aragão

1 Universidade Federal de Pernambuco, PPGECAM e-mail: gilson.lsilva@ufpe.br; 2 Universidade Federal de Pernambuco, PPGECAM e-mail: cassia.porto@ufpe.br, 3 Universidade Federal de Pernambuco, UFPE-CAA, e-mail: marcos.cunha1903@hotmail.com, 4 Universidade Federal de Pernambuco, UFPE-CAA, e-mail: wevertonfarias@hotmail.com, 5 Universidade Federal de Pernambuco, PPGEQ, e-mail: floro.arruda@ufpe.br, 6 Universidade Federal de Pernambuco, PPGEQ, e-mail: josevitor.aragao@ufpe.br

Palavras-chave: Educação ambiental; Metodologia G5 Ambiental; Georreferenciamento de mudas.

Resumo

A Educação Ambiental (EA) constitui um processo formativo essencial para o desenvolvimento de conhecimentos, habilidades e atitudes voltadas à sustentabilidade. No contexto brasileiro, entretanto, ainda se observam lacunas na implementação de práticas pedagógicas estruturadas desde a primeira infância. Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar a aplicação da Metodologia G5 Ambiental em um Centro Municipal de Educação Infantil (CEMEI), no município de Caruaru-PE, com ênfase no eixo de Gestão de Fauna e Flora (G4). Trata-se de um estudo de caso com abordagem qualitativa, no qual as atividades envolveram o plantio de mudas nativas e o georreferenciamento por meio de ferramentas digitais acessíveis, como GPS Essentials e QGIS. Os dados foram obtidos por observação direta das interações, comportamentos e percepções das crianças durante a intervenção pedagógica, sendo analisados por meio de análise temática. Os resultados indicam aumento do engajamento, da sensibilização ecológica e do senso de pertencimento territorial, evidenciando a eficácia da aprendizagem experiencial. Além disso, a integração entre práticas pedagógicas e tecnologias geoespaciais contribuiu para ampliar a compreensão sobre espaço, território e sustentabilidade, mesmo em contextos de recursos limitados. A metodologia demonstrou potencial de replicabilidade e alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente ODS 4, ODS 11 e ODS 13. Os resultados evidenciam o potencial da integração entre educação ambiental e geotecnologias como estratégia inovadora para formação socioambiental na infância.

Introdução

É indiscutível o fato de que o meio ambiente apresenta, cotidianamente, sinais intensos de desequilíbrio. A exploração constante e excessiva de recursos naturais está pautada numa lógica sistemática que desconsidera as demandas socioambientais e se respalda nos interesses econômicos (Martins e Araújo, 2021). A crescente crise ambiental global, marcada por mudanças climáticas, perda de biodiversidade e degradação dos recursos naturais, evidencia a necessidade urgente de repensar modelos de desenvolvimento e fortalecer políticas voltadas à sustentabilidade.

Uma das ferramentas imprescindíveis para reversão do quadro de crise ambiental é a Educação Ambiental (EA), que ajuda a preservar o meio ambiente através da promoção de novas posturas de utilização dos recursos naturais, pois são a base da sustentabilidade da vida, tanto de posturas pessoais até das gestões ambientais em empresas, organizações em geral, principalmente de empresas privadas e públicas.

A habilidade de adaptação e inovação por parte dos administradores escolares é fundamental para enfrentar desafios futuros e garantir uma educação de alta qualidade para todos (Xerfan, 2023). Deveria haver um maior investimento em programas de capacitação de EA para gestores educacionais, diretores, gerentes e supervisores de diferentes instituições (incluindo empresas), para que as pessoas responsáveis por toda e qualquer ação educacional promovessem subsídios de como trabalhar a EA como uma base para ampliar e consolidar práticas sustentáveis e conscientes em diferentes setores, garantindo a efetividade das ações e o alcance dos objetivos socioambientais de longo prazo. (Lima e Araújo, 2023).

Nesse contexto, a EA assume papel estratégico ao possibilitar a formação de cidadãos críticos, conscientes e engajados na promoção de práticas sustentáveis. A EA, quando inserida desde os primeiros anos de vida escolar, o que se chama de primeira infância, contribui de forma significativa para a construção de valores, atitudes e comportamentos responsáveis diante do meio ambiente, tornando-se fundamental no processo de transformação socioambiental.

Inspirada na concepção de educação libertadora, defendida por Paulo Freire, a iniciativa ilustrada no trabalho compreende a aprendizagem como um processo construído coletivamente, em que educadores e educandos vivenciam a experiência do conhecimento em diálogo constante com a realidade. Mais do que transmitir conteúdos, trata-se de criar condições para que as crianças compreendam o mundo em que vivem, desenvolvam senso crítico e construam significados a partir de sua própria prática social (Freire, 2019).

Nesse contexto, viver o processo de educação ambiental construída no cotidiano escolar possibilita que os sujeitos se reconheçam como parte do ambiente, fortalecendo a autonomia, a corresponsabilidade e a capacidade de transformar sua realidade socioambiental. Assim, esse estudo de caso busca ilustrar a aplicação prática da EA por meio da metodologia criada pelo grupo de pesquisa GAMA da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A metodologia foi aplicada com um enfoque no eixo G4 (Fauna e Flora) através do plantio de mudas no espaço escolar de ecovivência.

Inicialmente foi realizado o plantio de 4 mudas no Centro Municipal de Educação Infantil (CEMEI) Professor Carlos Antônio Amaral de Almeida, situado em Caruaru-PE e realizado o georreferenciamento das mudas plantadas e arvores existentes na unidade. A técnica de georreferenciamento mapeia e localiza elementos ambientais usando técnicas avançadas permitindo identificar áreas críticas e elaborar estratégias eficazes para a gestão ambiental (Moura *et al*., 2024).

A existência de espaços verdes nas cidades é um fator que ultrapassa o ponto de vista estético, contribuindo para a amenização da temperatura, diminuição do ruído e para a melhora do ambiente urbano como um todo. Com isso, a introdução de planejamento paisagístico aliado à educação ambiental nas escolas propicia que os estudantes conheçam as espécies vegetais e sua importância, sobretudo as ocorrentes no bioma que estão inseridos, neste caso a Caatinga (Souza *et al*., 2023).

Justifica-se, portanto, a relevância deste estudo pela necessidade de desenvolver e difundir experiências inovadoras que fortaleçam a educação ambiental desde a primeira infância, contribuindo para a formação de sujeitos capazes de compreender e atuar frente aos desafios socioambientais contemporâneos.

A aplicação da metodologia G5 Ambiental no espaço educacional representa iniciativa concreta de integração entre o ensino infantil e ações de extensão do ensino superior através de ações e práticas sustentáveis e pedagógicas, neste caso, o plantio e georreferenciamento de mudas nativas, permite o desenvolvimento de práticas tangíveis como acompanhamento do crescimento das mudas, geração de mapas, atividades ligadas ao manejo, contemplação de fauna e flora, entre outras, além de inúmeras competências que extrapolam a tangibilidade como a criação de vínculos afetivos, responsabilidade com o território.

Em âmbito nacional, discussões como a de Kronenberger (2019) apontam os desafios da construção dos indicadores globais dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos na Agenda 2030 criada pela Organização das Nações Unidas (ONU). Esse estudo enfatiza a importância do uso dos ODSs pelos tomadores de decisão e gestores, públicos e privados, no planejamento de ações e empreendimentos, na formulação de políticas públicas a fim de garantir a continuidade e evolução no alcance das metas da Agenda 2030.

Essa iniciativa dialoga diretamente com os ODS, em especial o ODS 4 (Educação de Qualidade), ao promover práticas pedagógicas inovadoras que qualificam a aprendizagem e fortalecem a formação cidadã desde a infância. Contribui também para o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao estimular a valorização do território por meio do plantio e do georreferenciamento de mudas, fortalecendo a integração entre escola, comunidade e ambiente urbano. Além disso, relaciona-se ao ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), uma vez que o cultivo e o monitoramento das árvores ampliam a consciência sobre a importância da mitigação dos efeitos climáticos e incentivam ações locais que refletem em impactos globais.

A relação entre a EA e os ODS da Agenda 2030 é intrínseca e de caráter estratégico. A EA configura-se como um instrumento essencial para a promoção e efetivação dos ODS, ao contribuir para a conscientização da população, a formação de cidadãos críticos e a disseminação de práticas sustentáveis. Nesse contexto, a questão ambiental assume relevância global, e a Agenda 2030, em consonância com a perspectiva da EA, concretiza-se por meio de propostas educativas, em especial no âmbito do ODS 4, meta 4.7 (Rodrigues, 2024).

Esse trabalho contribui com a ODS 4, especificamente com a meta 4.7, pois é uma iniciativa que dialoga com o objetivo de até 2030, garantir que todos os alunos adquiram conhecimentos e habilidades necessárias para promover o desenvolvimento sustentável, inclusive, entre outros, por meio da educação para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida sustentáveis, direitos humanos (UN, 2025).

É necessário agir localmente, pensando globalmente. Ao articular inovação tecnológica, sensibilização ecológica e participação comunitária, essa experiência contribui não apenas para o fortalecimento da educação ambiental local, mas também para o alinhamento do contexto escolar às metas da Agenda 2030 e às discussões globais sobre mudanças climáticas.

Metodologia

O presente estudo de caso adotou uma abordagem qualitativa, de caráter descritivo, com o objetivo de compreender as interações, percepções e comportamentos das crianças e dos profissionais envolvidos durante a realização das atividades práticas. A pesquisa foi desenvolvida em um Centro Municipal de Educação Infantil (CEMEI), no município de Caruaru-PE, envolvendo crianças da educação infantil, professores, equipe gestora e monitores externos responsáveis pela condução das atividades.

A prática referente ao eixo G4 da Metodologia G5 Ambiental foi realizada no CEMEI, registrado no INEP sob o código 26190842. A escolha da instituição se fundamentou em critérios de infraestrutura e potencial pedagógico, visto que o CEMEI dispõe de um ambiente seguro e acolhedor, favorável ao desenvolvimento integral das crianças, além de ter sido indicado pela prefeitura municipal em razão da ausência de áreas verdes aproveitadas, o que possibilita a implantação de práticas de Educação Ambiental. O CEMEI foi inaugurado em 2020. A instituição conta com 10 salas de aula, de aula, uma sala multiuso, fraldários, ambiente para amamentação, lavanderia, copa, cozinha, playground, entre outros espaços. Atualmente possui 15 turmas e um total de 361 alunos.



Figura 01: Entrada do CEMEI Professor Carlos Antônio Amaral de Almeida.
Fonte: Autores (2025)

A coleta de dados qualitativos foi realizada por meio de observação direta sistemática, conduzida antes, durante e após a execução das atividades. Foram registradas as interações dos estudantes com o ambiente, suas reações ao contato com o solo, plantas e organismos presentes, bem como as dinâmicas de interação entre pares, professores e monitores. Os registros foram realizados pelos monitores, que também atuaram na mediação pedagógica e no esclarecimento de dúvidas.

Para a análise dos dados, adotou-se a técnica de análise temática de conteúdo, conforme abordagem proposta por Bardin (2016), permitindo a identificação, categorização e interpretação de padrões recorrentes nas percepções e comportamentos observados. As categorias analíticas foram definidas a partir da recorrência dos registros, contemplando aspectos como sensibilização ambiental, engajamento, percepção ecológica e interação socioambiental.

Os monitores prepararam as covas e organizaram o substrato ao lado dos locais de plantio para facilitar o manuseio. Em seguida, as crianças foram conduzidas ao canteiro, onde receberam orientações básicas sobre sustentabilidade, incluindo a importância das árvores e dos ecossistemas. Posteriormente, participaram do plantio, preenchendo as covas com substrato de forma orientada e colaborativa, o que favoreceu a aprendizagem por meio da experiência prática.

Montessori (2015), sugere que não é suficiente falar sobre a natureza ou tentar ensinar a criança de forma abstrata e forçada. Se uma criança está em ambientes fechados, limitada a aulas teóricas ou instruções sem contexto, o amor pela natureza não será genuinamente cultivado. É essencial que a criança tenha contato direto com o ambiente natural para mexer na terra, observar as plantas, sentir os elementos da natureza. É assim que esse vínculo se fortaleça e se transforme em um hábito positivo e significativo. Essa conexão vai além do conhecimento intelectual, tornando-se parte do próprio ser da criança, moldando sua identidade de maneira profunda. É nesse espaço de liberdade e descoberta que a criança desenvolve o seu eu, em um processo que respeita seu ritmo e suas necessidades (Diniz e Ariosi, 2025).

Já havia sido plantada duas mudas da chamada Pata-de-Vaca (*Bauhinia forficata*) nesse CEMEI. Para essa ação foram obtidas quatro mudas para o plantio, sendo uma de Ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*), duas de Ipê-rosa (*Handroanthus heptaphyllus*) e uma de Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*), além de composto orgânico utilizado para favorecer o crescimento e a sobrevivência das espécies. A gestora da instituição selecionou duas turmas específicas para participarem do processo de plantio (descrever posteriormente quais foram as turmas). Para a inserção das mudas, foram abertas quatro covas com profundidade entre 70 e 80 cm, distribuídas em diferentes pontos: três localizadas no pátio da escola e uma na entrada principal.

A escolha das mudas utilizadas no plantio não foi desproposital, mas pautada na valorização da flora regional, optando-se por espécies nativas da Caatinga do Agreste Pernambucano. Essa decisão visou não apenas favorecer a adaptação e resistência das árvores às condições climáticas do semiárido, mas também reforçar a importância da preservação da biodiversidade local. Ao priorizar espécies nativas, a atividade contribui para a recuperação ecológica do território, a manutenção dos serviços ambientais e o fortalecimento do vínculo das crianças com o bioma em que vivem, promovendo consciência ambiental na realidade local.

No local do plantio, ilustrado na realizou-se o georreferenciamento das espécies por meio do aplicativo de celular GPS Essentials, utilizando o sistema de GPS do aparelho para registrar as coordenadas exatas de cada muda plantada. O GPS Essentials permite gerenciar pontos de interesse (*waypoints*), rotas e trilhas, e permite a exportação e importação de dados em formatos como KML e GPX. A Figura 4 ilustra a localidade do plantio.



Figura 02: Local do plantio de mudas.
Fonte: Autores (2025)

Durante o plantio, o usuário registrou a localização da muda capturando as coordenadas via GPS no celular, fotografaram-se as mudas para documentar o local e inserir informações sobre a espécie da muda e data do plantio. O aplicativo salvou esses dados, que podem ser acompanhados e monitorados em tempo real, com mapas que mostram cada ponto de plantio georreferenciado. foi criado para facilitar o registro de plantios e o acompanhamento via georreferenciamento, o que permitiu registrar individualmente cada muda com localização GPS e fotos, além de outras funcionalidades para a gestão completa do projeto.

O mapa do município de Caruaru-PE, elaborado a partir da inserção dos pontos georreferenciados das mudas plantadas no CEMEI, permitiu visualizar a distribuição espacial das árvores no perímetro escolar e sua relação com o território urbano, possibilitando identificar a localização individual das espécies e compreender a inserção do espaço escolar na dinâmica da cidade. Como recurso pedagógico, essa representação cartográfica ampliou o entendimento dos estudantes sobre noções de localização, território e pertencimento, além de se configurar como ferramenta prática para monitoramento e planejamento de ações ambientais, integrando tecnologia e educação ambiental e fortalecendo a conexão entre escola e contexto socioambiental local (Silva e Faria, 2025).

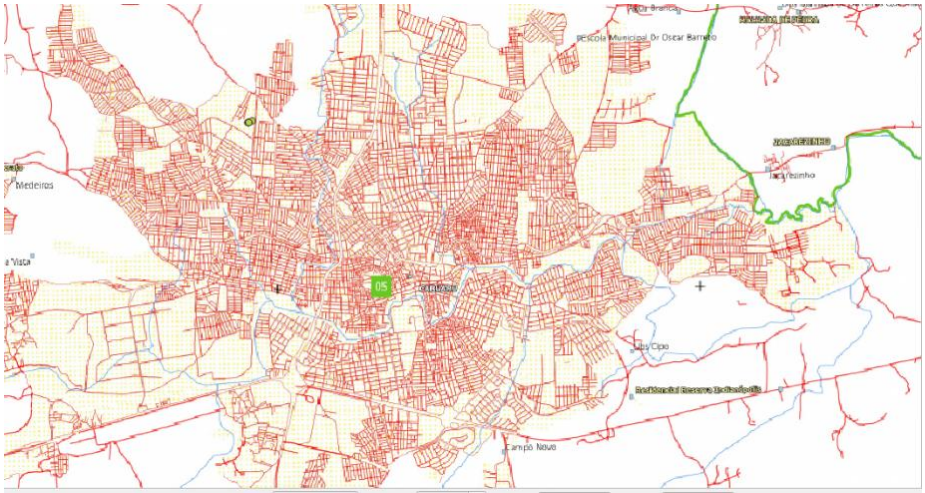


Figura 03: Mapa do município de Caruaru com os pontos georreferenciado.
Fonte: Autores (2026)

Resultados e Discussão

A aplicação da Metodologia G5 Ambiental no CEMEI de Caruaru-PE possibilitou a integração entre práticas pedagógicas e ações de sustentabilidade, promovendo uma vivência significativa para crianças da educação infantil. O plantio de mudas nativas e seu georreferenciamento configuraram-se como estratégias eficazes de aprendizagem experiencial, evidenciando que a interação direta com o ambiente favorece a internalização de valores socioambientais desde a primeira infância. Esse resultado reafirma estudos que apontam o contato com a natureza como elemento central na formação de atitudes pró-ambientais (Diniz; Ariosi, 2025).

A gestora da escola definiu a participação de três turmas na atividade. Ao todo, estiveram presentes 14 crianças do Infantil 5A, 9 do Infantil 5B e 12 do Infantil 5C, todas com idades entre 4 e 5 anos. Como resultado quantitativo, obteve-se um universo de 35 crianças e 10 adultos, sendo estes compostos por três integrantes do grupo GAMA, um representante da Secretaria da Primeira Infância da Prefeitura Municipal de Caruaru, a gestora do CEMEI e cinco professoras/auxiliares de educação da instituição.

O engajamento dos estudantes, observado por meio do entusiasmo, da participação ativa e do senso de responsabilidade coletiva, evidencia que metodologias ativas baseadas na experiência concreta potencializam o processo de aprendizagem. Esse achado reforça a perspectiva freiriana de que o conhecimento se constrói na relação entre sujeito e realidade, sendo mediado pela prática e pelo diálogo (Freire, 2019). Além disso, a superação inicial de receios, como o contato com o solo e insetos, demonstra um processo de ressignificação simbólica, no qual o medo é substituído pela curiosidade e pelo entendimento ecológico, indicando avanço na percepção ambiental das crianças.

A comparação com experiências similares demonstra convergência nos resultados. O estudo de Brito e Zuliani (2020) **corrobora** os achados ao evidenciar que práticas agroecológicas na educação infantil contribuem para a assimilação de conceitos de sustentabilidade e para a compreensão do papel social na preservação ambiental. De forma semelhante, Fratta, Mondanez e Michellon (2024) destacam que a implementação de hortas escolares promove não apenas o desenvolvimento ambiental, mas também benefícios sociais e alimentares. No entanto, o presente estudo **diverge** parcialmente ao incorporar o georreferenciamento como componente inovador, ampliando a dimensão tecnológica das práticas de educação ambiental.

A atividade prática criou um espaço pedagógico, inicialmente, as crianças demonstraram curiosidade pela oportunidade de participar de uma atividade pratica fora do ambiente cotidiano de sala de aula. Foi observado que, o receio das crianças, inicialmente a atividade pratica, em sujar as mãos e roupas foi superado após os adultos assegurarem nenhum impedimento para realização da prática.Uma interessante observação foi feita durante a intervenção pedagógica que ocorreu quando as crianças notaram a presença de insetos no substrato orgânico, a reação de medo e nojo foi expressa por algumas das crianças antes de se afastarem dos substratos ao evitar contato com os insetos. De forma simplificada, com linguagem infantil, os monitores explicaram a inofensibilidade, funções e importância dos insetos para o ecossistema do solo. Essas informações permitiram a ressignificação das percepções das crianças sobre os insetos, posteriormente, as crianças retomaram o contato com o substrato sem expressarem medo ou nojo, curiosas a procura dos insetos.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir apresenta as coordenadas geográficas referentes às mudas plantadas no espaço escolar. O registro dessas informações por meio do georreferenciamento permitiu mapear com precisão a localização de cada árvore, possibilitando o acompanhamento de seu crescimento e a criação de um banco de dados ambiental do CEMEI. Essa sistematização contribui para o monitoramento contínuo, facilita ações futuras de manutenção e reforça o caráter pedagógico da atividade, ao integrar tecnologia e educação ambiental em uma prática concreta de cuidado com o território.

Muda	Longitude (W)	Latitude (S)
Umbu	35º 59.676'	8º 15.739'
Ipê rosa1	35º 59.678'	8º 15.739'
Ipê rosa2	35º 59.673'	8º 15.742'
Ipê roxo	35º 59.642'	8º 15.726'
Pata de vaca 1	35º 59.675'	8º 15.741'
Pata de vaca 2	35º 59.675'	8º 15.739'

Tabela 01: Coordenadas dos pontos de plantio das mudas georrefenciados.
Fonte: Autores (2020)

No que se refere ao uso do georreferenciamento, a inserção de ferramentas tecnológicas no contexto da educação infantil mostrou-se um diferencial relevante. A utilização do GPS Essentials e do QGIS não apenas possibilitou o registro e monitoramento das mudas, mas também introduziu noções iniciais de espacialidade e território. Esse resultado corrobora a literatura que defende a integração entre tecnologias digitais e educação ambiental como estratégia para promover aprendizagem contextualizada e interdisciplinar (SILVA et al., 2025). Ao mesmo tempo, o estudo evidencia que tecnologias acessíveis podem ser incorporadas mesmo em contextos de recursos limitados, ampliando o alcance de práticas inovadoras.

A utilização do mapa georreferenciado como recurso pedagógico ampliou a compreensão das crianças sobre localização, território e pertencimento. Esse resultado **reforça** a importância da integração entre educação ambiental e geotecnologias, permitindo não apenas o monitoramento das espécies plantadas, mas também a construção de uma leitura espacial do ambiente escolar inserido no contexto urbano. Nesse sentido, o estudo **evidencia que** práticas que articulam tecnologia, território e educação favorecem uma aprendizagem mais significativa e contextualizada.

Os resultados obtidos corroboram a literatura que destaca a relevância da Educação Ambiental (EA) como eixo estruturante na formação cidadã desde a infância. A inserção do georreferenciamento como recurso pedagógico amplia esse caráter, pois promove a integração entre ciência, tecnologia e sociedade. Assim, a experiencia vivenciada pelos estudantes alinha-se às tendencias contemporâneas que defendeu a utilização de tecnologias digitais para potencializar a construção de saberes ambientais.

A participação das crianças no processo de plantio e registro georreferenciado contribuiu para o desenvolvimento de competências socioambientais e para o fortalecimento da consciência ecológica. Apesar dos resultados positivos, algumas limitações devem ser consideradas. O número reduzido de mudas plantadas e o curto período de acompanhamento restringem a avaliação de impactos de longo prazo, tanto no desenvolvimento das espécies quanto na consolidação da consciência ambiental

dos estudantes. Além disso, a ausência de instrumentos quantitativos complementares limita a mensuração objetiva dos resultados. Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros incorporem análises longitudinais e ampliem o escopo metodológico, incluindo indicadores quantitativos de aprendizagem e monitoramento ambiental.

Por fim, a experiência analisada evidencia que a Metodologia G5 Ambiental apresenta elevado potencial de replicabilidade, especialmente por sua simplicidade operacional e baixo custo. A simplicidade do uso de aplicativos móveis, somada ao baixo custo operacional, torna o modelo aplicável em diferentes realidades, inclusive em escolas públicas com recurso limitados. Além disso, a metodologia pode ser ampliada para projetos interdisciplinares, envolvendo conteúdos de geografia, ciências, matemática e tecnologia, consolidando a visão de que a educação ambiental deve desdobrar por todas as áreas do conhecimento.

A prática realizada contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Em relação ao ODS 4 (Educação de Qualidade), promoveu-se uma aprendizagem ativa, crítica e contextualizada, que valoriza o protagonismo estudantil. No âmbito do ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), a ação se relaciona à criação de espaços urbanos mais verdes, saudáveis e integrados à comunidade escolar. Já no ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), o plantio de árvores representa uma medida de mitigação, ainda que em pequena escala, que contribui para o sequestro de carbono e para a sensibilização sobre a crise climática.

Para estudos futuros, recomenda-se diversificar as espécies vegetais utilizadas e realizar avaliações periódicas do desenvolvimento das árvores e das percepções dos estudantes. Outra perspectiva é a integração com plataformas de monitoramento participativo, possibilitando que a própria comunidade acompanhe e colabore na manutenção dos plantios.O caráter interdisciplinar e de baixo custo do plantio de mudas, aliado ao uso do georreferenciamento por tecnologia gratuita, possibilita replicação em larga escala, favorecendo a construção de bancos de dados ambientais escolares e municipais. Essa prática amplia o engajamento de professores, estudantes e comunidades, fortalecendo redes de colaboração voltadas à sustentabilidade.

No campo das políticas públicas, a experiência contribui para a consolidação da EA como componente estruturante da educação básica, em consonância com a Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999). Além disso, articula-se com agendas locais e internacionais ao apoiar o cumprimento dos ODS 4, 11 e 13, fornecendo evidências de que práticas educativas inovadoras, integradas à tecnologia, podem gerar impactos concretos no enfrentamento da crise climática. Nesse sentido, iniciativas semelhantes podem ser incorporadas a programas municipais e estaduais, servindo de modelo para a formulação de políticas públicas que unam formação cidadã, preservação ambiental e inovação pedagógica.

Considerações Finais

A aplicação da Metodologia G5 Ambiental no CEMEI em Caruaru-PE evidenciou seu potencial como modelo pedagógico replicável, flexível e adaptável a diferentes contextos educacionais. Sua abordagem cíclica favorece a rápida assimilação do conhecimento, especialmente quando associada ao uso de tecnologias acessíveis, como o QGIS, que se mostrou uma ferramenta eficiente e de baixo custo para atividades de georreferenciamento. A experiência, centrada no eixo de Gestão de Fauna e Flora (G4), demonstrou que a integração entre práticas pedagógicas, inovação tecnológica e participação comunitária promove aprendizagem significativa, despertando nas crianças uma compreensão concreta sobre o cuidado ambiental.

Os resultados indicam que a metodologia contribui para a formação cidadã desde a infância, fortalecendo valores socioambientais e alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 4, ODS 11 e ODS 13. Além de seu impacto local, a proposta apresenta elevado potencial de escalabilidade, podendo subsidiar políticas públicas e práticas educativas inovadoras. Conclui-se que a Educação Ambiental, quando articulada a metodologias ativas e tecnologias simples, constitui um instrumento estratégico para a construção de sociedades mais sustentáveis, formando indivíduos críticos e comprometidos com os desafios ambientais contemporâneos.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Secretaria Executiva da Primeira Infância da Prefeitura de Caruaru, pelo apoio institucional e incentivo à realização deste trabalho. Agradecemos igualmente, aos gestores de projetos dessa Secretaria, pela colaboração, disponibilidade e suporte durante o desenvolvimento das atividades. Estendemos, ainda, os agradecimentos a toda a equipe do CMEI Professor Carlos Antônio Amaral de Almeida, pelo acolhimento, parceria e contribuição fundamental para a execução desta pesquisa.

Os autores também expressam seus agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), ao PROGRAMA: PROEXT-PG / CAPES PROCESSO CAPES: 88881.926979/2023-01, como também à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio acadêmico, institucional, científico e financeiro que viabilizaram a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

ADAMS, B. G. Crise ambiental, educação ambiental e sustentabilidade. **Educação Ambiental em Ação. Revista eletrônica**, n. 30, 2009.

ALVES, M. S.; VIANA, Á. L. Proposta de geolocalização dos pontos de entrega voluntária de resíduos recicláveis na cidade de Manaus. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 16, n. 48, p. 374-393, 2023.

ARAGÃO, J. V. S.; AGUIAR, A. M. A.; ARAÚJO AGUIAR, G. J.; ARRUDA NETO, J. F.; ALVES DA SILVA, M. H.; SILVA, G. L. Aplicação de ferramentas de Educação Ambiental para formação de agentes ambientais em Caruaru (PE). **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 18, n. 2, p. 75-86, 2023.

ARRUDA, M. A. A.; GRANDIZOLLI, C. C. T.; GOMES DE ARRUDA, R. G. Educação Ambiental e Cidadania: Reflexões a partir do Descarte de Resíduos Sólidos no Rio Diamantino em Diamantino (MT). **REVBEA**, São Paulo, V. 18, No1:441-457, 2023.

BORBA, B.; SILVA, G. METODOLOGIA G5 AMBIENTAL, **Biblioteca Nacional**, Rio de Janeiro, n. 749500, l. 1452, f. 349, 2017.

BRASIL. LEI Nº 9.795, DE 27 DE ABRIL DE 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 abr. 1999.

BRITO, A. P. M.; ZULIANI, D. Q. Agroecologia na educação infantil: cultivando saberes no CIADI. **Cadernos de Agroecologia**, v. 15, n. 2, 2020.

DINIZ, A. B. S.; ARIOSI, C. M. F. Explorar, Sentir, Crescer: A Importância do Contato com a Natureza para a Primeiríssima Infância. Editora Realize, ENLIC Centro Oeste - Encontro das Licenciaturas da Região Centro-Oeste e II Seminário Integrador do PIBID da UFMT, 2025.

FERREIRA DA SILVA, R.; BORBA, B. F. C.; SILVA, G. L. Metodologia G5 Ambiental aplicada em escolas municipais. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 17, n. 1, p. 54-64, 2022.

FRATTA, N. L.; MONDANEZ, B. M. C.; MICHELLON, E. Elaboração de horta escolar agroecológica em um centro de educação infantil (CMEI). **Cadernos de Agroecologia**, v. 19, n. 1, 2024.

FREIRE, P. Direitos Humanos e Educação Libertadora: gestão democrática da educação pública na cidade de São Paulo. São Paulo: Paz e Terra, 2019.

JOSLIN, E. B.; ROMA, A. C. A importância da educação ambiental na formação do pedagogo: construção de consciência ambiental e cidadania. **Revista Ciência Contemporânea**, v. 2, n. 1, p. 95-110, 2017.

LIMA, C. M.; ARAÚJO, G. C. C. Educação e Sustentabilidade: Promovendo Práticas Sustentáveis através da Educação Ambiental. **Educação Ambiental na Administração Pública e Privada: reflexões, práticas e experiências**. Brasília, Distrito Federal, 2024.

LIMA, T. J. B. Indícios para a formação de sujeito ecológico nos movimentos preparatórios dos seminários de Metodologia G5 Ambiental. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 19, n. 3, p. 384-401, 2024.

LOPES, T. S.; ABÍLIO, F. J. P. Educação Ambiental Crítica:(re) pensar a formação inicial de professores/as. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 16, n. 3, p. 38-58, 2021.

MARTINS, V. O.; ARAUJO, A. R. Crise Educacional e Ambiental em Paulo Freire e Enrique Leff: por uma pedagogia ambiental crítica. **Educação & Realidade**, v. 46, n. 2, p. e105854, 2021.

MONTESSORI, M. Mente Absorvente. (Tradução: CARVALHO, Wilma Freitas Ronald). **Rio de Janeiro: Editora Nórdica**, 1987.

MONTESSORI, M. Educação para um novo mundo. (Tradução: BRAGA, Sonia Maria Alvarenga. **São Paulo: Comenius**, 2015.

MOURA, L. C.; FRADE, L. F.; MARQUES, D. F.; SILVA, R. M. S.; CAVALCANTI, R. C.; ARAÚJO, L. C.; MICHELLE DA SILVA, C.; SILVA, A. V. Aplicação do georreferenciamento na gestão ambiental do semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. **Observatório de la Economía Latino Americana**, v. 22, n. 10, p. e7238-e7238, 2024.

NETO, J. R. M.; MENEGAT, J.; ALMEIDA GONÇALVES, E.; SILVA, C. B.; TEIXEIRA, C. J. S.; ALMEIDA, M. F.; SILVA FIHO, J. C.; FRANCO, J. C. Educação ambiental no Brasil e a agenda 2030: convergências, desafios e perspectivas para o desenvolvimento sustentável. **REVISTA DELOS**, v. 17, n. 61, p. e2609-e2609, 2024.

OLIVEIRA, M. Política nacional de educação ambiental: avanços e desafios. Curitiba: EdUFPR, 2017.

PORTO, C. G. D.; SILVA, G. L. Projeto de extensão para a promoção da educação ambiental: um estudo de caso da aplicação da metodologia G5 ambiental. **Revista EDaPECI**, v. 25, n. 2, p. 104-117, 2025.

RODRIGUES, D. G.; SAHEB, D. A educação ambiental na educação infantil segundo os saberes de Morin. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, v. 99, p. 573-588, 2018.

RODRIGUES, E. A. S. Educação Ambiental a partir da Agenda 2030: Experiências No ensino de geografia na Educação Básica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 10, p. 01-13, 2024.

SILVA, A. S.; ROSA, D. de J. Q.; PAULA, L. D. R. Georreferenciamento aplicado à compensação ambiental: uma abordagem na engenharia de agrimensura e cartográfica. **PARAMÉTRICA**, *[S. l.]*, v. 15, n. 2, 2023.

SILVA, E. T. N.; REIS, G. R.; PETRI, Y. R., DUARTE, H. L.; PIFFER, D. M. Relato de experiência do projeto "ACHADOS E PERDIDOS: ferramentas populares de localização urbana com uso da tecnologia GPS como instrumento de extensão acadêmica para promoção da educação e inclusão tecnológica". **Revista Gestão e Conhecimento**, v. 19, n. 1, p. e441-e441, 2025.

SILVA, M. A. S.; FARIA, A. L. L. Atlas geográfico como instrumento pedagógico para o ensino de Geografia. **Revista Ponto de Vista**, v. 14, n. 1, p. 01-23, 2025.

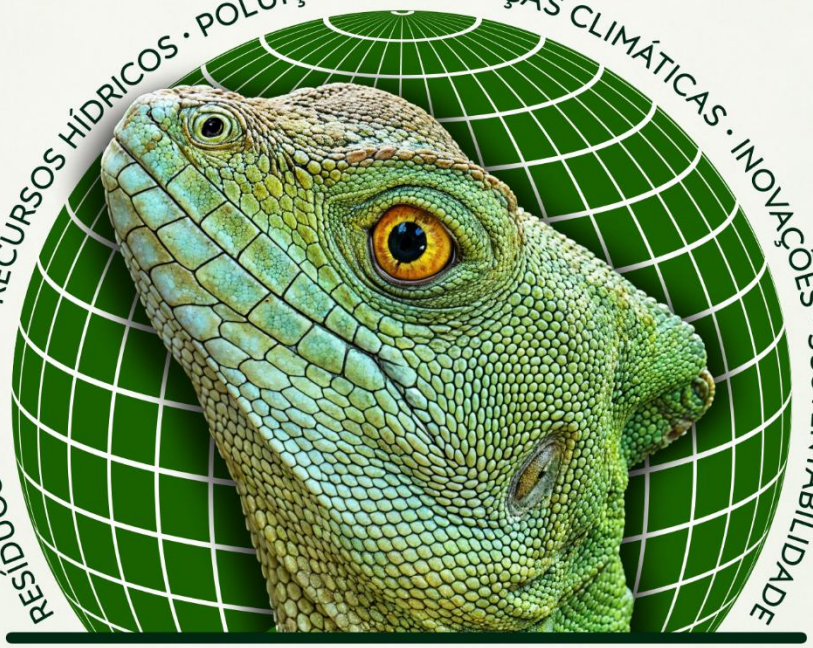
SOUZA, J. P. F.; MEDEIROS, T. S.; FERREIRA, C. D.; DANTAS, J. S.; SOUTO, P. C. Arborização de escolas públicas como estratégia de educação ambiental e qualidade de vida. **Caderno Impacto em Extensão**, v. 3, n. 1, 2023.

UN. NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Educação de Qualidade. 2025. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/4. Acesso em: 05 de set. 2025.

XERFAN, C. W. P. Princípios Administrativos e sua Aplicação na Educação: Uma Análise Crítica da Gestão Escolar. **Absolute Review**, v. 19, n. 1, 2023.

ÁREA TEMÁTICA 8

ENERGIAS RENOVÁVEIS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

SOCIAL ACCEPTANCE OF WIND ENERGY IN BRAZIL: ONSHORE AND OFFSHORE PERSPECTIVES

1 Carla de Abreu D'Aquino, 2 Nicolie Massochini Zwartjes, 3 Drielli Peyerl, 4 Luciano Hocevar, 5 Evandro Mateus Moretto

1 Federal University of Santa Catarina, e-mail: carla.daquino@ufsc.br; 2 Federal University of Santa Catarina, e-mail: nicolienick2710@gmail.com; 3 University of Amsterdam, e-mail: driellipeyerl@gmail.com; 4 Federal University of Recôncavo da Bahia, e-mail: lucianohocevar@ufrb.edu.br; University of São Paulo, e-mail: evandromm@usp.br

Keywords: Wind power; Public Perception; Brazil.

Abstract

This study investigates the social acceptance and assesses environmental impacts of wind energy in Brazil. The methodology combines a review with data from surveys conducted in three coastal municipalities. Two near a continental wind farm in Rio Grande do Sul (RS) and one without nearby wind infrastructure in Santa Catarina (SC). The research reveals a positive perception of onshore wind energy, with no evidence of the NIMBY phenomenon. Offshore wind energy was also positive across both states. The proximity to onshore wind farms in RS is associated with awareness, accompanied by skepticism about electricity tariff reductions and environmental uncertainties. Overall, the findings reveal a gap between governmental decision-making and public understanding of offshore wind energy in Brazil. The study provides novel contributions to the southern region of the country and seeks to guide the future implementation of offshore wind energy in Brazil with the active involvement of the community.

Introduction

Brazil has undergone significant expansion in the onshore wind energy sector over the past ten years. Studies present different dimensions of the sector's impacts on communities, mainly in the northern and northeastern regions of the country (D'Aquino et al., 2022a; Galvão et al., 2020; Xavier et al., 2020; Brannstrom et al., 2017; Dantas et al., 2019). The impacts observed include land use restrictions, changes in community lifestyles, noise pollution, and property devaluation, which are associated with negative local perceptions. Positive impacts include the creation of employment opportunities and the growth of the tourism sector.

Public perception of renewable energy sources, such as wind energy, is characterized by considerable flexibility, subject to significant variations attributable to various factors. These factors include a lack of information on the advantages of these technologies, local environmental conditions, national energy policies, and prior community experiences with similar initiatives (Aitken, 2010). Boudet (2019) identified four factors that shape public perceptions of new energy technologies: people, process, place, and technology.

Given the wind energy sector's expansion and international market pressures in the context of energy transition, Brazil began focusing on offshore wind energy from 2019 as an alternative to continue expanding its wind energy sector. In April 2020, the offshore wind energy roadmap was launched by the Brazilian government (EPE, 2020). In November 2020, the Brazilian Institute for the Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA) published the terms of reference for requesting environmental assessment for offshore wind projects. In January of 2025 Law No. 15,097, establishes the regulatory framework for offshore wind energy generation in Brazil, aiming to enhance legal certainty and attract both domestic and international investment to the sector (Brasil, 2025).

Even with international advancements and government efforts in Brazil, a regulatory impasse still delays offshore wind energy development. In parallel, there has not yet been a deep discussion with society on the topic. This study introduces an innovative approach based on three critical aspects: community social acceptance of offshore wind energy, the influence of living near onshore wind farms on attitudes toward offshore wind energy, and an analysis of community perceptions of different environmental impacts of offshore wind energy. The aim of this work is to investigate the social acceptance and assess environmental impacts of onshore and offshore wind energy in Brazil.

The methodology combines a review of existing literature with empirical data from surveys conducted in three coastal municipalities: two near a continental wind farm in northern Rio Grande do Sul (RS) and one without nearby wind infrastructure in southern Santa Catarina (SC). Given that the municipalities in RS currently coexist with an onshore wind farm, whereas those in SC do not, the findings of this study offer valuable insights for informing strategies to engage local communities in discussions about offshore wind energy. By highlighting the role of prior experience with renewable energy infrastructure, the study supports efforts to promote knowledge-sharing and foster inclusive dialogue, ultimately contributing to a just and participatory energy transition.

Methodology

A study on attitudes was conducted to identify criteria and perceptions regarding the social acceptance of onshore and offshore wind energy through a literature review. The research was conducted on the Google Scholar platform, which was chosen for its extensive database and access to peer-reviewed publications. The search was conducted in English, prioritizing recent

articles to ensure up-to-date discussions. Keywords such as "offshore wind energy impacts," "onshore wind energy impacts," "social attitudes towards renewable energy," and "impacts of offshore wind energy on electricity rates" were used. Article selection was based on abstracts, the focus was on understanding how the impacts of wind energy influenced public attitudes, which were classified as positive, negative, or mixed.

An exploratory research approach was adopted to investigate the social acceptance of wind energy, both onshore and offshore, in the municipalities of Araranguá (SC), Xangri-lá, and Capão da Canoa (RS) (Figure 1). The methodology involved the development of questionnaires with closed, open-ended, and mixed questions, following the methodology proposed by D'Aquino et al. (2024). The survey instrument was designed to capture a broad range of opinions on wind energy, following ethical guidelines established by Brazilian Resolution No. 510/2016 (Brasil, 2016).

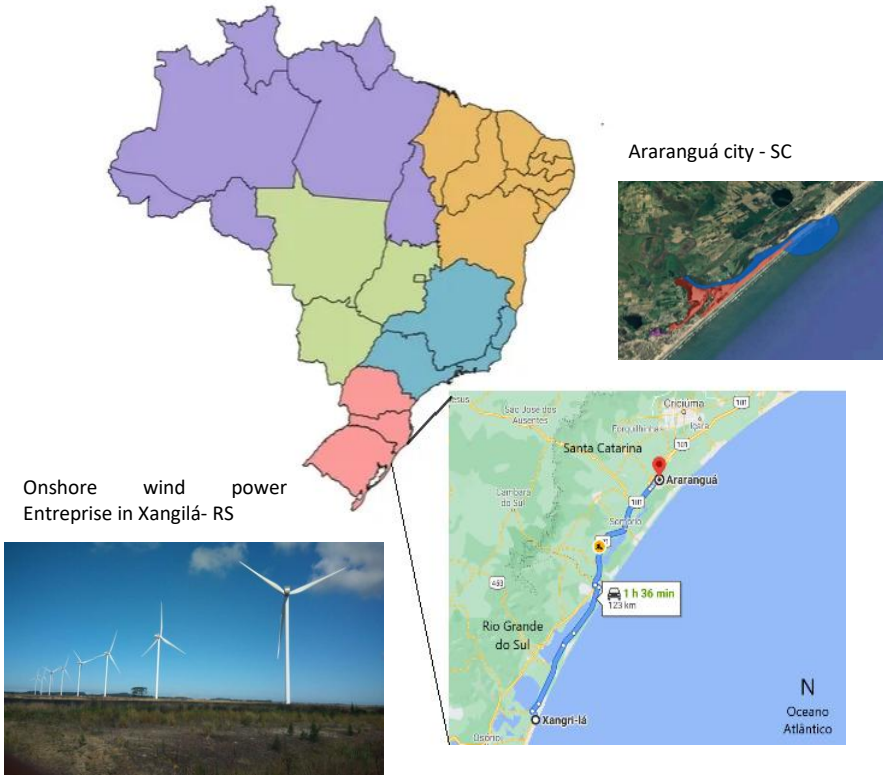


Figure 1. Study Area. (Source: by the authors).

The questionnaire was divided into five sections, beginning with an introduction explaining the research objectives and obtaining participants' consent for ethical compliance. The following sections included social characterization questions, and the last two sections directly addressed perceptions of onshore and offshore wind energy. The first section explained onshore wind technology and presented an image of the Xangri-lá wind farm. The following section introduced offshore wind energy with an illustration of wind turbines at sea.

The sample size was determined using the formula proposed by Triola (1999), based on demographic data from the 2010 Census (IBGE, 2011), considering the urban population. To ensure a representative 95% confidence level, minimum sample sizes were calculated for each municipality, totaling 239 respondents. Data collection occurred between 2022 and 2024, with seven rounds of face-to-face questionnaire applications, four in SC and three in RS. The final sample comprised 391 participants, 224 from SC and 167 from RS. Respondents were selected randomly, based on accessibility and availability, with the support of 23 volunteers.

Data analysis was conducted using a qualitative-quantitative approach, focusing on frequency domain analysis, comparing perceptions and attitudes between the two main groups: municipalities with onshore wind farms (RS) and those without (SC). The analysis focused on responses related to onshore and offshore wind energy.

Considering the onshore wind section, responses ranging on the Likert scale, from 1 – very negative to 5 – very positive. The four questions were; 1) How would you classify the possibility of future wind energy installations near your residence? 2) How would you classify the possibility of future wind energy installations near your residence? 3) How do you believe a wind farm could impact the local economy? And 4) How do you believe a wind farm could impact the local environment?

For the offshore wind section, the responses options were negative, positive, unsure, no influence considering relation between the presence of an offshore wind farm to the following activities: Job creation; Electricity tariff; Climate change reduction; Marine life; Property value; Bird presence; Air quality; Tourism; Local fishing industry; Boat tours; Recreational fishing; Landscape aesthetics; Noise.

Results and Discussion

The profile of respondents differs between the states of SC and RS, reflecting differences in age groups, education levels, and income. In SC, 57.29% of respondents are from SC, while 42.71% are from RS. The predominant age group among respondents in SC is 16 to 30 years old (41%), whereas in RS, it is 31 to 55 years old (45%). This suggests a younger demographic in SC and a more mature population in RS.

In terms of education, most respondents in SC have higher education (46%), whereas in RS, most have completed secondary or technical education (49%). Regarding income, most respondents in both states (47% in SC and 57% in RS) earn between one and three minimum wages (minimum salary in Brazil equivalent to R$ 1.412,00). However, in SC, 29% earn more than three minimum wages, compared to 23% in RS.

Despite the significant global interest in promoting wind energy, this interest does not always translate into local support for specific projects. Overall attitudes toward wind energy tend to be positive; however, this does not guarantee community acceptance of turbine installations in their vicinity. Support for these projects is often linked to perceived economic benefits, such as job creation and stimulation of the local economy (Aasen; Vatn, 2018).

Local resistance to wind energy projects is often explained by the phenomenon known as the NIMBY syndrome (Not In My Back Yard). In this context, individuals acknowledge the environmental benefits of projects on a global or national scale but oppose their local impacts. Additionally, economic and social factors are crucial in shaping perceptions and attitudes toward wind projects.

Comparative analysis: impacts of onshore wind energy data collected and, in the literature

According to D'Aquino et al. (2022a), the positive impacts include job creation, economic development, and energy independence in Brazil. On the other hand, the negative impacts include landscape changes, noise, property devaluation, and socio-environmental conflicts, especially in coastal areas and traditional communities. These conflicts often arise from the lack of land regulation, which allows companies to acquire land at low prices, excluding communities from financial benefits. As a result, these populations may face dissatisfaction, loss of environmental services, and long-term socioeconomic difficulties.

Impact on the Local Community

Responses to the question about the impact of an onshore wind farm on the local community revealed a predominantly positive perception in both analyzed states. In both SC and RS, 78.1% of respondents perceived the impact as positive. Only a few respondents in both states believed the impact would be negative (4.4% in SC and 3% in RS), indicating a positive community acceptance.

In SC, the positive perception remains consistent across all educational levels, ranging from 74.5% among those with higher education to 81.9% among those with technical or secondary education. Similarly, in RS, the positive perception also prevails, especially among respondents with higher education (87.8%). Brannstrom et al. (2022) observed that in the state of Ceará, in Northeastern Brazil, perceived or actual economic benefits generated support for wind farms, particularly when these benefits strengthened local livelihoods and land tenure security in host communities, where livelihoods depended on fishing and agriculture, and employment opportunities were scarce.

Impact on the Community Economy

The analysis of responses regarding the economic impact of a wind farm on the community revealed a predominantly positive perception in both States. In SC, 81.7% of respondents believed that the installation of a wind farm would have a positive economic impact on the local economy. In RS, the positive perception was 73.6%, with 25.7% believed the wind farm would make no economic difference. These data demonstrate strong acceptance of wind farms as positive drivers of the local economy.

In SC, the positive perception remained consistent across all educational levels, ranging from 79.5% among those with basic education to 83.1% among those with secondary/technical education. In RS, the positive perception was dominant too, however, a higher proportion of respondents believed that wind farms did not influence the local economy, especially among those with lower education levels. Which may indicate a more skeptical view of the economic impacts of such projects.

According to literature, the economic impacts of onshore wind farms include both positive and negative effects. Creating direct and indirect jobs is universally seen as an economic benefit (Simas; Pacca, 2014). Property valuation can be both, positive and negative (Guo et al., 2024). While coexistence with agricultural activities is widely regarded as positive (Gharaibeh et al., 2021), there are some divergent opinions regarding aesthetics (Guan et al., 2023) and effects on the real estate market (D'Aquino et al., 2022a). Nonetheless, wind energy provides a significant economic boost, particularly in rural areas.

Impact on the Environment

The analysis of the population's perception regarding the environmental impacts of wind energy revealed that most respondents believed wind energy developments do not harm the environment. With 75.4% of participants in SC and 81.9% in RS sharing this view. On the other hand, 8.5% in SC and 4.2% in RS, considered wind energy harmful, possibly due to concerns about bird mortality and habitat changes.

Considering perception by educational level, in SC (Figure 2A), wind energy is not harmful to the environment, with the highest rate observed among respondents with basic education (87.2%). In RS (Figure 2B), 78.8% of participants with basic education and 85.2% with secondary/technical education believed that wind energy has no negative effects.

This positive view of environmental impacts by community that lives near a wind enterprise does not math with the literature. Some negative environmental impacts are associated with implementing onshore wind energy as: concerns regarding bird and bat mortality, as well as habitat fragmentation (Sander et al.,2024), dusty (Hamed; Alshare, 2022) and noise (Wu et al., 2020). The possible explanation is due to different aspects: the wind farm at the study place has 10 towers and the land was already used for agriculture, and the activity continues alongside the operation of the wind farm.

Evaluating the NIMBY Phenomenon

Analyzing the question "How would you classify the possibility of future wind energy installations near your residence?", 61.2% of respondents in SC, and 68.3% in RS expressed a favorable opinion. Those who believed installing wind farms "makes no difference" accounted for 27.2% in SC and 22.2% in RS. Negative attitudes had the lowest percentages in both states, with 11.6% in SC and 9.6% in RS.

Considering education level, responses were quite similar across both states. This positive community acceptance of wind farm installations near residences indicates no presence of the NIMBY phenomenon. Additionally, considering that municipalities in RS are located near an onshore wind farm, the positive acceptance is even more pronounced. That represents an important difference between what is observed in NE of Brazil, where according D'Aquino et al. (2022b) installing wind farms in areas close to communities can cause residents discomfort due to noise and the visual impact of the turbines. Additionally, in some cases, socio-environmental effects are exacerbated by land disputes and restrictions on land use, especially in traditional communities. Which can lead to local resistance.

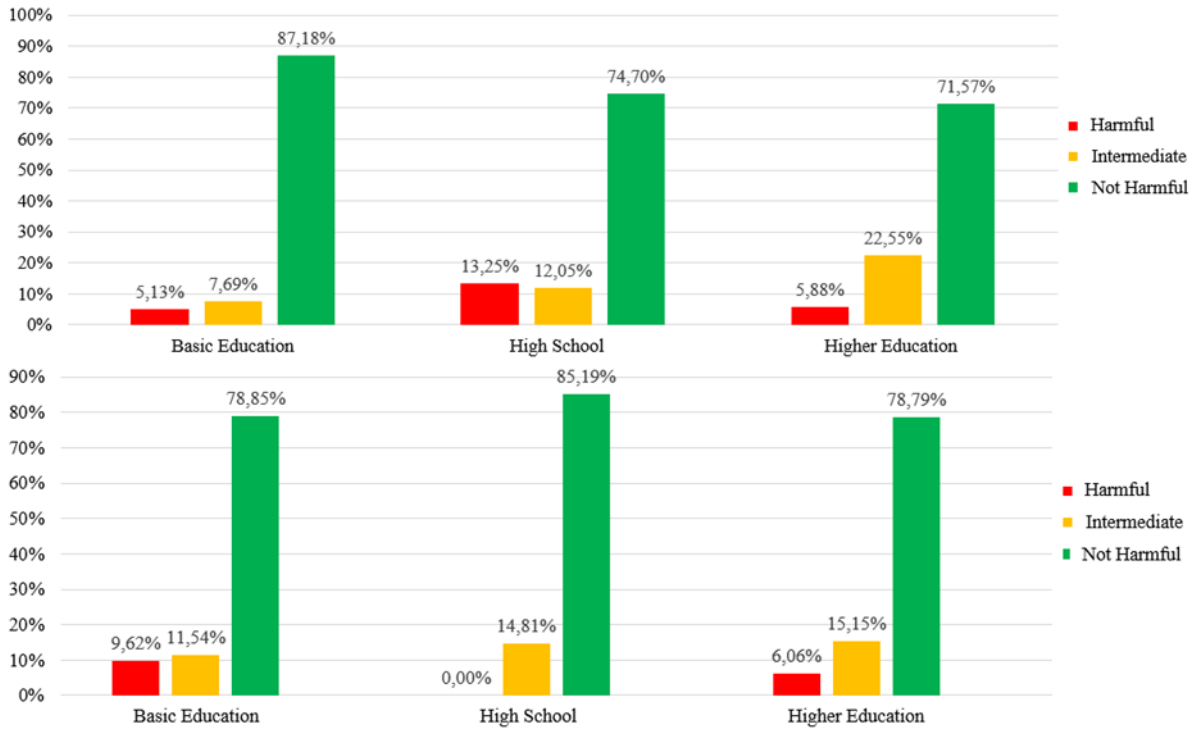


Figure 2: Percentage of responses to the question: "In your opinion, how harmful can wind energy development be to the environment?" by educational level. (A) State of Santa Catarina. (B) State of Rio Grande do Sul. (Source: by the authors).

Comparative analysis: environmental impacts of offshore wind energy, collected data, and literature

The municipality of SC, in 9 out of the 13 evaluated impacts, more than 20% of the community reported not knowing about the subject. This indicates an inefficiency in information dissemination about offshore wind energy, regardless of income level.

It is also observed that the relationship between offshore wind energy and climate change mitigation differs between the two states. In RS, most respondents stated that there is no influence (above 41%), whereas in SC, most perceived it as a positive impact (percentages exceeding 48%), regardless of income. The lack of knowledge about how wind farms contribute to climate change mitigation highlights an educational gap in RS. Improving public understanding of these impacts could reduce uncertainties and increase support for expanding of offshore wind energy projects in both regions.

The impacts related to job creation, tourism, and landscape aesthetics were the ones in which the community demonstrated the greatest awareness, expressing a predominantly positive attitude regardless of educational level, both in SC and RS.

The impact on job creation presents positive perception across different income brackets, with 87.1% of respondents earning below one minimum wage in SC and 76.5% in RS. This trend of a favorable outlook also repeats across all educational levels, consistently exceeding 76%. Nonetheless, a comparatively higher degree of perceived uncertainty was identified among respondents from Rio Grande do Sul, particularly within the cohort possessing higher educational attainment. The impact of

offshore wind farms on job creation was present as positive and negative by Willis-Norton et al. (2024) once offshore wind projects boost coastal economies and offer local job opportunities, though many roles are often filled by non-local workers.

The analysis of perceptions regarding offshore wind farms in SC and RS reveals a positive attitude toward reducing electricity tariffs. However, respondents in RS, expressed uncertainty, possibly due to previous experiences with onshore wind energy, which did not lower tariffs as expected. According to Hosius et al. (2023) offshore wind farm installations may increase tariffs due to installation and maintenance costs, which contrasts with popular perception. The present study results highlight the need to inform the population about the impacts and costs of this technology.

The association between offshore wind farms and marine life generated varied opinions in both states. For 27.7% of respondents in SC and 35.3% in RS, wind farms do not affect marine life. However, more than 30% in both states pointed to a negative impact and considerable uncertainty (28.6% in SC and 19.2% in RS). Regardless of income or education level, the majority view these effects negatively. Bergstrom et al. (2014) and Maxwell et al. (2022) revels that wind farms can generate electric fields, increase underwater noise, and alter habitats, negatively affecting biodiversity and marine ecological dynamics.

The perceived impact of offshore wind farms on property values was predominantly positive, with 38.8% of respondents in SC and 41.3% in RS. However, 24.5% in SC and 34.1% in RS indicated that wind farms do not influence property values. In SC, responses showed greater variation, possibly due to a lack of information. In contrast, previous experience with onshore wind farms in RS may have influenced property value changes, helping respondents form opinions on the matter. Despite the positive perception, Jensen et al., (2018) and Alem et al. (2020) indicates that proximity to turbines may negatively impact real estate value due to visual impacts and alterations to the coastal landscape.

The analysis of the impact of offshore wind farms on bird presence reveals that 32.6% of respondents in SC and 28.7% in RS perceive the impact as negative. Most believe wind farms do not influence bird presence, particularly in RS (44.3%). Uncertainty is more pronounced in SC, at 25%, compared to 16.7% in RS. Recent studies of Van Bemmelen et al. (2024) and Stocker et al. (2023) indicates that offshore turbines pose significant risks to birds, including the potential for collisions and disruptions to migratory routes and feeding zones. The studied community exhibits uncertainty on this issue, as reflected in the belief that wind farms do not affect birds. The group with higher education levels was the most likely to recognize the negative impact.

The perception that wind farms do not influence air quality is more common in RS (52.1%) than in SC (38.4%). Uncertainty about the impact is higher in SC (20%) compared to RS (15.5%), while the perception of a negative impact is very low in both states (around 4%). Offshore wind energy, by replacing non-renewable sources, reduces CO_2 emissions, thereby improving global air quality (Browning; Lenox, 2020). This suggests a lack of awareness regarding the relationship between climate change and renewable energy sources.

The analysis of tourism impact reveals that 63.4% of respondents in SC perceive a positive impact, while in RS, this percentage is 59.3%. Most respondents consider offshore wind farms positively impacting tourism, particularly among higher-income and higher-education groups. According Oh et al. (2023) and Glasson; Durning; Welch, (2022) the literature presents both positive and negative perspectives once Offshore wind turbines can attract tourism through boat tours and educational visits, but their visual impact may reduce the appeal of destinations where natural seascapes are a key attraction.

The impact of offshore wind activity on the local fishing industry was perceived as negative by 33.2% of respondents in SC and 35.3% in RS. No influence perception was reported by 32.6% in SC and 38.9% in RS. Uncertainty about the impact was also significant, particularly in SC (24.5%) compared to RS (17.3%). According to Willis-Norton et al. (2024), the local fishing industry tends to view these projects more negatively. The distribution of responses and the level of uncertainty suggest a possible lack of knowledge about the actual impacts of wind farms or difficulty in understanding where and how these projects will affect fishing activities.

The impacts related to boat tours and recreational fishing yielded quite similar results, where almost 43% consider no influence in both states. In RS, there is a greater tendency to perceive offshore wind farms as having a negative impact. A more optimistic stance in SC is observed, with a higher incidence of positive responses, although significant uncertainty remains, particularly among lower-income and lower-education groups. The findings reflect the duality of attitudes: in RS, the negative perception prevails, that reflect concerns raised in the literature; in SC, are perception is more positive, which also aligns with another segment of the literature.

The impact on landscape aesthetics had the lowest percentage of "I don't know" responses in both states, ranging as positive for 60%. This indicates a strong connection between respondents and the landscape, as well as potential concerns about its alteration. The aesthetic impact of offshore wind turbines can be perceived positively and negatively. The presence of turbines significantly changes the maritime landscape: for some, they are a visual intrusion that reduces the attractiveness of coastal areas, while for others, they symbolize progress and sustainability, potentially even becoming points of tourist interest (Oh et al., 2023; Glasson; Durning; Welch, 2022).

Attitudes toward the noise impact of offshore wind farms were neutral. In SC, 45% the respondents pointed "do not influence", and 55 % in RS. Which suggests a limited understanding of the possible effects. The impact of noise can be viewed as both negative and positive. Offshore wind turbines generate underwater and atmospheric noise that can affect marine life and the quality of life in nearby coastal communities. However, for people living farther from the installations, the noise may be negligible or even nonexistent, reducing or neutralizing this negative perception (Maxwell et al., 2022).

In summary, the impacts that exhibited the highest levels of uncertainty in Santa Catarina were: Climate Change Mitigation, Marine Life, Property Value, Bird Presence, Air Quality, Local Fishing Industry, Boat Tours, Recreational Fishing, and Noise. In Rio Grande do Sul, only the impact of Climate Change Mitigation had an uncertainty percentage exceeding 20%,

regardless of income. This finding reinforces the perception that living near an onshore wind farm influences attitudes toward offshore wind farms and provides the community with firsthand knowledge of their effects.

The impacts related to job creation, tourism, and landscape aesthetics were those in which the community demonstrated the highest level of awareness, with a predominantly positive attitude, in both SC and RS. Regarding negative perceptions, marine life was the most frequently mentioned concern considering education level. In contrast, the fishing industry was the most negatively perceived impact.

Conclusions

The study compared the perception of wind energy in two Brazilian states: Rio Grande do Sul, which has onshore wind farms, and Santa Catarina, where this technology is not yet present. Most respondents expressed a positive attitude toward the economic benefits of onshore wind energy, such as job creation. However, this opinion contrasts with the literature, highlighting negative impacts such as noise and property devaluation. The NIMBY phenomenon was not observed, as many respondents supported the installation of wind farms near their homes, indicating a positive community acceptance.

Regarding offshore wind energy, the attitude was also favorable, with people believing it could create jobs and foster economic development in the region. However, skepticism emerged concerning electricity tariff reductions and uncertainties about environmental impacts. Prior experience with onshore wind farms seemed to generate distrust regarding the effectiveness of offshore projects in lowering energy costs.

In SC, a lack of knowledge about the impacts of offshore wind energy was evident, with more than 20% of respondents unable to answer questions about 9 of the 13 evaluated impacts, including climate change and marine life. In contrast, in RS, familiarity with onshore wind farms increased awareness, particularly regarding job creation and tourism. Nevertheless, climate change mitigation was the least understood impact in both states. In terms of negative attitudes, marine life was the most cited concern among respondents with higher education levels, while the fishing industry was the most mentioned issue based on income level.

Finally, the study concludes that although social acceptance of wind energy is generally positive, there is a lack of understanding of its negative impacts. In addition, the significant gap between government decision-making and public understanding of offshore wind energy in Brazil. The research highlights the need for more effective communication about the environmental and social effects of these projects in Brazil, emphasizing the importance of education and transparent dialogue to ensure a sustainable and inclusive energy transition.

References

AASEN, M.; VATN, A. Public attitudes toward climate policies: The effect of institutional contexts and political values. Ecological Economics, v. 146, p. 106-114, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.10.008

AITKEN, M. Why we still don't understand the social aspects of wind power: A critique of key assumptions within the literature. Energy Policy, v. 38, n. 4, p. 1834-1841, 2010. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.060

ALEM, M. et al. A Qualitative meta-analysis of the socioeconomic impacts of offshore wind farms. Sustinere: Journal of Environment and Sustainability, v. 4, n. 3, p. 155-171, 2020. https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v4i3.121

BERGSTRÖM, L. et al. Effects of offshore wind farms on marine wildlife—a generalized impact assessment. Environmental Research Letters, v. 9, n. 3, p. 034012, 2014. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034012

Boudet, H. S. Public perceptions of and responses to new energy technologies. Nature Energy, 4(6), 446 455, 2019. https://doi.org/10.1038/s41560-019-0399-x

BRANNSTROM, C. et al. Is Brazilian wind power development sustainable? Insights from a review of conflicts in Ceará state. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 67, p. 62-71, 2017. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.047

BRANNSTROM, C.; LEITE, N. S.; LAVOIE, A.; GORAYEB, A. What explains the community acceptance of wind energy? Exploring benefits, consultation, and livelihoods in coastal Brazil. Energy Research & Social Science, v. 83, p. 102344, 2022. https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102344

Brazil. (2025, January 10). Law No. 15,097 of January 10, 2025: Establishes the regulatory framework for offshore wind energy generation in Brazil. Diário Oficial da União. Available in: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2025/Lei/L15097.htm

BROWNING, M. S.; LENOX, C. S. Contribution of offshore wind to the power grid: US air quality implications. Applied Energy, v. 276, p. 115474, 2020. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115474

D'AQUINO, C. A. et al. Aceitação Social de Empreendimentos de Energia Eólica no Brasil. In: PEYERL, D.; KAREN, L. M.; SANTOS, E. M. dos (org.). Transição Energética, Percepção Social e Governança. São Paulo: ETRI/RCGI: Editora Synergia, 2022a.

D'AQUINO, C. A. et al. Design thinking methodology application to develop social acceptance questionnaire for renewable technologies. Social Sciences & Humanities Open, v. 10, p. 1-10, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.100912

D'AQUINO, C. A.; PEYERL, D. Social Perception of Renewable Energies in the Coastal Zone of South Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SCIENCE AND ENGINEERING (ICPSE), 11., 2022b, Anais [...]. IEEE, 2022. p. 129-134. https://doi.org/10.1109/ICPSE56329.2022.9935360

DANTAS, E. J. D. A.; ROSA, L. P.; SILVA, N. F. D.; PEREIRA, M. G. Wind power on the Brazilian Northeast Coast, from the whiff of hope to turbulent convergence: the case of the Galinhos Wind Farms. Sustainability, v. 11, n. 14, p. 3802, 2019. https://doi.org/10.3390/su11143802

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Roadmap Eólica Offshore Brasil. Versão R2. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf.

GALVÃO, M. L. D. M.; SANTOS, M. A. dos; SILVA, N. F. da; SILVA, V. P. da. Connections between wind energy, poverty and social sustainability in Brazil's semiarid. Sustainability, v. 12, n. 3, p. 864, 2020. https://doi.org/10.3390/su12030864

GHARAIBEH, A. A. et al. Establishing regional power sustainability and feasibility using wind farm land-use optimization. Land, v. 10, n. 5, p. 442, 2021. https://doi.org/10.3390/land10050442

GLASSON, J.; DURNING, B.; WELCH, K. The impacts of offshore wind farms (OWFs) on local tourism and recreation--evolving lessons from practice. Journal of Energy and Power Technology, v. 4, n. 4, p. 1-19, 2022. https://doi.org/10.21926/jept.2204037

GUAN, J. The impact of onshore wind farms on ecological corridors in Ningbo, China. Environmental Research Communications, v. 5, n. 1, p. 015006, 2023. https://doi.org/10.1088/2515-7620/acb126

GUO, W.; WENZ, L.; AUFFHAMMER, M. The visual effect of wind turbines on property values is small and diminishing in space and time. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 121, n. 13, p. e2309372121, 2024. https://doi.org/10.1073/pnas.2309372121

HAMED, T. A.; ALSHARE, A. Environmental impact of solar and wind energy-a review. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, v. 10, n. 2, p. 1-23, 2022. https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0387

HOSIUS, E. et al. The impact of offshore wind energy on Northern European wholesale electricity prices. Applied Energy, v. 341, p. 120910, 2023. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120910

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. Termo de referência para solicitação de estudos ambientais para complexos eólicos marítimos. Brasília, DF: IBAMA, 2020. Available in: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/publicacoes/2020-11-TR_CEM.pdf.

JENSEN, C. U. et al. The impact of on-shore and off-shore wind turbine farms on property prices. Energy Policy, v. 116, p. 50-59, 2018. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.046

MAXWELL, S. M. et al. Potential impacts of floating wind turbine technology for marine species and habitats. Journal of Environmental Management, v. 307, p. 114577, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114577

OH, C. O.; NAM, J.; KIM, H. The impacts of offshore wind farms on coastal Tourists' behaviors in South Korea. Coastal Management, v. 51, n. 1, p. 24-41, 2023. https://doi.org/10.1080/08920753.2023.2148848

SANDER, L.; JUNG, C.; SCHINDLER, D. Global review on environmental impacts of onshore wind energy in the field of tension between human societies and natural systems. Energies, v. 17, n. 13, p. 3098, 2024. https://doi.org/10.3390/en17133098

SIMAS, M.; PACCA, S. Assessing employment in renewable energy technologies: A case study for wind power in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 31, p. 83-90, 2014. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.046

STOCKER, M. Potential biological impacts of very low frequency acoustical energy produced by offshore wind turbine energy generation. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 153, n. 3, p. A185, 2023. https://doi.org/10.1121/10.0018602

TRIOLA, M. F. Introdução à estatística. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1999.

VAN BEMMELEN, R. S. et al. Avoidance of offshore wind farms by Sandwich Terns increases with turbine density. Ornithological Applications, v. 126, n. 1, p. duad055, 2024. https://doi.org/10.1093/ornithapp/duad055

WILLIS-NORTON, E. et al. A synthesis of socioeconomic and sociocultural indicators for assessing the impacts of offshore renewable energy on fishery participants and fishing communities. Marine Policy, v. 161, p. 106013, 2024. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106013

WU, X. et al. Optimizing the layout of onshore wind farms to minimize noise. Applied Energy, v. 267, p. 114896, 2020. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114896

XAVIER, T.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Energia eólica offshore e pesca artesanal: impactos e desafios na costa oeste do Ceará, Brasil. In: GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. (org.). Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 608-630.

REPOWERING OF ONSHORE WIND FARMS AS AN ALTERNATIVE TO DECOMMISSIONING: EVIDENCE FROM A PRISMA SYSTEMATIC REVIEW

1 Evandro Medeiros Braz, 2 Rui Manuel de Menezes e Carneiro de Barros
1 University of Porto – FEUP, e-mail: up202204076@up.pt; 2 University of Porto – FEUP, e-mail: rcb@fe.up.pt

Keywords: Onshore wind farms; Repowering; Decommissioning.

Abstract

The growing maturity of onshore wind farms imposes strategic decisions regarding end-of-life management, with repowering emerging as a key alternative to decommissioning. This study conducts a systematic literature review, following the PRISMA protocol, to compare the energy, economic, and operational impacts of repowering versus decommissioning, with a specific focus on Brazil and Portugal as representative emerging and mature markets. A structured search in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and IEEE Xplore yielded around 180 records, of which 27 peer-reviewed studies fully met the inclusion criteria and were analysed in depth. The evidence shows that repowering, whether implemented as full, partial, or technological repowering, or lifetime extension, is associated with generation increases in the range of 20% to 200% and revenue gains between 15% and 50%, while also supporting operational continuity and mitigating negative territorial and socio-economic impacts. By contrast, decommissioning entails the immediate interruption of renewable generation, loss of revenue, and high dismantling and waste-management costs, particularly in territories with limited scope for new projects. The comparative analysis indicates that, although conditional on regulatory and technical constraints, repowering generally outperforms decommissioning in most scenarios examined and should be regarded as a central instrument for long-term energy planning and policy design in power systems undergoing transition.

Introduction

Onshore wind power has become one of the main renewable energy sources in the energy transition of several countries, playing a strategic role in diversifying the electricity mix, enhancing energy security, and meeting decarbonisation targets. In both Brazil and Portugal, the expansion of onshore wind has accelerated since the early 2000s, driven by public support schemes, energy procurement mechanisms, and technological advances that enabled large-scale, cost-competitive wind generation (ABEEólica, 2022; GWEC, 2023).

Beyond its quantitative growth, the onshore wind sector in these countries is now entering a phase in which a large share of the installed fleet approaches or exceeds its original design lifetime. This trend brings end-of-life decisions to the forefront of energy-planning debates and highlights the need to reassess existing assets under evolving market, regulatory, and technological conditions. In this context, repowering and decommissioning emerge as competing strategies, with distinct implications for long-term generation capacity, investment needs, and local socio-economic impacts. Understanding how the international literature evaluates these options, and how such evidence can be applied to the Brazilian and Portuguese cases, is therefore essential to support the next cycle of decisions in onshore wind development.

In Portugal, the onshore wind sector is already highly mature. According to the most recent sectoral reports, the national wind fleet is widely distributed across the mainland and largely composed of turbines installed between the early 2000s and the 2010s. As a result, a significant share of these units is currently operating close to or beyond their original design lifetime, typically estimated at 20–25 years. Between 2013 and 2015, several wind farms underwent uprating processes, increasing the rated power of existing turbines—for example, from 2.0 MW to 2.3 MW—thus reflecting early strategies for lifetime extension and technological modernisation.

The National Energy and Climate Plan 2030 (PNEC 2030) sets ambitious targets for the Portuguese power sector, projecting onshore wind capacity of roughly 6.3 GW by 2025 and about 10.4 GW by 2030. Given the territorial, environmental, and social constraints on greenfield development, repowering plays a central role in the expansion strategy for renewable generation, as it enables an increase in installed capacity and energy production without occupying new land. The strong presence of manufacturers such as Vestas, Siemens Gamesa, and Enercon in the Portuguese fleet further reinforces the technical potential for modernising and replacing obsolete turbines with more efficient units.

In Brazil, although the large-scale deployment of onshore wind is more recent—accelerating from the 2010s onwards—there is an ongoing maturation of the earliest installed wind farms, particularly in the Northeast region. This suggests that decisions regarding wind-farm end-of-life, currently more evident in the Portuguese context, are likely to become increasingly relevant in Brazilian energy planning in the coming years, making the European experience a particularly valuable analytical reference.

Figure 1 presents the evolution of onshore wind capacity in Brazil and Portugal over the last two decades, based on recent ABEEólica and GWEC data. In 2024, Brazil reached approximately 31 GW of installed onshore wind capacity, whereas Portugal had around 6.3 GW. This highlights a Portuguese wind fleet that is smaller in absolute size but older and more stable, in contrast with a Brazilian fleet that is newer and rapidly expanding. This difference in maturity underscores the relevance of jointly analysing both countries from the perspective of end-of-life decisions, including repowering and decommissioning alternatives.

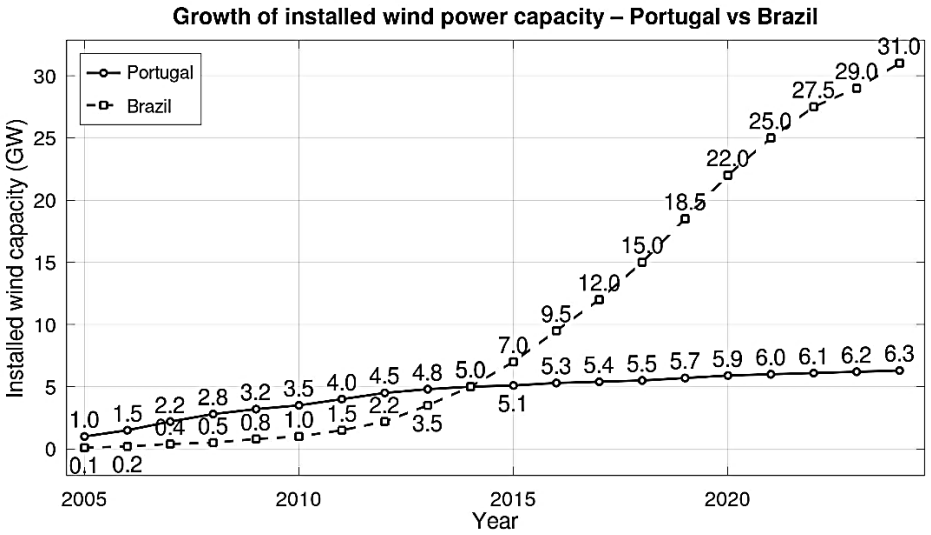


Figure 1: Evolution of installed onshore wind capacity – Brazil and Portugal.
Source: Prepared by the authors based on technical data (INERGI and ABEEólica).

The increasing maturity of onshore wind assets poses new challenges for energy planning, particularly concerning strategies for assets approaching the end of their operational life. Decommissioning, traditionally regarded as the standard solution, involves dismantling wind turbines, removing equipment, and deactivating associated infrastructure, resulting in the interruption of renewable generation, loss of revenue, and high costs related to demobilisation and waste management. In contrast, repowering consists of the full or partial modernisation of existing wind farms by replacing ageing turbines with technologically more advanced units, featuring higher rated power and improved energy performance, while reusing, whenever possible, the existing infrastructure. Evidence from the literature suggests that repowering can deliver substantial increases in energy production and economic gains associated with higher annual revenue, lower levelised generation costs, and improved operational efficiency. Figure 2 illustrates the evolution of turbines from the German manufacturer ENERCON, showing the increase in rated power and rotor diameter over time.

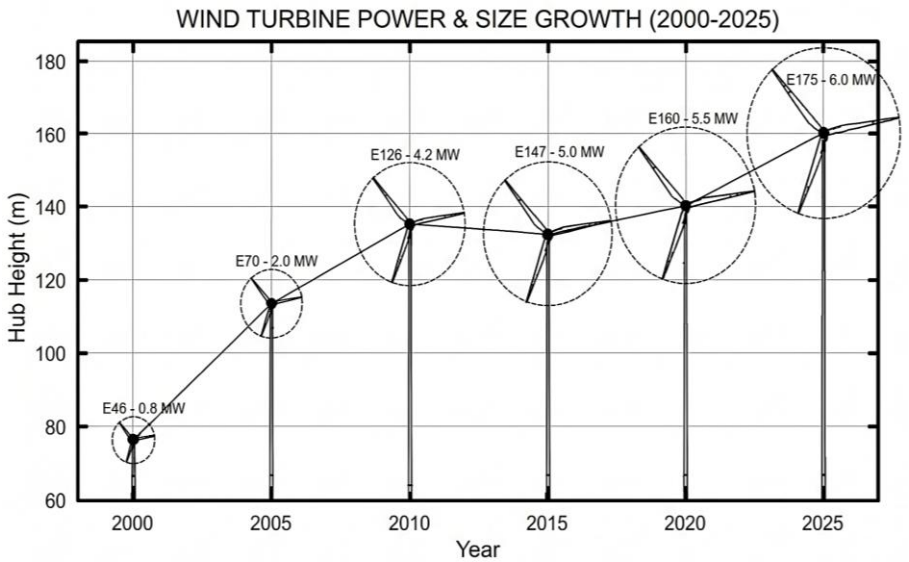


Figure 2: Evolution of wind turbines.
Source: Prepared by the authors based on technical data from the wind turbine manufacturer (ENERCON).

Despite the growing relevance of these issues, the scientific literature still presents fragmented approaches to wind-farm end-of-life, with a predominance of studies that focus on specific technical topics or isolated feasibility assessments. Comparative investigations of repowering and decommissioning from an integrated perspective—simultaneously considering energy, economic, and operational impacts—remain limited, especially when examining distinct national contexts such as Brazil and Portugal, which differ in wind-fleet maturity and regulatory frameworks.

In this context, the aim of this paper is to systematically review the scientific literature on the repowering of onshore wind farms, comparing its energy, economic, and operational benefits with those of decommissioning, focusing on the Brazilian and Portuguese contexts. To that end, a systematic review based on the PRISMA protocol is undertaken, seeking to synthesise

evidence related to increases in energy generation, revenue gains, operational continuity, and the main repowering typologies identified in the selected studies. Structural and foundation design issues are considered only as contextual elements and do not constitute the analytical focus of this work.

Materials and methods

This study is a systematic literature review conducted in accordance with the PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protocol. The review was structured around the following research question: What are the energy, economic, and operational benefits of repowering onshore wind farms, compared with decommissioning, in the contexts of Brazil and Portugal? This formulation defined the scope of the study and guided the selection of works addressing the end-of-life management of onshore wind farms from techno-economic, operational, and energy-planning perspectives.

Data collection relied on systematic searches in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and IEEE Xplore, with emphasis on peer-reviewed articles in the fields of energy, engineering, and energy planning. Technical and sectoral reports—such as those from the Brazilian Wind Energy Association (ABEEólica) and the Global Wind Energy Council (GWEC)—were used solely for sectoral contextualisation and were not included in the core synthesis of the review.

The search strategies combined terms related to repowering, decommissioning, and the end-of-life of onshore wind farms, using the Boolean operators “AND” and “OR”. Search strings were formulated in both English and Portuguese in order to capture international contributions and studies from the Lusophone context. No strict lower time limit was imposed, allowing the inclusion of both seminal and recent contributions on repowering and decommissioning strategies.

Inclusion criteria covered scientific articles, systematic reviews, case studies, and peer-reviewed technical reports addressing onshore wind farms, analysing repowering processes and/or comparisons with decommissioning, and reporting energy, economic, or operational indicators applicable or comparable to the Brazilian and/or Portuguese contexts. Exclusion criteria comprised studies focusing exclusively on structural or mechanical analyses without a direct link to the systemic assessment of repowering impacts, works dedicated solely to offshore wind farms, duplicate publications, documents without full-text access, and studies lacking relevant information for comparing repowering and decommissioning. The selection process followed the phases recommended by PRISMA 2020. Searches in the four databases initially yielded approximately 180 records; after removing duplicates, around 140 unique studies remained. Title and abstract screening reduced this set to roughly 50 articles for full-text review. During the eligibility stage, full texts were assessed according to the inclusion and exclusion criteria, resulting in 27 studies that fully met the methodological and thematic requirements. The corresponding PRISMA flow diagram is presented in Figure 3.

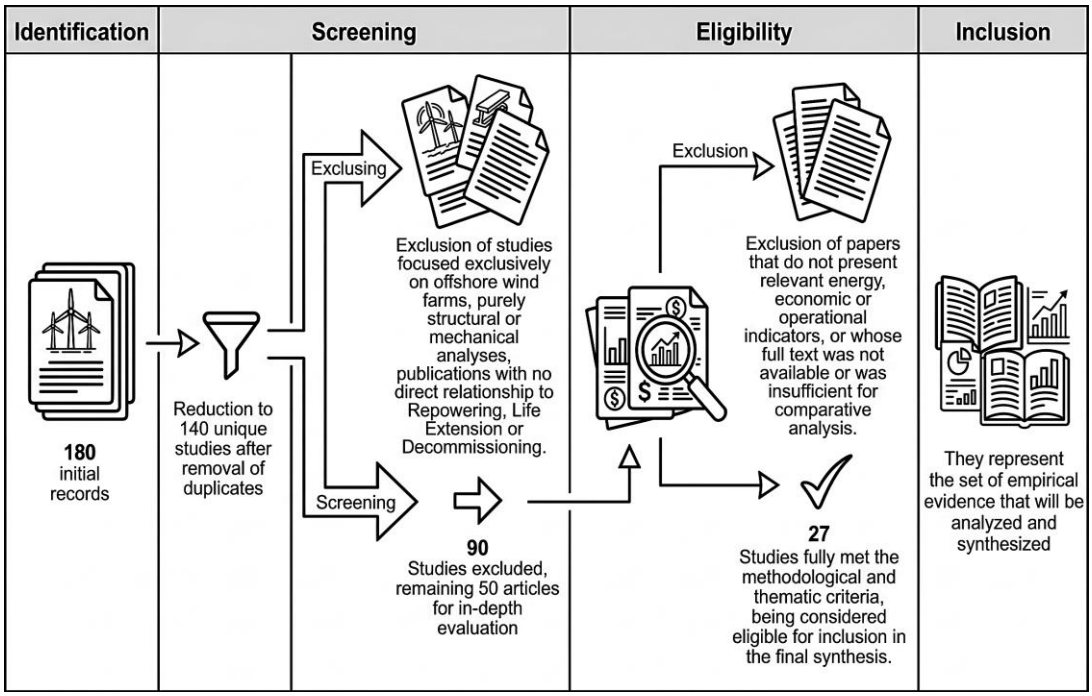


Figure 3: PRISMA flow diagram of the study selection process.
Source: Prepared by the authors, based on the PRISMA 2020 protocol.

Data extraction and analysis were conducted qualitatively and comparatively, with the aim of identifying patterns, convergences, and divergences across studies and synthesising the main benefits and limitations of repowering relative to the decommissioning of onshore wind farms. For each included study, information was recorded on geographic context, wind-farm characteristics, repowering typology, and reported energy, economic, and operational indicators. The analysis was organised into three main dimensions: (i) energy dimension (generation and efficiency gains), (ii) economic dimension (costs, revenue, and

return indicators), and (iii) operational and territorial dimension (operational continuity, asset reliability, and local socio-economic impacts). The information was systematised in a data-extraction matrix, presented in Table 1, which summarises authors, geographic context, repowering typology, and key indicators, thereby supporting the comparison between repowering and decommissioning strategies developed in the Results and Discussion sections.

Table 1 – Comparative synthesis of repowering typologies and main performance indicators reported in the literature.

Authors (year)	Country / Context	Repowering typology analysed	Main indicators reported
Del Río et al. (2011)	Europe	Full repowering vs. decommissioning	Generation (+20–100%), revenue, policies
Maurer et al. (2012)	Europe	Full repowering	Generation, economic and regulatory
Del Río et al. (2015)	Spain	Full repowering	Generation (+70–200%), revenue
Ziegler et al. (2018)	Europe	repowering	Generation, ROI (+15–25%)
Wang et al. (2018)	Global	Optimised repowering	Generation, ROI, reliability
Rubio et al. (2019)	Spain	Full repowering	Generation (+30–120%), costs
Martínez et al. (2020)	Europe	Full and partial repowering	Generation, LCA, costs (−20–40%)
Santos-Alamillos et al. (2020)	Portugal	Full repowering	Generation (+80–200%)
Dupont et al. (2020)	European Union	Repowering	Generation, decarbonisation
de Bona et al. (2021)	Brazil	Full and partial repowering	Generation, IRR, payback
Giani et al. (2021)	Global	Hybrid decision models	Generation, revenue
Ferreira et al. (2021)	Portugal	Multi-criteria repowering	Generation, feasibility
Hübner et al. (2021)	Europe	Repowering vs. social acceptance	Generation, territorial impacts
Lantz et al. (2017)	Global	Distributed repowering	Revenue, costs
Staffell et al. (2022)	Global	Repowering and climate	Generation, variability
Gasset et al. (2022)	Mature markets	Full repowering	Generation (+60–180%), revenue
Haces-Fernandez et al. (2022)	Global	Onshore wind repowering	Generation, revenue
Li et al. (2022)	Global	Economic repowering	Generation, revenue
Kitzing et al. (2023)	Europe	Policy frameworks for repowering	Generation, ROI
Nygaard et al. (2023)	Global	Repowering in complex terrain	Generation, costs
Santos et al. (2023)	Emerging markets	Full repowering	Generation, ROI
Pinto et al. (2023)	Brazil	Techno-economic repowering	Generation, costs
Colmenar-Santos et al. (2024)	Europe	Repowering vs. decommissioning	Sustainability, ROI
Silva et al. (2024)	Latin America	Repowering vs. decommissioning	Generation, revenue
Vieira et al. (2024)	Portugal	Lifetime extension and repowering	Financial performance
Ohlhorst & Bruns (2017)	Germany	Repowering as expansion	ROI, barriers
Syed et al. (2020)	Europe	Full/partial repowering	Generation, costs, operation

Source: Prepared by the authors.

Results

The application of the PRISMA protocol resulted in a final corpus of 27 peer-reviewed studies addressing the end-of-life of onshore wind farms from different analytical perspectives. Overall, the literature shows a predominance of research focused on repowering and lifetime extension, whereas decommissioning is mainly treated as a reference scenario or residual alternative for techno-economic comparison. Geographically, the studies are concentrated in European contexts—particularly Portugal, Spain, Germany, and other mature wind markets—reflecting the older age and higher territorial saturation of these fleets. In parallel, there is a recent increase in analyses devoted to emerging economies, notably Brazil, where the debate on repowering has gained prominence as early projects approach the end of their design lifetime (GWEC, 2023; ABEEólica, 2022).

Methodologically, case studies, techno-economic assessments, multi-criteria analyses, and comparative modelling approaches prevail, conducted at both wind-farm and sectoral or system scales. These works examine different intervention strategies, often linked to the reuse of existing infrastructure such as access roads, substations, and grid connection systems. The literature consistently characterises repowering as a central strategy for modernisation and operational continuity, associated with significant generation gains, improved efficiency, and the maintenance of local economic activity. In contrast, decommissioning is described as an option that leads to the interruption of renewable generation, loss of revenue, and high decommissioning costs, particularly in territories where new wind developments face strong constraints (GWEC, 2023).

Across the studies, four main repowering approaches are identified, differing in the scope of technical intervention and the degree of reuse of existing infrastructure. Full repowering involves the complete replacement of existing turbines with technologically more advanced units, typically with higher rated power, larger rotor diameters, and improved energy performance. This approach is widely adopted in mature markets such as Portugal and Spain, where territorial and permitting constraints favour maximising generation in already occupied areas. Partial repowering entails the replacement of only part of the existing turbines, while maintaining

satisfactory units in operation. This strategy lowers upfront investment, allows incremental generation gains, and provides greater flexibility in modernisation decisions. Technological repowering focuses on upgrading specific components—such as control systems, converters, blades, or monitoring systems—without full turbine replacement and is particularly relevant in contexts where regulatory or financial constraints limit more extensive interventions. Finally, lifetime extension relies on operational measures, structural inspections, and advanced maintenance strategies to prolong operation beyond the original design lifetime, a common approach in emerging economies, where sustaining operation tends to precede more capital-intensive repowering decisions.

The studies emphasise that the choice among these typologies is closely linked to wind-fleet maturity, regulatory frameworks, and local economic conditions. Sectoral reports and technical analyses stress that, regardless of the typology adopted, repowering tends to outperform decommissioning when generation, operational efficiency, and socio-economic impacts are jointly considered (ABEEólica, 2022; GWEC, 2023).

Regarding decommissioning, the reviewed works consistently associate this alternative with substantial negative impacts on the energy, economic, and territorial dimensions. From an energy standpoint, decommissioning implies the immediate interruption of renewable generation, reducing installed capacity and requiring compensation from other sources in the power system (Del Río et al., 2011; Ziegler et al., 2018; Colmenar-Santos et al., 2024). Economically, the literature frequently highlights the loss of revenue from energy sales and the reduction of municipal tax income resulting from wind-farm shutdowns (Maurer et al., 2012; Haces-Fernandez et al., 2022; Santos et al., 2023). In addition, the costs associated with dismantling, transporting, and disposing of major components—particularly towers, nacelles, and blades—constitute a considerable financial burden and are often cited as limiting factors for decommissioning (Giani et al., 2021; Silva et al., 2024). From a territorial and social perspective, wind-farm removal can disrupt local economic activity, with impacts on direct and indirect employment and on supply chains associated with operation and maintenance (Ohlhorst & Bruns, 2017; Hübner et al., 2021), especially in regions highly dependent on wind generation.

By contrast, the benefits of repowering relative to decommissioning are consistently and jointly reported across the different dimensions. From an energy perspective, the studies indicate generation increases between 20% and 200%, depending on the repowering typology, turbine characteristics, and local wind conditions (Del Río et al., 2015; Ziegler et al., 2018; Martínez et al., 2020; Gasset et al., 2022). These gains stem mainly from higher turbine efficiency, increased installed capacity per unit, and better exploitation of wind resources in consolidated areas. Economically, the literature reports revenue increases ranging from 15% to 50%, driven by improved operational performance, reuse of existing infrastructure, and reductions in the average cost of energy generation (Maurer et al., 2012; Haces-Fernandez et al., 2022; Li et al., 2022). The reuse of access roads, substations, and grid connections substantially lowers investment costs compared with new greenfield projects, particularly in territories with strong spatial constraints, as observed in Portugal and in Brazilian regions with high wind-farm density.

From an operational standpoint, repowering supports continued operation and asset modernisation, resulting in higher reliability, fewer failures, and optimised operation and maintenance practices (Wang et al., 2018; Nygaard et al., 2023). By keeping technical teams and preserving the knowledge accumulated throughout the original lifetime of the wind farms, this strategy enhances long-term asset management. In the territorial and social dimension, repowering tends to maintain local economic activity, preserving jobs and ensuring continuity of municipal tax revenues. Studies on social acceptance show that modernising existing sites generally faces less resistance than developing new wind farms in previously unused areas and helps reduce pressure on environmentally sensitive or socially contentious zones (Ohlhorst & Bruns, 2017; Hübner et al., 2021; Colmenar-Santos et al., 2024).

Overall, the results indicate that repowering is, in most scenarios analysed, the preferred alternative to decommissioning. Whereas decommissioning leads to immediate losses in generation, revenue, and local economic activity, repowering enables technological renewal, increased renewable energy production, and operational continuity in consolidated areas, thereby reducing negative economic and territorial impacts (ABEEólica, 2022; GWEC, 2023). Table 2 summarises the comparative performance of the two strategies across energy, economic, operational, and territorial dimensions.

Table 2 – Synthetic comparison between repowering and decommissioning.

Dimension	Repowering	Decommissioning
Energy generation	20–200% increase	Immediate interruption
Annual revenue	Direct increase	Total loss
LCOE	Reduction	Not applicable
Existing infrastructure	Reused	Deactivated
Local employment	Maintained	Lost
Municipal revenues	Continued	Reduced
Territorial impact	Mitigated	Negative

Source: Prepared by the authors.

Discussion

The systematic review shows that repowering onshore wind farms is consolidating as the preferred strategy for assets approaching the end of their operational life, particularly when compared with decommissioning from an integrated energy, economic, operational, and territorial perspective. The convergence across the reviewed studies suggests that the benefits of repowering go beyond isolated technical improvements and position it as a key instrument for energy planning and asset management in the context of low-carbon power systems.

From an energy perspective, the reported generation gains indicate that repowering enables a more intensive use of wind resources in already developed areas, even without significant territorial expansion. This is particularly relevant where environmental, social, or regulatory constraints limit the development of new greenfield projects, in contrast to decommissioning, which entails an immediate reduction in renewable capacity.

Economically, the studies show that repowering maintains and often increases the revenue streams associated with wind generation, whereas decommissioning interrupts them and involves high dismantling and waste-management costs. The reduction in the levelised cost of energy in repowered wind farms further strengthens the economic rationale of this strategy, particularly in light of the reuse of existing infrastructure.

From an operational perspective, repowering supports continuity of operation and asset modernisation, leading to greater reliability, fewer failures, and more efficient operation and maintenance routines. By avoiding the abrupt demobilisation of technical teams and the loss of accumulated know-how, repowering reinforces long-term operational efficiency. In contrast, decommissioning brings significant logistical and financial challenges related to dismantling and waste management and, although necessary in some contexts, is clearly limited as a default solution for end-of-life assets.

Comparing Portugal and Brazil reveals both different levels of fleet maturity and converging challenges. Portugal, with an older and more consolidated wind fleet, already faces immediate decisions involving repowering and decommissioning and relies on repowering to preserve renewable generation in a territory with limited scope for new projects. Brazil is still in an earlier phase of this process, but is likely to face similar dilemmas in the near future as early wind farms approach the end of their design lifetime, which reinforces the value of the Portuguese experience as a reference for anticipatory planning.

The results further support the view that decisions between repowering and decommissioning should not be based solely on isolated technical criteria, but on a systemic assessment that jointly considers energy, economic, operational, and territorial aspects. The synthetic comparison in Table 2 makes clear that repowering tends to outperform decommissioning in most of these dimensions, which justifies its explicit incorporation into public policies, regulatory frameworks, and long-term energy-planning strategies. Under this perspective, repowering should not be seen merely as an end-of-life solution, but as an integral component of the expansion and renewal logic of onshore wind fleets in the Luso-Brazilian context.

In practical terms, the evidence reviewed suggests that repowering should gradually be incorporated into least-cost expansion plans and long-term resource-adequacy studies, rather than being treated merely as an ad hoc project-level decision. This implies that system operators and regulators need to explicitly anticipate future repowering waves when defining auction designs, grid reinforcement plans, and regional development strategies, particularly in areas where wind power already plays a central role in the local economy.

Finally, although structural and engineering aspects can impose constraints on the feasibility of specific repowering projects, the literature indicates that these factors rarely act as decisive barriers on their own. Strategic choices between repowering and decommissioning tend to be shaped by combinations of regulatory, economic, territorial, and social-acceptance factors. For policymakers, this means that end-of-life choices for onshore wind farms cannot be separated from broader decarbonisation and regional-development objectives, especially in territories that have become structurally dependent on wind-related activities. This reinforces the relevance of the integrated approach adopted in this review and the need for holistic frameworks in the design of policies for the onshore wind sector.

Conclusion

The PRISMA-based systematic review enabled an integrated assessment of the energy, economic, and operational benefits of repowering onshore wind farms compared with decommissioning, with a focus on Portugal and Brazil. The findings indicate that repowering is generally the preferred strategy for end-of-life management, especially when the continuity of renewable generation, economic viability, and territorial impacts are considered jointly.

From an energy standpoint, the literature shows that repowering can deliver substantial generation gains—often between 20% and 200%—even in wind farms that maintain or reduce the number of turbines. These gains highlight repowering as an effective instrument for maximising wind-resource use in consolidated areas and avoiding the immediate capacity losses associated with decommissioning.

Economically, the studies indicate that repowering secures the continuity and, in many cases, the increase in revenue streams from wind generation, whereas decommissioning leads to their definitive interruption and involves significant dismantling and waste-management costs. The reduction in the levelised cost of energy in repowered wind farms underscores the economic soundness of this strategy, particularly when existing infrastructure is reused.

From an operational and territorial perspective, repowering supports the continuity of productive activity, preserves jobs, sustains local supply chains, and mitigates the socio-economic impacts associated with wind-farm shutdowns. The technological modernisation resulting from turbine replacement or upgrading leads to greater reliability and efficiency in asset management, which are key elements for the long-term sustainability of the sector.

The comparison between Portugal and Brazil shows that, despite differences in wind-fleet maturity, both countries face converging challenges regarding end-of-life management. Portugal, with an older and more consolidated fleet, is already making concrete decisions on repowering and decommissioning, while Brazil is approaching this stage as its earliest wind farms reach maturity. This highlights the importance of incorporating repowering strategies into long-term energy planning in both contexts.

The evidence gathered suggests that repowering should be prioritised over decommissioning in onshore wind farms that present adequate technical and operational conditions, particularly in environmentally and territorially consolidated areas. It is

recommended that repowering be explicitly integrated into energy-planning instruments and regulatory frameworks, based on integrated assessments that jointly consider energy, economic, operational, and territorial criteria.

From a policy and planning perspective, the findings point to the need for explicit regulatory frameworks that (i) recognise repowering as a distinct option from greenfield development, (ii) provide clear and predictable rules for licence renewal and environmental assessment, and (iii) internalise the costs and benefits of avoiding premature decommissioning of still-valuable sites. For Brazil in particular, there is a window of opportunity to design such frameworks before the first large wave of end-of-life decisions materialises, using insights from the Portuguese and broader European experience to avoid lock-in in suboptimal solutions. In Portugal, by contrast, the challenge lies in scaling up repowering while managing territorial constraints and social acceptance in already saturated regions.

As a limitation, this review relies predominantly on secondary studies and sectoral reports and does not include primary empirical analyses or project-specific modelling. Future research could deepen the topic through detailed case studies, quantitative comparative assessments, and investigations into regulatory and institutional barriers to repowering, as well as technical requirements for reusing foundations and existing infrastructure. Nonetheless, the evidence synthesised here suggests that repowering is a central strategy for the sustainability of the onshore wind sector, as it combines continuity of the energy transition, efficient use of existing assets, and mitigation of the economic and territorial impacts associated with decommissioning.

Acknowledgements

This work was developed within the research and development activities of both co-authors at FEUP – Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal. It is framed within the research activities of CONSTRUCT – Institute of R&D in Structures and Construction (UIDB/04708/2020; FCT/MCTES; PIDDAC).

References

ABEEÓLICA. *Relatório anual 2022: energia eólica no Brasil*. São Paulo, 2023.

ABEEÓLICA. *Relatório anual 2023: energia eólica no Brasil*. São Paulo, 2024.

COLMENAR-SANTOS, A. et al. Sustainability analysis of wind farm end-of-life options: repowering vs. decommissioning. *Journal of Environmental Management*, v. 346, p. 119044, 2024. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119044.

DE BONA, J. C.; FERREIRA, J. C. E.; ORDOÑEZ DURAN, J. F. Analysis of scenarios for repowering wind farms in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, p. 110218, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110218.

DEL RÍO, P.; CALVO SILVOSA, A.; IGLESIAS GÓMEZ, G. Policies and design elements for the repowering of wind farms: a qualitative analysis of different options. *Energy Policy*, v. 39, n. 4, p. 1897–1908, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.01.029.

DEL RÍO, P.; IGLESIAS GÓMEZ, G.; CALVO SILVOSA, A. Repowering: an actual possibility for wind energy in Spain in a new scenario without feed-in tariffs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 319–337, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.038.

DUPONT, E.; KOPPELAAR, R.; JEANMART, H. Decarbonization scenarios for the EU and MENA power system: considering spatial distribution and short-term dynamics of renewable generation. *Energy Policy*, v. 141, p. 111440, 2020. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111440.

ENERCON. *Enercon wind energy converters: product overview*. Aurich: Enercon GmbH, 2010. Disponível em: https://www.enercon.de. Acesso em: 2 mar. 2026.

E2P. *Plataforma de dados de energia eólica em Portugal*. Porto: Instituto de Engenharia, 2024. Disponível em: https://e2p.inegi.up.pt. Acesso em: 2 mar. 2026.

FERREIRA, P.; SILVA, P.; SOARES, I. Repowering wind farms: a multi-criteria decision analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 68, n. 6, p. 1798–1810, 2021. DOI: 10.1109/TEM.2020.2991234.

GASSET, Y.; GONZÁLEZ, E.; ZIEGLER, L. A review of wind farm repowering strategies in mature markets. *Journal of Cleaner Production*, v. 350, p. 131456, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131456.

GIANI, P. et al. Hybrid approaches for wind farm repowering and decommissioning decisions. *Energy Policy*, v. 149, p. 112019, 2021. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.112019.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). *Global wind report 2024*. Brussels, 2024.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). *Global wind report 2025*. Brussels, 2025.

HACES-FERNANDEZ, F. et al. Repowering onshore wind farms: a global perspective on economic viability. *Energy Economics*, v. 104, p. 105648, 2022. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105648.

HÜBNER, G.; POHL, J.; WEBER, E. Monitoring acceptance of new extraction sites of renewable energy in southern countries. *Energy Policy*, v. 152, p. 112188, 2021. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112188.

KITZING, L.; MITCHELL, C.; MORTHORST, P. E. Policy frameworks for onshore wind repowering in Europe. *Energy Strategy Reviews*, v. 46, p. 101030, 2023. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101030.

LANTZ, E.; WISER, R.; HAND, M. Assessing the future of distributed wind: opportunities for behind-the-meter wind. *Renewable Energy*, v. 101, p. 795–808, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2016.09.033.

LI, H.; ZENG, M.; GUO, P. Economic evaluation of wind farm repowering strategies. *IEEE Access*, v. 10, p. 113421–113434, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3214567.

MARTÍNEZ, E. et al. Life cycle assessment of multi-megawatt wind turbines with different repowering strategies. *Journal of Cleaner Production*, v. 244, p. 118571, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118571.

MAURER, L. T.; SCHMID, E.; FAAIJ, A. Repowering wind farms: economic and policy implications. *Energy Economics*, v. 34, n. 6, p. 1909–1919, 2012. DOI: 10.1016/j.eneco.2012.08.019.

NYGAARD, N. G. et al. Modelling wake effects in large wind farms in complex terrain: the problem, the methods and the issues. *Wind Energy Science*, v. 8, n. 1, p. 1–22, 2023. DOI: 10.5194/wes-8-1-2023.

OHLHORST, D.; BRUNS, E. Drivers and barriers to wind power expansion in Germany. *Energy Policy*, v. 108, p. 154–166, 2017. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.05.049.

PINTO, J.; ESTANQUEIRO, A.; SILVA, R. Technical-economic assessment of onshore wind repowering in emerging economies. *IEEE Latin America Transactions*, v. 21, n. 4, p. 421–430, 2023. DOI: 10.1109/TLA.2023.1012345.

RUBIO, H.; MARTÍNEZ, E.; BLANCO, J. Repowering strategies for onshore wind farms: a case study in Spain. *Applied Energy*, v. 244, p. 88–99, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.156.

SANTOS, L.; ESTANQUEIRO, A.; PINTO, R. Economic assessment of wind farm repowering in emerging markets. *Renewable Energy*, v. 201, p. 1250–1263, 2023. DOI: 10.1016/j.renene.2022.11.081.

SANTOS-ALAMILLOS, F. J. et al. Repowering old wind farms: a multi-criteria approach to optimal wind turbine selection. *Renewable Energy*, v. 146, p. 2271–2284, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.109.

SILVA, A. R.; COSTA, L.; PEREIRA, M. Challenges and opportunities in wind farm decommissioning vs. repowering. *IEEE Access*, v. 12, p. 45678–45692, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3345678.

STAFFELL, I.; PFENNINGER, S.; JANSEN, M. The increasing impact of weather on electricity supply and demand. *Energy*, v. 247, p. 123531, 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123531.

SYED, A. H. et al. Partial repowering analysis of a wind farm by turbine hub height variation to mitigate neighbouring wind farm wake interference using mesoscale simulations. *Applied Energy*, v. 268, p. 115050, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115050.

VIEIRA, M.; RODRIGUES, S.; SILVA, J. Onshore wind in Portugal: history, supporting policies, economic viability and future perspectives. *Energy Reports*, v. 10, p. 1234–1248, 2024. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.01.056.

WANG, Y.; WU, Q.; KANG, C. Optimal repowering decisions for wind farms considering stochastic wind speed and turbine reliability. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 9, n. 3, p. 1177–1187, 2018. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2786183.

ZIEGLER, L. et al. Lifetime extension of onshore wind turbines: a review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 1261–1271, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.100.

ANÁLISE DO TEOR DE UMIDADE EM ÓLEO RESIDUAL TRATADO COM RESÍDUOS DE ARGAMASSA

1 Laís Fernanda Juchem do Nascimento, 1 Joel Gustavo Teleken, 2 Fabiano Bisinella Scheufele, 1 Thompson Ricardo Weiser Meier, 3 Paulo André Cremonez, 4 Rodrigo Brackmann

[1]Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia e Ciências Exatas, Palotina, Brasil e-mail: laisjuchem@ufpr.br; [2]Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Toledo, Brasil; [3]Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Processos Químicos, Toledo, Brasil [4]Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Química, Pato Branco, Brasil

Palavras-chave: adsorção; pré-tratamento de biocombustível; valorização de resíduos da construção civil.

Resumo

O reaproveitamento de óleo de cozinha usado representa uma alternativa estratégica para produção de biocombustíveis, contudo sua viabilidade tecnológica depende do controle de parâmetros críticos como teor de ácidos graxos livres (AGL) e teor de umidade. Neste estudo, avaliou-se o desempenho de resíduos de argamassa, provenientes de canteiro de obrase submetidos a tratamento térmico a 850 °C por 1 h, como material adsorvente no pré-tratamento de óleo residual coletado em restaurante universitárioOs experimentos foram conduzidos em sistema batelada por 2 h, empregando planejamento experimental do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), considerando temperatura (15–25 °C), agitação (100–200 rpm) e massa do adsorvente (2–8 g). O teor de umidade foi determinado por método gravimétrico a 105 °C por 24 h, enquanto o índice de acidez foi obtido por titulação. Após isso, as respostas foram integradas por meio de normalização e cálculo de índice multicritério de desempenho. A análise por metodologia de superfície de resposta indicou influência significativa da temperatura e das interações entre variáveis na redução da umidade residual, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,61$. A temperatura destacou-se como fator mais relevante no controle da umidade, enquanto a massa do adsorvente favoreceu maior remoção de AGL. A condição ótima multicritério foi identificada em 23 °C, 180 rpm e 3,21 g, alcançando 76% de redução de AGL e 1% de umidade. Os resultados demonstram que resíduos de argamassa termicamente tratados apresentam potencial técnico como alternativa para pré-tratamento biocombustível.

Introdução

As emissões globais de CO_2 do setor energético aumentaram 1,3% em 2023, alcançando 40,6 $GtCO_2$, enquanto a concentração atmosférica atingiu 419,31 ppm (Friedlingstein *et al*., 2025). Entre 2021 e 2023, fatores como preços da energia e riscos geopolíticos influenciaram as emissões de forma diferenciada entre setores (Kartal, Taşkın, Depren, 2024). Nos Estados Unidos, segundo maior emissor em 2022 (4,8 $GtCO_2$), o alcance da meta de redução de 50–52% até 2030 exige avanços na transição energética e em inovação ecológica (Zhang *et al*., 2024). Nesse cenário, o reaproveitamento de óleo de cozinha usado (WCO) apresenta-se como alternativa econômica para produção de biocombustíveis, além de reduzir impactos ambientais associados ao descarte inadequado (Asare et al., 2022).

Contudo, os óleos residuais de cozinha com alto teor de ácidos graxos livres (AGL) não podem ser convertidos diretamente em biodiesel por transesterificação alcalina (Lin *et al*., 2020). É necessária uma etapa prévia de esterificação com catalisadores, seguida de neutralização e separação (Ibrahim *et al*., 2022). Após o pré-tratamento, o índice de acidez deve ser inferior a 2% para viabilizar a transesterificação básica (Joshi *et al*., 2017). Entretanto, esse processo amplia o tempo reacional e os custos de produção. A qualidade deste resíduo varia conforme tipo de óleo, frequência de reutilização, temperatura de cocção e armazenamento, afetando o desempenho do processo (Cárdenas et al., 2021). Incrementos na acidez podem reduzir o rendimento final em até 5% (Silva, 2017), e óleos com alto teor de AGL demandam maior proporção de metanol e energia, elevando custos operacionais e emissões associadas à transesterificação (Singh *et a*l., 2025; Dhar *et a*l., 2009).

Ainda, no contexto dos biocombustíveis, a presença de água em óleos residuais e no biodiesel final também compromete significativamente a eficiência do processo. A literatura internacional aponta que a água favorece reações de hidrólise dos triglicerídeos, elevando o teor de ácidos graxos livres e promovendo saponificação durante a transesterificação alcalina, o que reduz o rendimento e dificulta a separação das fases (Ma; Hanna, 1999); (Freedman, Pryde; Mounts, 1984). Além disso, estudos mostram que a umidade residual no biodiesel pode causar instabilidade oxidativa, crescimento microbiano e problemas de corrosão em sistemas de armazenamento (Knothe, 2007; Berrios; Skelton, 2008).

Além do controle de ácidos graxos livres, a remoção da umidade é um fator determinante para a viabilidade da transesterificação. Nesse contexto, os resíduos de argamassa surgem como uma alternativa promissora devido à sua composição rica em silicatos e carbonatos de cálcio. Quando submetidos a tratamentos térmicos em altas temperaturas, esses resíduos passam por processos de decomposição térmica que resultam na formação de óxidos ativos, como o óxido de cálcio (CaO). Este composto confere ao material um caráter básico necessário para a neutralização dos AGL via catálise heterogênea ou adsorção química. Somado a isso, a estrutura porosa da matriz cimentícia residual favorece a captura física de moléculas de água, permitindo um tratamento simultâneo de purificação. Assim, diferentemente de sua aplicação convencional na construção civil focada em propriedades mecânicas (Neville, 2011), este estudo propõe o reaproveitamento tecnológico de resíduos de argamassa termicamente tratados como agente bifuncional no pré-tratamento de óleo residual, visando a redução drástica da acidez e o

controle rigoroso da umidade. Estudos internacionais demonstram que o excesso de água aumenta a porosidade capilar e reduz a resistência mecânica devido à formação de vazios após a evaporação da água não reagida (Neville, 2011); (Mindess, Young & Darwin, 2003). Pesquisas também indicam que variações na umidade ambiental afetam o processo de cura, podendo intensificar retração, fissuração e perda de aderência (Holt; Leivo, 2004); (Zhang ;Li, 2011). Diante desse contexto, este estudo propõe o uso de resíduos de argamassa termicamente tratados como agente redutor de acidez no pré-tratamento de óleo residual de cozinha, com foco simultâneo na redução de ácidos graxos livres e no controle da umidade.

Material e Métodos

Neste estudo, o material utilizado como adsorvente foi um resíduo obtido de resíduos de construção civil, composto por resíduos de argamassa. O adsorvato aplicado foi óleo de cozinha usado, coletado no restaurante da universidade da UFPR (Universidade Federal do Paraná). A argamassa foi coletada diretamente da obra, triturada em um moinho de bolas e peneirada utilizando um conjunto de peneiras de laboratório padrão até a obtenção de partículas na faixa de 590 a 297 µm. Em seguida, o material foi submetido a um tratamento térmico em forno mufla a 850 °C, por um período de 1 hora. A taxa de aquecimento utilizada durante esse processo foi fixada em 10 °C min-1 (Ma *et a*l, 2021). Os experimentos de adsorção foram realizados em modo batelada, utilizando um banho-maria *Dubnoff* para agitação. Os testes foram conduzidos em frascos Erlenmeyer de 250 mL contendo 33 g de óleo residual de cozinha usado. O óleo residual coletado do restaurante universitário apresentou um índice de acidez de 253.931 mg KOH g^{-1}. A massa do adsorvente e as condições de agitação foram selecionadas com base no planejamento estatístico descrito a seguir.

Para complementar a análise microscópica, utilizou-se a técnica EDS (Detector de Raios X por Dispersão de Energia, EDX ou EDS), acoplada à MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), como análise semiquantitativa para determinar os tipos e níveis (em porcentagem) de elementos químicos presentes nas porções testadas dos adsorventes. A técnica baseia-se na espectrometria de raios X por dispersão de energia. Para isso, foi empregado o equipamento Penta FET Precision. Após isso as representações estruturais cristalinas e a modelagem das fases minerais foram elaboradas com base nos dados de refinamento obtidos no software GSAS-II, permitindo a identificação e quantificação das fases

Todos os experimentos foram realizados durante um período fixo de 2 h. O índice de acidez foi calculado utilizando as Equações 01 e 02, apresentadas na Tabela 01, que descrevem a relação entre o volume de titulante utilizado e o teor de ácidos graxos livres no óleo. Após centrifugação, as amostras foram analisadas quanto ao índice de acidez seguindo o protocolo do Instituto Adolfo Lutz (2008).

Tabela 01. Equações utilizadas para o cálculo do índice de acidez

Equação	Parâmetros
$IA = \frac{V \; x \; C_{NaOH} \; x \; M}{m}$ Eq. (1)	IA = Índice de acidez (mgNaOH .g^{-1}); V = Volume de NaOH consumido na titulação (mL); C_{NAOH} = Concentração da solução de NaOH (mol.L^{-1}); M = Massa molar do NaOH (g.mol^{-1}); m = Massa de óleo (g)
$\%R = \frac{I_{A\,i} - I_{A\,f}}{I_{A\,i}} \; x \; 100$ Eq. (2)	%R = Porcentagem de redução; IA_i = Índice de acidez da amostra sem tratamento (branco) (mg NaOH g^{-1}); IA_f = Índice de acidez da amostra após tratamento (mgNaOH .g^{-1}).

O índice de acidez foi calculado em mg de NaOH g^{-1} de amostra (Equação 1) e, para converter esse valor em mg de hidróxido de potássio (KOH), é necessário multiplicar o resultado por 1,4, visto que o hidróxido de potássio tem 1,4 vezes o peso do hidróxido de sódio.

O DCCR considerou três variáveis principais: temperatura, velocidade de agitação e massa da argamassa utilizada como adsorvente. Cada uma delas foi testada em cinco níveis (−1,68, −1, 0, 1, 1,68), conforme mostrado na Tabela 2. Isso criou uma matriz fatorial 2^3, incluindo seis pontos axiais e três repetições no ponto central, o que resultou em um total de 17 ensaios diferentes. O experimento central foi conduzido em triplicata. O objetivo era avaliar a capacidade do sistema em reduzir os ácidos graxos livres (AGL) nos óleos de cozinha usados e na umidade. O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico. A amostra foi colocada em uma estufa de laboratório a 105 °C por 24 horas para garantir a completa evaporação da água. Após a secagem, a amostra foi pesada novamente em uma balança analítica. A porcentagem de umidade foi então calculada utilizando a Equação (3):

$$\text{Teor de Umidade (\%)} = \frac{\text{Massa úmida} - \text{Massa seca}}{Massa\ úmida} x100 \qquad \text{Eq.(3)}$$

A Tabela 2 apresenta os níveis codificados (−1,68 a +1,68) e reais das variáveis do DCCR: temperatura (15–25 °C), agitação (100–200 rpm) e massa (2–8 g). O ponto central foi definido em 20 °C, 150 rpm e 5 g Os gráficos apresentados neste trabalho foram elaborados utilizando o *software* Statistica v. 14.1.0.8

.

Tabela 02. Especificação das variáveis do Planejamento Experimental (DCCR)

Variáveis	−1.68	−1	0	1	1.68
Temperatura (°C)	15	17	20	23	25
Agitação (rpm)	100	120	150	180	200
Massa (g)	2	3,21	5	6,79	8

Após isso, com os valores do DCCR dos ácidos graxos livres e do teor de umidade, realizou-se o procedimento de normalização das respostas e o cálculo do índice global de desempenho multicritério estão descritos na Tabela 3, que apresenta as etapas, expressões matemáticas e critérios adotados para integrar a remoção de AGL e o teor de umidade em um único indicador de desempenho.

Tabela 03. Procedimento de Normalização e Cálculo do Índice de Desempenho Multicritério

Etapa	Objetivo	Expressão Matemática	Descrição
1	Normalização da redução de AGL (maximizar)	$AGL_{\_norm} = \frac{(AGL\_i - AGL\_min)}{(AGL\_max - AGL\_min)}$/	Converte-se a remoção de AGL para escala adimensional (0–1), onde valores mais altos são mais desejáveis.
2	Normalização do teor de umidade (minimizar)	$Umidade_{\_norm} = 1 - \frac{(AGL\_i - AGL\_min)}{(AGL\_max - AGL\_min)}$	Aplica-se normalização inversa, garantindo que menores valores de umidade resultem em maior desejabilidade.
3	Índice ponderado	$Índice_{\_global} = 0{,}7AGL_{\_norm} + 0{,}3 \cdot Umidade_{\_norm}$	Permite-se atribuir diferentes importâncias às respostas, onde $0{,}7w_1 + 0{,}3w_2 = 1$.

O procedimento consiste com a normalização da remoção de AGL, variável a ser maximizada, convertendo os valores obtidos para uma escala adimensional de 0 a 1, na qual valores mais elevados representam melhor desempenho. Em seguida, realiza-se a normalização do teor de umidade, aplicando-se uma transformação inversa para que menores valores de umidade resultem em índices mais próximos de 1, indicando maior desejabilidade. Por fim, determina-se um índice ponderado, atribuindo diferentes pesos às variáveis (por exemplo, 0,7 para AGL e 0,3 para umidade)

Resultados e Discussão

A Figura 01 apresenta a caracterização microestrutural e cristalina da argamassa nas condições in natura (a), tratada termicamente a 850 °C (b) e após o seu contato com óleo residual (c), permitindo correlacionar modificações morfológicas com alterações estruturais identificadas por difração de raios X.

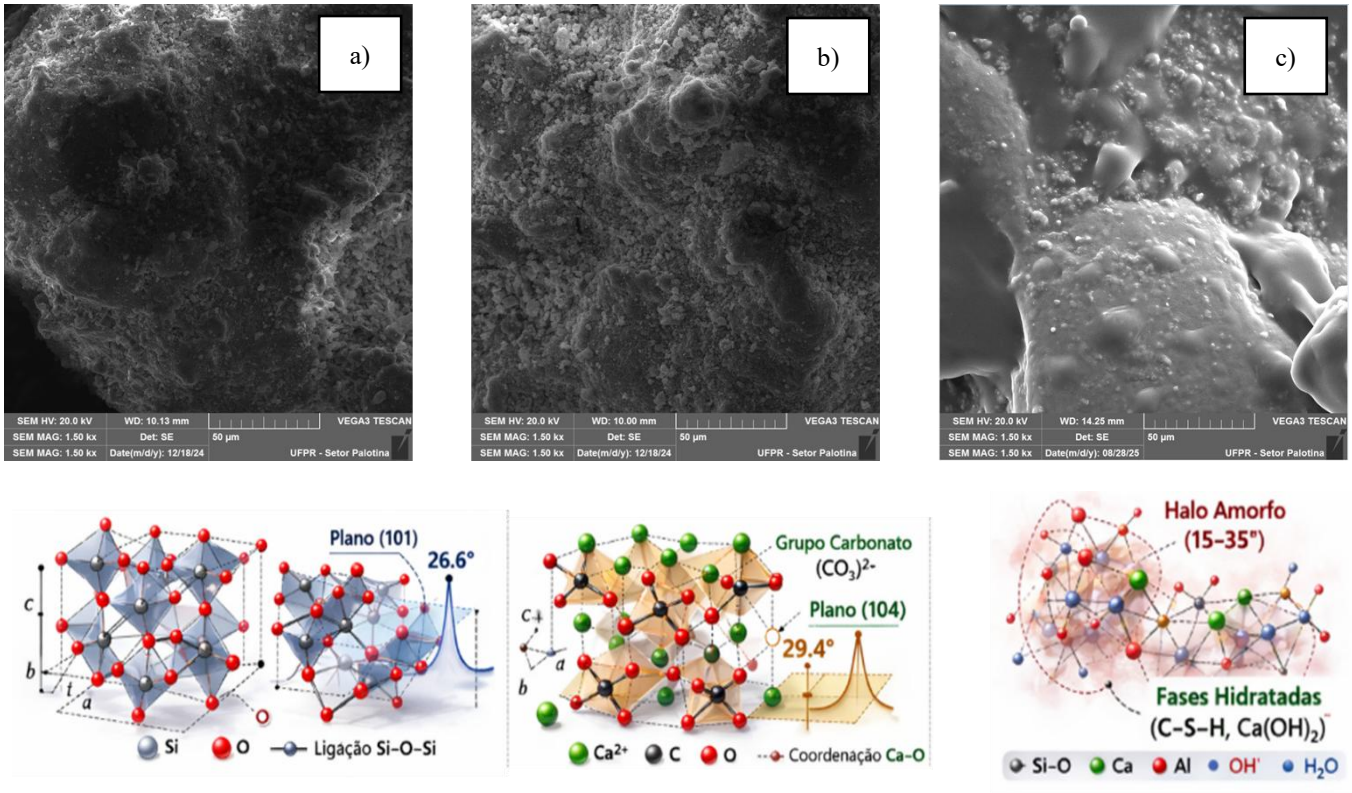
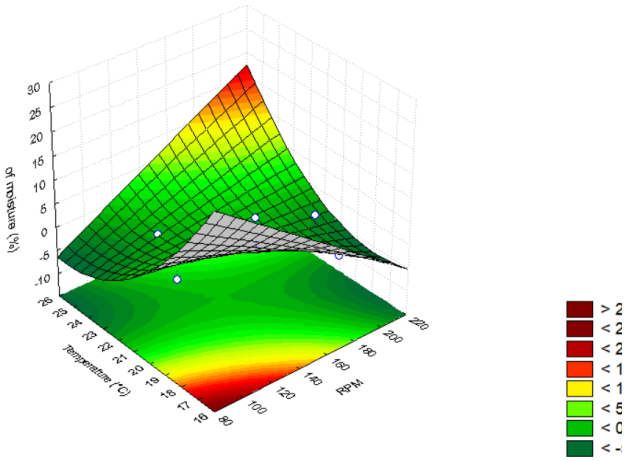


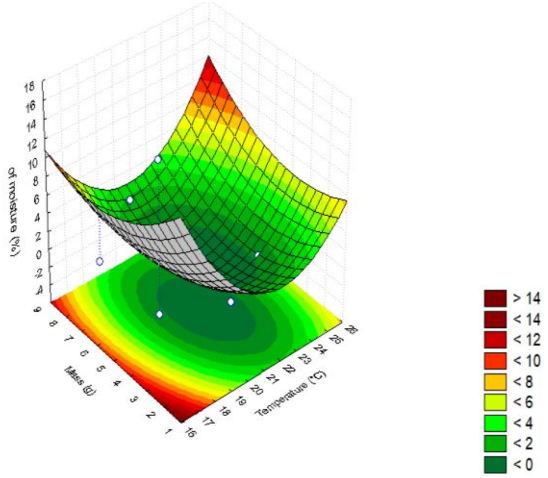
Figura 01-Micrografias SEM da superfície da argamassa modificada: (a) não tratada (in natura); (b) tratada termicamente a 850 °C; (c) tratada termicamente a 850 °C após adsorção de AGL.

A composição elementar (%) das amostras foi determinada por análise química, evidenciando que a argamassa "in natura" apresentou 13,29% de Si e 12,85% de Ca, enquanto o material calcinado apresentou aumento de Ca (26,39%) e redução de Si (4,71%), e, proporção relativa. A amostra após o contato com o óleo residual apresentou predominância de carbono (C–O–H = 90,80%), com teores de Si (4,79%) e Ca (3,70%), indicando alteração significativa da matriz química após o a redução de ácidos graxos livres. As micrografias evidenciam que a amostra não tratada (a) apresentou matriz heterogênea com presença de fases hidratadas e textura irregular. Após o tratamento térmico(b) , observa-se reorganização estrutural e maior definição granular, indicando desidratação e aumento relativo da ordem cristalina. Já a amostra submetida (c) à adsorção de AGL apresentou recobrimento superficial e aspecto mais denso, sugerindo interação orgânico-inorgânica e possível incremento de fração amorfa.

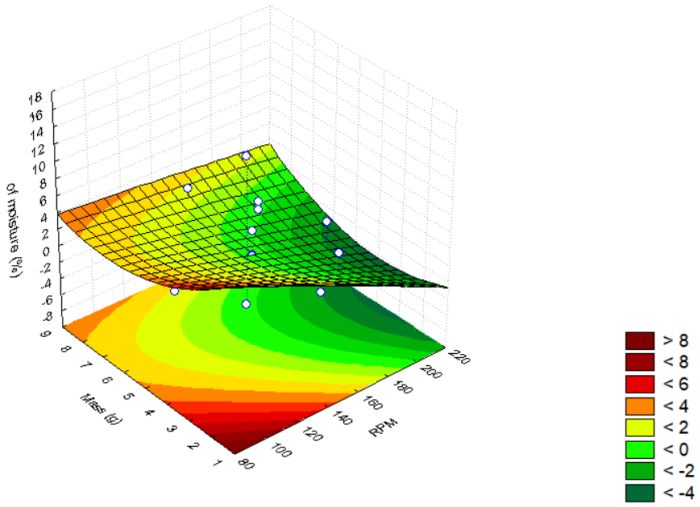
Os dados da Figura 02 apresentada mostra a aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) para avaliar a influência da temperatura (T), massa (m) e agitação (A) sobre a umidade (%) de um material tratado termicamente a 850 °C.



$Z=317,87-21,93A+0,36A^2-0,89T-0,00T^2+0,04AT+117,01A+0,01T-24,47$



$Z=317,87-21,93T+0,36T^2-5,97M+0,22M^2+0,04TM+117,01T+0,01M-136,48$



$Z=317,87-0,89A-0,00A^2-5,97M+0,22M^2+0,04AM+117,01A+0,01AM-298,14$

$R^2=0,61$

T: Temperatura; m:Massa; A: Agitação

Figura 02. Superfícies de resposta da umidade (%) em função da massa (g), agitação (rpm) e temperatura (°C) usando argamassa tratada termicamente a 850°C.

Apesar de um baixo valor no coeficiente de determinação (R^2 = 0,61), debe-se ressaltar que trata-se de resíduos heterogêneos, uma vez que a variabilidade intrínseca na composição física, química e mineralógica tende a aumentar a dispersão dos dados, em particular o ajuste de múltiplas variáveis. A análise estatística, apoiada por ANOVA e metodologia de superfície de resposta, mostrou que a temperatura de secagem, a velocidade de agitação (RPM) e a massa da amostra afetam significativamente a umidade residual na argamassa tratada a 850 °C. Entre esses fatores, a temperatura destacou-se como o mais influente, especialmente na faixa de 17–25 °C, onde reduziu fortemente os níveis de umidade. A interação entre as variáveis também foi importante, especialmente entre temperatura e agitação, indicando que otimizar apenas um fator não é suficiente (Fig. 03). Além disso, o efeito quadrático da temperatura foi significativo, sugerindo que a relação entre temperatura e redução ácida não é linear direta; provavelmente existe uma determinada faixa em que o efeito é melhor. Os termos lineares de agitação e massa do adsorvente também foram importantes, contribuindo positivamente para o processo. No entanto, o termo quadrático para agitação não foi significativo, o que significa que alterar muito a agitação não impacta muito o resultado, pelo menos não nas condições testadas. O controle da umidade é essencial para maximizar a qualidade do biocombustível e reduzir formação excessiva de água no produto (Mohan *et al*., 2006).

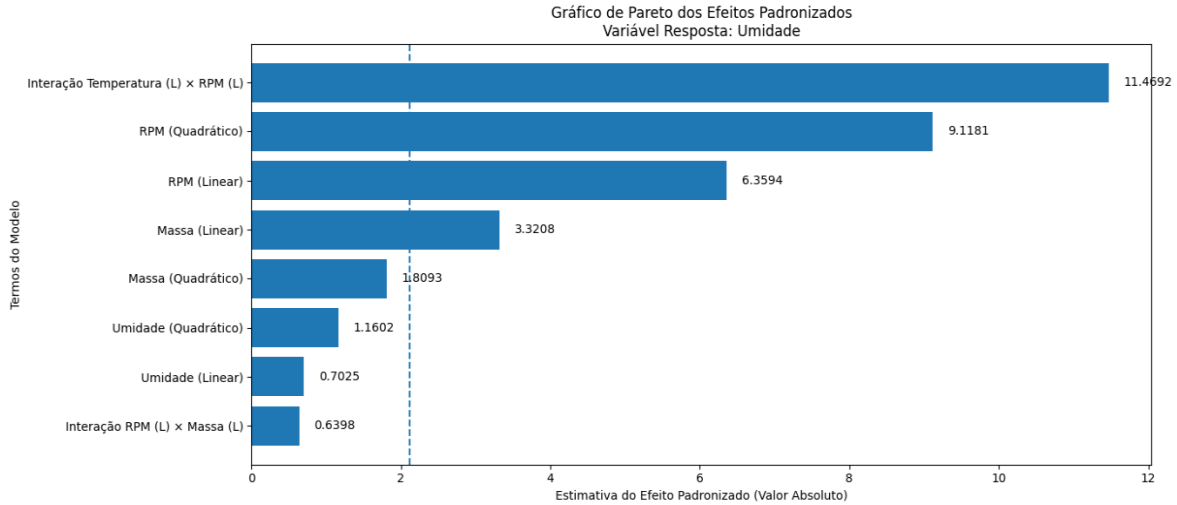


Figura 03. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o índice de redução de umidade.

De forma isolada, quando somente analisado as melhores condições de secagem foram em torno de 20,3 °C, 153,5 RPM e 5 g de massa, o que minimizou a umidade e maximizou a eficiência do processo. Essas descobertas estão alinhadas com estudos anteriores. Por exemplo, Hancox (1968) mostrou que, à medida que a temperatura aumenta, a maneira como a água se move dentro do cimento muda, de ser empurrada por forças capilares para se mover como vapor, o que melhora a eficiência da secagem. Em resumo, o estudo destaca a importância de equilibrar temperatura, agitação e massa. Mesmo em baixas temperaturas de secagem, é possível obter uma remoção eficiente da umidade, economizando energia e preservando a integridade estrutural do material (Fig. 01). Temperaturas moderadas aceleram a cinética da reação ácido-catalisada, permitindo maior eficiência na redução de AGL antes da etapa de transesterificação alcalina (Zhang *et al*., 2003).

Já quando analisados os dois parâmetros normalizados de teor de umidade e ácidos graxos livres, a análise multicritério indicou que a condição 23 °C, 180 rpm e 3,21 g apresentou o melhor desempenho global, conciliando elevada redução de AGL (76%) e baixo teor de umidade (1%), enquanto a condição com 8 g favoreceu maximização isolada da remoção de AGL.

A Tabela 04 evidencia que a combinação de temperatura, agitação e massa influencia diretamente a redução de ácidos graxos livres (AGL), o teor de umidade e o índice global de desempenho. Esses resultados confirmam que o aumento da temperatura acelera a cinética de esterificação, promovendo maior conversão de AGL e reduzindo a formação de sabões (Canakci; Van Gerpen, 2001) além de favorecer a remoção de umidade e evitar reações de hidrólise (Ma; Hanna, 1999).

Tabela 04. Resultados dos Procedimento de Normalização e Cálculo do Índice de Desempenho Multicritério

Temp (°C)	Agitação RPM	Massa (g)	Teor de Umidade (%)	Redução AGL (%)	AGL_norm	Umid_norm	Índice_global
17	120	3,21	17	69	0,82	0	0,41
23	120	3,21	0	19	0	1	0,5
17	180	3,21	1	65	0,754	0,941	0,848
23	**180**	**3,21**	**1**	**76**	**0,934**	**0,941**	**0,938**
17	180	6,79	1	74	0,902	0,941	0,922
23	120	6,79	0	33	0,23	1	0,615
17	180	6,79	1	74	0,902	0,941	0,922
23	180	6,79	0	57	0,623	1	0,812
20	150	5	0	40	0,344	1	0,672
25	150	5	3	45	0,426	0,824	0,625
20	100	5	0	35	0,262	1	0,631
20	200	5	0	43	0,393	1	0,697
20	150	2	1	28	0,148	0,941	0,545
20	150	8	3	80	1	0,824	0,912
20	150	5	2	47	0,459	0,882	0,671
20	150	5	2	39	0,328	0,882	0,605
20	150	5	1	51	0,525	0,941	0,733

Obs: Em destaque os melhores resultados.

A maior agitação (180 RPM) também contribuiu para melhores resultados, indicando que o aumento da mistura melhora a transferência de massa e a taxa reacional (Leung et al., 2010). Assim, os dados corroboram que o controle integrado dessas variáveis é determinante para maximizar a redução de AGL, minimizar o teor umidade e otimizar a qualidade do biodiesel, conforme demonstrado em estudos de otimização estatística aplicada ao processo (Atadashi *et al*., 2012)

Considerações Finais

A aplicação do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) permitiu identificar a influência significativa da temperatura e das interações entre as variáveis operacionais. Esse parâmetro destacou-se como o parâmetro mais relevante na redução do teor umidade. O coeficiente de determinação (R^2 = 0,61) indica ajuste estatístico moderado por se tratar de um material heterogêneo, sugerindo que, embora o modelo explique parte considerável da variabilidade experimental, estudos adicionais podem aprimorar sua capacidade preditiva.

Já quando verificado a condição ótima de multicritério entre ácidos graxos livres e o teor de umidade as condições experimentais de (23 °C, 180 rpm e 3,21 g) proporcionaram um desempenho equilibrado, alcançando 76% de redução de AGL e 1% de umidade, confirmando a eficácia do resíduo tratado termicamente.

O reaproveitamento da argamassa descartada como material funcional reduz a necessidade de disposição em aterros e agrega valor a um resíduo de baixa aplicabilidade estrutural, ao mesmo tempo em que contribui para o pré-tratamento de óleos com elevado teor de ácidos graxos livres. Entretanto, ainda são necessárias investigações para consolidar a aplicação em escala ampliada, incluindo avaliação da estabilidade estrutural após múltiplos ciclos, regeneração do material, balanço energético da calcinação e viabilidade econômica em escala piloto. Ainda, a elucidação dos mecanismos de interação entre a matriz mineral e os compostos orgânicos do óleo demanda análises complementares, como estudos cinéticos e de equilíbrio.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Os autores também agradecem o apoio do Laboratório de Produção de Biocombustíveis (LPB) da Universidade Federal do Paraná – Campus Palotina.

Referências Bibliográficas

ASARE, M. A.; DE SOUZA, F. M.; GUPTA, R. K. Waste to resource: synthesis of polyurethanes from waste cooking oil. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 61, n. 50, p. 18400–18411, 2022. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03718. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03718

ATADASHI, I. M.; AROUA, M. K.; AZIZ, A. A.; SULAIMAN, N. M. N. Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3275–3285, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.063

BERRIOS, M.; SKELTON, R. L. Comparison of purification methods for biodiesel. **Fuel,** v. 87, n. 8–9, p. 1788–1796, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.019

CANAKCI, M.; VAN GERPEN, J. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n. 6, p. 1429–1436, 2001. DOI: 10.13031/2013.7010) @2001

CÁRDENAS, J.; ORJUELA, A.; SÁNCHEZ, D. L.; NARVÁEZ, P. C.; KATRYNIOK, B.; CLARK, J. Pre-treatment of used cooking oils for the production of green chemicals: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125129, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125129.

CHEN, Xudong; WU, Shenxin. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 804-812, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058

DHAR, B. R.; KIRTANIA, K. Excess methanol recovery in biodiesel production process using a distillation column: a simulation study. **Chemical Engineering Research Bulletin**, v. 13, n. 2, p. 45–50, 2009. DOI:10.3329/cerb.v13i2.3538

FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; HAUCK, J.; LANDSCHÜTZER, P.; et al. Global carbon budget 2024. **Earth System Science Data Discussions**, p. 1–133, 2024.acessado em: https://globalcarbonbudget.org/

FREEDMAN, B.; PRYDE, E. H.; MOUNTS, T. L. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 61, n. 10, p. 1638–1643, 1984.DOI: https://doi.org/10.1007/BF02541649

HANCOX, N. L. The effect of moisture on cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 1, n. 2, p. 167–176, 1968.DOI: https://doi.org/10.1186/s10086-021-02008-z

HOLT, E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage. **Building and Environment**, v. 39, n. 12, p. 1379–1387, 2004.DOI: https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00068-4

IBRAHIM, S. M. A.; ABED, K. A.; GAD, M. S.; ABU HASHISH, H. M. A semi-industrial reactor for producing biodiesel from waste cooking oil. **Biofuels**, v. 14, n. 4, p. 393–403, 2022. DOI: https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2145758

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

JOSHI, S.; GOGATE, P. R.; MOREIRA JUNIOR, P. F.; GIUDICI, R. Intensification of biodiesel production from soybean oil and waste cooking oil in the presence of heterogeneous catalyst using high speed homogenizer. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 39, p. 645–653, 2017.DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.029

KARTAL, M. T.; TAŞKIN, D.; KILIÇ DEPREN, S. Dynamic relationship between green bonds, energy prices, geopolitical risk, and disaggregated level CO_2 emissions: evidence from the globe by novel WLMC approach. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 17, n. 8, p. 1763–1775, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11869-024-01544-z

KNOTHE, G. Some aspects of biodiesel oxidative stability. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 7, p. 669–677, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.005

LEUNG, D. Y. C.; WU, X.; LEUNG, M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, v. 87, n. 4, p. 1083–1095, 2010. DOI: doi:10.1016/j.apenergy.2009.10.006

LIN, Y.-C.; AMESHO, K. T. T.; CHEN, C.-E.; CHENG, P.-C.; CHOU, F.-C. A cleaner process for green biodiesel synthesis from waste cooking oil using recycled waste oyster shells as a sustainable base heterogeneous catalyst under the microwave heating system. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 17, p. 100310, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100310

MA, F.; HANNA, M. A. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**, v. 70, n. 1, p. 1–15, 1999. DOI: https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5

MA, Z.; XUE, R.; LI, J. S.; ZHAO, Y.; XUE, Q.; CHEN, Z.; et al. Use of thermally modified waste concrete powder for removal of Pb (II) from wastewater: Effects and mechanism. **Environmental Pollution**, v. 277, p. 116776, 2021.DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116776

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

MOHAN, D.; PITTMAN JUNIOR, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy & Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006. DOI: 10.1021/ef0502397

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011.

SILVA, Hildean Cosme da. **Avaliação da acidez do óleo residual no rendimento do biodiesel**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SINGH, M. M.; DABRAL, K. P.; ATRAY, N.; PATHAK, S. K.; KHAN, T. S. Comparative life cycle assessment of used cooking oil conversion to biodiesel using conventional and room temperature processes. **Carbon Management**, v. 16, n. 1, 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/17583004.2025.2564717

ZHANG, P.; XIAO, Y. The impact of economic policy uncertainty, renewable energy adoption, and eco-innovation on sectoral CO_2 emissions in the United States. **Energy Strategy Reviews**, v. 56, p. 101593, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101593.

ZHANG, Y.; DUBÉ, M. A.; MCKLEAN, D. D.; KATES, M. Biodiesel production from waste cooking oil: process design and technological assessment. **Bioresource Technology**, v. 89, n. 1, p. 1–16, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00040-3.

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BIODEGRADABILIDADE DE RESÍDUOS DE SOJA OZONIZADOS EM ph NEUTRO PARA APLICAÇÃO EM BIOGÁS

1 Mylena Kellyn de Paula Rosetti, 2 Laercio Mantovani Frare, 3 Helton José Alves, 4 Leandro S. Herculano, 5 Mairim Dahm da Silva, 6 Fabiana de Oliveira Ramos, 7 Getúlio Paulo Peixoto Igrejas, 8 Manuel Joaquim Sabença Feliciano.

1 Universidade Federal do Paraná-campus Palotina, e-mail: mylenarosetti@hotmail.com; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná-campus Medianeira, e-mail: laercio@utfpr.edu.br; 3 Universidade Federal do Paraná-campus Palotina, e-mail:helquimica@gmail.com;4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná-campus Medianeira, e-mail: herculano.utfpr@gmail.com; 5 Universidade Federal do Paraná-campus Palotina, e-mail: dahmdasilva@gmail.com; 6 Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca-Rio de Janeiro, e-mail: fabiana.ramos@aluno.cefet-rj.br; 7 Instituto Politécnico de Bragança - Portugal, e-mail: igrejas@ipb.pt; 8 Instituto Politécnico de Bragança - Portugal, e-mail: msabenca@ipb.pt.

Palavras-chave: Pré-tratamento; Lignina; Digestão anaeróbia.

Resumo

A crescente geração de resíduos lignocelulósicos provenientes da cultura da soja representa uma oportunidade para o aproveitamento energético via digestão anaeróbia, embora sua elevada recalcitrância estrutural limite a biodegradabilidade. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do pré-tratamento por ozonização, em pH neutro, sobre a modificação estrutural e o potencial de biodegradabilidade de resíduos de soja. O resíduo foi previamente seco, moído (≈2 mm) e submetido à ozonização em reator do tipo lavador de gases, com vazão de 0,5 L min^{-1}, durante 0; 0,5 e 1 h. Após o tratamento, foram realizadas análises físico-químicas (pH, °Brix, absorbância, sólidos) e da composição lignocelulósica (celulose, hemicelulose e lignina), além do cálculo do índice estrutural de biodegradabilidade (IB). Os resultados indicaram redução progressiva do pH (6,07 para 5,53), associada à formação de compostos oxidativos. Observou-se aumento dos sólidos soluveis (3,2 para 4,3%) e da absorbância (0,093 para 0,930), evidenciando a solubilização da matéria orgânica. A lignina apresentou redução de aproximadamente 27% após 0,5 h, refletindo a seletividade do ozônio na degradação de estruturas aromáticas. Como consequência, o IB aumentou de 0,63 para 1,07, indicando maior disponibilidade de frações biodegradáveis. No entanto, o tempo de 1 h não resultou em ganhos adicionais, sugerindo ocorrência de reações secundárias. Conclui-se que a ozonização é uma estratégia eficiente para a modificação estrutural de resíduos lignocelulósicos, sendo o tempo de 0,5 h o mais adequado para maximizar a biodegradabilidade, com potencial aplicação na intensificação da produção de biogás.

Introdução

A crescente geração de resíduos lignocelulósicos provenientes da atividade agrícola representa um desafio ambiental crítico, consolidando-se, simultaneamente, como uma oportunidade estratégica para a matriz energética sustentável (Almomani et al., 2017; Shah et al., 2025). No cenário do agronegócio global, a soja (Glycine max) destaca-se como uma das commodities mais relevantes. O Brasil, como principal produtor mundial, apresenta uma produção anual que oscila entre 150 e 170 milhões de toneladas, ocupando uma área plantada superior a 44 milhões de hectares (CONAB, 2024; EMBRAPA, 2024).

Contudo, a magnitude desta cadeia produtiva acarreta a geração de passivos volumétricos expressivos, compostos majoritariamente por palha, vagens e restos culturais. Estima-se que a massa desses resíduos seja equivalente à massa de grãos colhidos, resultando em milhões de toneladas de biomassa subutilizada anualmente. Embora parte desse material seja essencial para a ciclagem de nutrientes no solo, o excedente frequentemente configura um passivo ambiental caso não existam rotas tecnológicas adequadas para sua valorização energética (Almomani et al., 2017; Poddar et al., 2022).

Estruturalmente, a biomassa lignocelulósica é composta por uma matriz complexa de três biopolímeros principais: celulose, hemicelulose e lignina. A celulose, um homopolímero linear de unidades deβ-D-glicose unidas por ligações β-(1→4) glicosídicas, organiza-se em microfibrilas de alta cristalinidade, o que limita severamente a acessibilidade enzimática. A hemicelulose atua como uma matriz amorfa e heterogênea de pentoses e hexoses (xilose, arabinose, manose e glicose), apresentando maior susceptibilidade à hidrólise. Por fim, a lignina, um polímero aromático tridimensional composto por unidades de fenilpropano (álcoois p-cumarílico, coniferílico e sinapílico), confere rigidez, hidrofobicidade e proteção contra a degradação microbiana. Esta arquitetura supramolecular cria uma barreira físico-química, conhecida como recalcitrância, que restringe a biodegradabilidade da biomassa (Taherzadeh e Karimi, 2008; Poddar et al., 2022).

Para a conversão energética desse material, a digestão anaeróbia destaca-se como uma rota biotecnológica consolidada. Trata-se de um processo metabólico complexo, mediado por consórcios microbianos na ausência de oxigênio livre, que ocorre em quatro etapas sequenciais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O produto final é o biogás, uma mistura gasosa composta majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), com elevado valor calorífico. Entretanto, a eficiência global do processo é limitada pela etapa inicial de hidrólise, onde a complexidade da matriz lignocelulósica impede que as enzimas extracelulares degradem os polímeros em monômeros fermentescíveis, resultando em baixos rendimentos específicos de metano (Gosławski et al., 2025; Shah et al., 2025).

Diante dessas limitações, diferentes estratégias de pré-tratamento têm sido investigadas com o objetivo de modificar a estrutura da biomassa lignocelulósica, promovendo a ruptura da matriz lignina-carboidrato, redução da cristalinidade e aumento da área superficial disponível para ataque enzimático (Poddar et al., 2022; Shah et al., 2025). Entre essas estratégias, a ozonização tem se destacado como uma tecnologia promissora, devido ao elevado potencial oxidativo do ozônio (E° = 2,07 V), capaz de reagir seletivamente com compostos aromáticos e ligações duplas presentes na lignina (Poddar et al., 2022).

O mecanismo de ação do ozônio envolve reações diretas com estruturas insaturadas, bem como a formação de espécies reativas secundárias, como radicais hidroxila (•OH), especialmente em meio aquoso. Essas reações promovem a clivagem de ligações C=C e C–O–C, resultando na fragmentação da lignina e na formação de compostos de menor massa molar, mais solúveis e potencialmente biodegradáveis (Travaini et al., 2016; Lima et al., 2021). Como consequência, ocorre maior exposição das frações de celulose e hemicelulose, favorecendo a etapa de hidrólise e, subsequentemente, aumentando o potencial de produção de biogás. Entre as principais vantagens da ozonização destacam-se a ausência de geração significativa de resíduos tóxicos, a operação em condições moderadas de temperatura e pressão e a elevada seletividade para degradação da lignina, o que reduz a formação de inibidores em comparação com pré-tratamentos termoquímicos severos.

Por outro lado, algumas limitações devem ser consideradas, como o elevado consumo energético associado à geração de ozônio, a baixa solubilidade do gás em meio aquoso, que pode limitar a eficiência de transferência de massa, e a necessidade de controle rigoroso das condições operacionais (pH, tempo de contato e dose de ozônio) para evitar a mineralização excessiva da matéria orgânica ou a degradação de frações fermentescíveis (Travaini et al., 2016; Shah et al., 2025).

Nesse contexto, a avaliação das alterações estruturais promovidas pela ozonização torna-se fundamental para compreender seu impacto na digestão anaeróbia e na produção de biogás (Ai et al., 2019). Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito do tempo de ozonização em pH neutro sobre a composição lignocelulósica de resíduos de soja e estimar o potencial de biodegradabilidade da biomassa a partir das alterações observadas nas frações estruturais.

Material e Métodos

A biomassa lignocelulósica utilizada neste estudo foi obtida a partir de resíduos agrícolas provenientes da colheita de soja. Inicialmente, o material foi submetido à secagem em estufa com circulação de ar a 60 °C até atingir massa constante, visando a remoção da umidade e a padronização das condições iniciais do substrato. Posteriormente, com o objetivo de reduzir a recalcitrância estrutural e aumentar a área superficial específica disponível para o pré-tratamento, o resíduo foi submetido à cominuição em moinho de facas, até atingir granulometria média de aproximadamente 2 mm. Após o processamento, a biomassa foi acondicionada em recipientes herméticos, protegida da luz e da umidade, até a realização dos ensaios experimentais.

As unidades experimentais foram constituídas por suspensões contendo 40 g de resíduo de soja em 200 mL de água destilada, estabelecendo uma relação sólido-líquido de 1:5 (m/v). O pH inicial da suspensão foi medido e ajustado para 7,0, caracterizando condições neutras.

A mistura foi transferida para um reator de contato gás-líquido do tipo lavador de gases (*gas scrubber*), operado sob agitação mecânica constante, com a finalidade de intensificar os fenômenos de transferência de massa na interface gás-líquido. O ozônio foi gerado por descarga corona, utilizando oxigênio como gás de alimentação, e introduzido na base do reator a uma vazão constante de 0,5 L min^{-1}.O delineamento experimental consistiu em três tempos de exposição ao ozônio: 0 h (controle), 0,5 h e 1 h, todos conduzidos em triplicata. O esquema do sistema experimental empregado é apresentado na Figura 01.

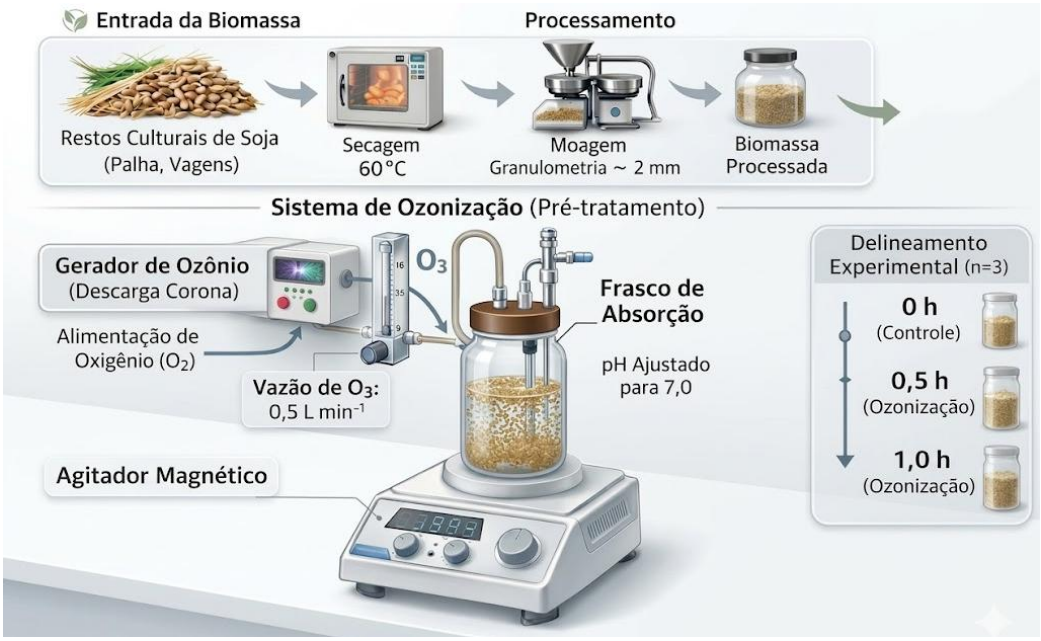


Figura 01: Representação esquemática do processo integrado de pré-tratamento por ozonização de biomassa lignocelulósica.
Fonte: O autor (2026)

Após o pré-tratamento, as amostras foram submetidas à caracterização físico-química, conforme os parâmetros e métodos analíticos descritos na Tabela 01. As frações estruturais de celulose, hemicelulose e lignina foram determinadas pelo método de detergentes de Van Soest.

Parâmetro	Método Analítico	Referência
Potencial hidrogeniônico	4500 H+	APHA (2012)
Sólidos totais, voláteis e fixos	2540, 2540-B, 2540-E	APHA (2012)
Lignina, celulose e hemicelulose	Van Soest	Robertson & Van Soest (1981)

Tabela 01: Caracterização físico-química do substrato de resíduo.
Fonte: O autor (2026)

Com o intuito de avaliar indiretamente o potencial de biodegradabilidade da biomassa após o pré-tratamento, foi empregado um índice estrutural de biodegradabilidade (IB), baseado na razão entre as frações potencialmente biodegradáveis (celulose e hemicelulose) e a fração lignina, reconhecida como principal componente recalcitrante à digestão anaeróbia (Hendriks; Zeeman, 2009). O índice foi calculado conforme a Equação (01):

$$IB = \frac{\text{Celulose (\%)} + \text{Hemicelulose (\%)}}{\text{Lignina (\%)}} \quad (01)$$

Onde: IB = índice de biodegradabilidade e celulose, hemicelulose e lignina são expressas em porcentagem (%).

Resultados e Discussão

A Tabela 02 apresenta os resultados da caracterização físico-química do resíduo de soja submetido ao pré-tratamento por ozonização em pH neutro (pH 7), para diferentes tempos de exposição (0; 0,5 e 1 h).

Parâmetro	0 h	0,5 h	1 h
pH	6,07	5,80	5,53
Brix (%)	3,2	4,3	4,1
Absorbância (900 nm)	0,093	0,864	0,93
SV (%)	89,1	89,9	89,1
SF (%)	10,9	10,1	10,9

Tabela 02: Caracterização físico-química do resíduo de soja submetido à ozonização
Fonte: O autor (2026)

Observa-se na Tabela 02 uma redução progressiva do pH com o aumento do tempo de ozonização, passando de 6,07 para 5,53 após 1 h de tratamento. Esse comportamento indica a formação de compostos intermediários de caráter ácido, tais como ácidos orgânicos de baixa massa molar, provenientes da oxidação parcial da matéria orgânica. Esse fenômeno é característico de processos envolvendo ozônio, que pode atuar tanto por via direta, reagindo com ligações duplas e estruturas aromáticas, quanto por via indireta, por meio da geração de espécies reativas, como radicais hidroxila (•OH), especialmente em meio aquoso (Beltrán, 2004; Travaini et al., 2016; Poddar et al., 2022).

A maior redução de pH observada em 1 h indica acúmulo progressivo desses subprodutos oxidativos, refletindo a intensificação das reações de oxidação. Do ponto de vista químico, a degradação da lignina e de frações da hemicelulose resulta na formação de compostos oxigenados, como aldeídos, cetonas e, principalmente, ácidos orgânicos (acético, fórmico e oxálico), responsáveis pela acidificação do meio.

Sob a perspectiva da digestão anaeróbia, esse efeito apresenta caráter dual: em níveis moderados, esses compostos podem atuar como intermediários metabólicos favoráveis às etapas iniciais (acidogênese e acetogênese); entretanto, seu acúmulo excessivo pode reduzir o pH a níveis inibitórios para arqueias metanogênicas, cuja faixa ótima situa-se entre 6,5 e 7,5 (Hendriks; Zeeman, 2009; Carrere et al., 2016; Poddar et al., 2022).

O teor de sólidos solúveis (°Brix) aumentou de 3,2 para 4,3% após 0,5 h, indicando significativa solubilização de compostos orgânicos previamente associados à matriz lignocelulósica. Esse comportamento está relacionado à ruptura de ligações lignina-carboidrato e à liberação de oligossacarídeos e compostos solúveis (Sun; Cheng, 2002; Hendriks; Zeeman, 2009). Entretanto, após 1 h, observa-se leve redução (4,1%), sugerindo que os compostos solubilizados passam a sofrer degradação adicional, sendo convertidos em moléculas de menor massa molar ou altamente oxidadas. Esse comportamento é corroborado pelo aumento contínuo da absorbância (0,093 para 0,930), indicando maior presença de compostos dissolvidos com características cromóforas.

A divergência entre os perfis de °Brix e absorbância evidencia que, embora a concentração total de sólidos solúveis atinja um máximo em 0,5 h, a composição química desses compostos continua evoluindo ao longo do tempo. O aumento da absorbância sugere a formação de compostos aromáticos oxidados, como fenóis e quinonas, derivados da degradação da lignina, que apresentam maior capacidade de absorção óptica (Travaini et al., 2016; Gosławski et al., 2025).

Do ponto de vista da digestão anaeróbia, essa mudança qualitativa é relevante, uma vez que compostos solúveis de natureza carboidrática favorecem a biodegradabilidade, enquanto estruturas fenólicas podem apresentar efeitos inibitórios dependendo de sua concentração.

Os teores de sólidos voláteis permaneceram praticamente constantes ao longo do tratamento, indicando ausência de mineralização significativa da matéria orgânica. Esse resultado demonstra que a ozonização atuou predominantemente na modificação estrutural da biomassa, sem perdas relevantes de carbono orgânico total, o que é desejável para aplicações em biogás (Carrere et al., 2016; Gosławski et al., 2025).

A análise da composição lignocelulósica (Figura 02) evidencia uma redução expressiva do teor de lignina após 0,5 h de ozonização (≈27%), confirmando a elevada seletividade do ozônio na degradação desse polímero. A lignina apresenta alta densidade de estruturas aromáticas e ligações insaturadas, que são preferencialmente atacadas pelo ozônio por meio de reações de ozonólise, resultando na sua despolimerização e na ruptura das ligações lignina-carboidrato (Kumar et al., 2009; Travaini et al., 2016; Poddar et al., 2022).

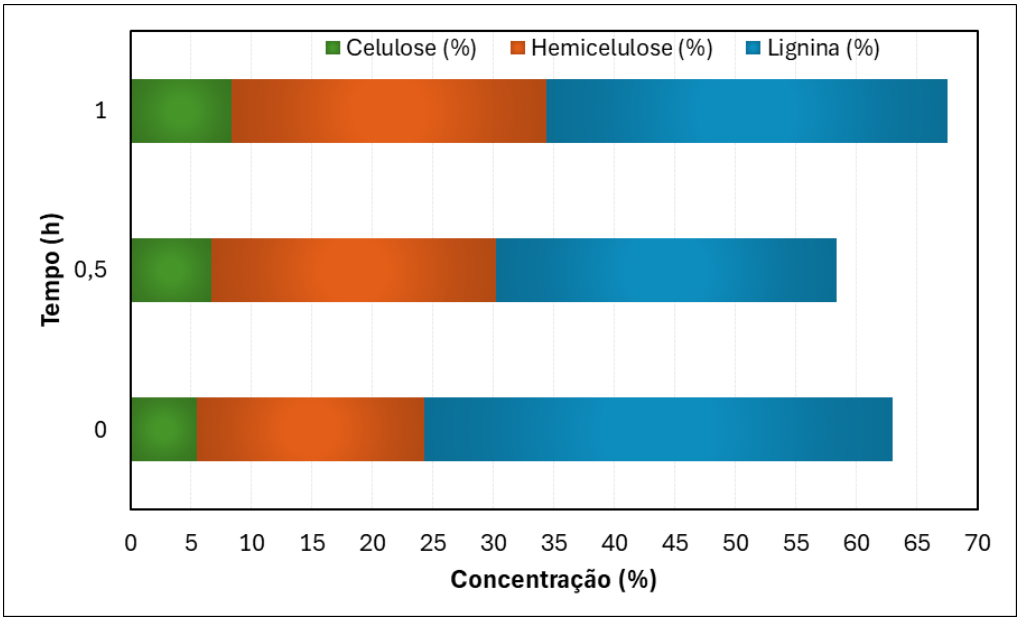


Figura 02: Composição da matriz lignocelulósica após ozonização
Fonte: O autor (2026)

Como consequência, ocorre a exposição das frações de celulose e hemicelulose, aumentando sua acessibilidade à degradação biológica. Essa modificação estrutural é fundamental para a melhoria da biodegradabilidade, uma vez que a lignina atua como principal barreira física e química à digestão anaeróbia (Hendriks; Zeeman, 2009; Poddar et al., 2022).

Entretanto, após 1 h, observa-se um comportamento não linear, com aumento aparente do teor de lignina. Esse efeito pode ser atribuído à formação de compostos pseudo-lignina, resultantes da recombinação de intermediários fenólicos, bem como à limitação do método analítico (Van Soest), que pode quantificar esses compostos como lignina. Esse fenômeno indica a ocorrência de reações secundárias em tempos prolongados de ozonização.

A integração desses resultados com o índice estrutural de biodegradabilidade (IB) (Tabela 03) evidencia de forma clara o impacto do pré-tratamento na reatividade da biomassa.

Tempo (h)	IB
0	0,63
0,5	1,07
1	1,04

Tabela 03: Índice de biodegradabilidade da biomassa
Fonte: O autor (2026)

O aumento do IB de 0,63 para 1,07 após 0,5 h confirma que a redução da lignina e o aumento relativo das frações de celulose e hemicelulose resultam em maior disponibilidade de substratos biodegradáveis. Esse índice reflete diretamente a melhoria da acessibilidade da biomassa aos microrganismos anaeróbios. Além disso, o aumento da fração solúvel (°Brix) reforça esse efeito, indicando que a ozonização atua de forma sinérgica, promovendo tanto a desestruturação da matriz sólida quanto a liberação de compostos prontamente assimiláveis.

Por outro lado, embora o IB permaneça elevado em 1 h (1,04), não há ganho adicional significativo, mesmo com a intensificação das reações oxidativas. Esse comportamento indica que a oxidação prolongada não resulta em melhorias

proporcionais na biodegradabilidade, sendo limitada por reações secundárias, como formação de compostos recalcitrantes ou potencialmente inibitórios (Travaini et al., 2016; Kim et al., 2016;Shah et al., 2025).

De forma integrada, os resultados indicam que o processo de ozonização apresenta duas etapas distintas: (i) uma fase inicial (até 0,5 h), caracterizada pela degradação seletiva da lignina e aumento da acessibilidade da biomassa e (ii) uma fase subsequente, dominada por reações secundárias de oxidação, com menor contribuição para a biodegradabilidade.

Do ponto de vista aplicado, o aumento do IB está diretamente associado ao potencial de intensificação da digestão anaeróbia, especialmente nas etapas hidrolítica e acidogênica, podendo resultar em maior taxa de produção de biogás. No entanto, a ausência de ganhos adicionais em tempos mais longos indica que o prolongamento da ozonização pode não ser energeticamente justificável, além de potencialmente gerar compostos que impactam negativamente a atividade microbiana.

Portanto, os resultados demonstram que o tempo de 0,5 h representa a condição ótima de pré-tratamento, maximizando a remoção de lignina, a solubilização da matéria orgânica e o índice de biodegradabilidade, sem induzir efeitos adversos associados à superoxidação. Esses achados reforçam a importância da otimização do tempo de ozonização como parâmetro crítico para a viabilidade técnica e energética do processo.

Comentários finais

Os resultados obtidos demonstram que o pré-tratamento por ozonização em pH neutro promoveu alterações estruturais significativas na biomassa lignocelulósica de resíduos de soja, com impacto direto sobre seu potencial de biodegradabilidade. A aplicação do ozônio por 0,5 h resultou em redução expressiva do teor de lignina (≈27%), acompanhada pelo aumento do índice estrutural de biodegradabilidade (IB) de 0,63 para 1,07, evidenciando a efetiva desestruturação da matriz lignocelulósica e maior disponibilidade de frações fermentescíveis.

Adicionalmente, o aumento do teor de sólidos solúveis e da absorbância indica que o processo promoveu não apenas a modificação estrutural da fase sólida, mas também a liberação de compostos orgânicos potencialmente assimiláveis pelos microrganismos anaeróbios. A estabilidade dos teores de sólidos voláteis reforça que não houve perdas significativas de matéria orgânica, preservando o potencial energético do substrato.

Por outro lado, o aumento do tempo de ozonização para 1 h não resultou em melhorias adicionais no índice de biodegradabilidade, apesar da intensificação das reações oxidativas, evidenciada pela redução do pH e aumento da absorbância. Esse comportamento indica a ocorrência de reações secundárias, como a formação de compostos lignina-like e subprodutos altamente oxidados, que podem limitar os ganhos em biodegradabilidade e potencialmente impactar a atividade microbiana.

Dessa forma, os resultados evidenciam a existência de um tempo ótimo de pré-tratamento, sendo o intervalo de 0,5 h o mais eficiente para maximizar a remoção de lignina, a solubilização da matéria orgânica e o aumento da biodegradabilidade, sem induzir efeitos adversos associados à superoxidação.

Sob a perspectiva aplicada, a ozonização se apresenta como uma estratégia promissora para o pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos visando a produção de biogás, desde que operada sob condições controladas. A otimização do tempo de exposição ao ozônio destaca-se como um parâmetro crítico para garantir a eficiência técnica e energética do processo.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) para validação experimental do ganho de biodegradabilidade observado, bem como a avaliação da cinética de produção de biogás e da estabilidade do processo anaeróbio frente aos subprodutos gerados pela ozonização. Adicionalmente, estudos envolvendo diferentes condições operacionais, como variação de pH, dosagem de ozônio e relação sólido-líquido, podem contribuir para a otimização do processo. Por fim, a análise da viabilidade energética e econômica do pré-tratamento, considerando o consumo específico de ozônio e o incremento na produção de metano, é essencial para a aplicação em escala real.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Paraná (UFPR), Campus Palotina, pelo suporte acadêmico e institucional no desenvolvimento deste trabalho. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Medianeira, pela disponibilização da infraestrutura laboratorial necessária à execução dos experimentos.

Agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche no exterior (SWE), vinculada ao processo nº 200958/2025-9, no âmbito da Chamada Pública nº 16/2024.

Adicionalmente, os autores agradecem ao Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (Labmater) e ao Laboratório de Desenvolvimento e Produção de Materiais Didáticos (LAPRO-MAD) pelo apoio ao desenvolvimento das atividades relacionadas a este estudo.

Referências Bibliográficas

AI, P.; ZHANG, X.; DINAMARCA, C.; ELSAYED, M.; YU, L.; XI, J.; MEI, Z. Different effects of ozone and aqueous ammonia in a combined pretreatment method on rice straw and dairy manure fiber for enhancing biomethane production. *Bioresource Technology*, v. 282, p. 275-284, 2019..

ALMOMANI, F.; SHAWAQFAH, M.; BHOSALE, R. R.; KUMAR, A.; KHRAISHEH, M. A. M. Intermediate ozonation to enhance biogas production in batch and continuous systems using animal dung and agricultural waste. International *Biodeterioration & Biodegradation*, v. 119, p. 176-187, 2017.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boletim da safra de grãos 2023/2024. Brasília: Conab, 2024. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos. Acesso em: 12 mar. 2026.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Soja em números (safra 2023/2024). Londrina: Embrapa Soja, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 12 mar. 2026.

GOSŁAWSKI, S.; PIELECH-PRZYBYLSKA, K.; JASTRZĄBEK, K.; DOMAŃSKI, J. Ozonolysis and enzymatic pretreatment of fallen Norway *maple (Acer platanoides L.*) leaves for anaerobic digestion. Energies, v. 18, n. 18, p.4963, 2025.

LIMA, D. R. S.; PARANHOS, A. G. O.; ADARME, O. F. H.; BAÊTA, B. E. L.; GURGEL, L. V. A.; SANTOS, A. S.; SILVA, S. Q.; AQUINO, S. F. Integrated production of second-generation ethanol and biogas from sugarcane bagasse pretreated with ozone. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 12, p. 809-825, 2021.

PODDAR, B. J.; NAKHATE, S. P.; GUPTA, R. K.; CHAVAN, A. R.; SINGH, A. K.; KHARDENAVIS, A. A.; PUROHIT, H. J. A comprehensive review on the pretreatment of lignocellulosic wastes for improved biogas production by anaerobic digestion. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 19, p. 3429-3456, 2022.

SHAH, V.; PATEL, M.; PATEL, D.; PATEL, N.; PRAJAPATI, P. Unlocking biogas potential: a comprehensive study on pretreatment techniques of organic substrate for enhanced anaerobic digestion. *Energy*, v. 335, p. 138244, 2025.

TAHERZADEH, M. J.; KARIMI, K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 9, p. 1621-1651, 2008.

TRAVAINI, R.; MARTÍN-JUÁREZ, J.; LORENZO-HERNANDO, A.; BOLADO-RODRÍGUEZ, S. Ozonolysis: an advantageous pretreatment for lignocellulosic biomass revisited. *Bioresource Technology*, v. 199, p. 2-12, 2016.

ESTRATÉGIAS EMERGENTES DE PRÉ-TRATAMENTO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA PARA BIOCOMBUSTÍVEIS

1 Nayara Fernanda Ferraz da Silva Cruz, 2 Lais Fernanda Juchem do Nascimento, 3 Thompson Ricardo Weiser Meier, 4 Dilcemara Cristina Zenatti, 5 Paulo André Cremonez, 6 Joel Gustavo Teleken

1Universidade Federal do Paraná - UFPR, nayara.cruz@ufpr.br; 2UFPR, laisjuchem@ufpr.br; 3UFPR, thompson@ufpr.br; 4UFPR, dil.zenatti@ufpr.br; 5Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, paulocremonez@utfpr.edu.br; 6UFPR, joel.teleken@ufpr.br

Palavras-chave: Lignina; Fracionamento de biomassa; Biorrefinarias.

Resumo

A biomassa lignocelulósica é abundante e renovável, com potencial para a produção de biocombustíveis por diversas rotas tecnológicas. No entanto, sua estrutura físico-química recalcitrante exige processos de despolimerização para a liberação de açúcares fermentescíveis em processos biológicos. Nesse contexto, diferentes estratégias de pré-tratamentos físicos, químicos e biológicos são aplicados para aumentar a eficiência da conversão da biomassa em bioenergia. O estudo analítico com buscas na plataforma *ScienceDirect*, resultou em 58 artigos de pesquisas publicados nos últimos dois anos com a aplicação de pré-tratamento de biomassas lignocelulósicas para biocombustíveis. Foram identificados 46 tipos de biomassa, agrupados em oito categorias, com predominância de resíduos agrícolas e florestais (≈55%), associados principalmente às rotas de produção de bioetanol e biometano. Abordagens químicas e físico-químicas, com destaque para experimentos alcalinos, ácidos e hidrotérmicos foram os métodos com maior frequência. Verificou-se ainda uma tendência de aplicação combinada de métodos, com média de 1,58 técnicas por estudo, e à adoção de estudos de otimização de parâmetros operacionais como concentração de reagentes, relação sólido/líquido, temperatura e tempo de reação por meio de planejamentos experimentais e modelagens estatísticas. A avaliação da eficácia dos pré-tratamentos foi realizada por meio dos aspectos físicos e químicos da biomassa, incluindo Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Difração de Raios X (DRX) e Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC). Ainda, foram aplicados protocolos padronizados, como os ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), para avaliar o desempenho energético das biomassas após o pré-tratamento. Esses resultados, aliados às análises estruturais e composicionais, são fundamentais para o entendimento do fracionamento da biomassa, considerado um fator-chave para o desenvolvimento de biorrefinarias sustentáveis, nas quais se busca a utilização integral da matéria-prima para a produção de biocombustíveis e múltiplos produtos de valor agregado.

Introdução

A crescente demanda por energia, associada à necessidade de mitigar os impactos ambientais, decorrentes, entre eles, da queima de combustíveis fósseis, tem impulsionado a busca por fontes renováveis e sustentáveis. O suprimento global de energia oriundo de fontes fósseis, nas duas últimas décadas com cerca de 80% de participação, tem projeções de declínio antes de 2030 (IEA, 2023). Neste cenário, a biomassa se destaca como uma alternativa que contribui na transição energética, principalmente devido a sua disponibilidade e capacidade de gerar bioenergia por diversas rotas.

Dentre os recursos orgânicos disponíveis, a biomassa lignocelulósica se destaca por ser a mais abundante (Qu *et al*., 2021; Xia *et al*., 2024). Diversos estudos têm explorado seu potencial como matéria-prima para a produção de biocombustíveis, incluindo bioetanol, biogás, biometano, biodiesel e biohidrogênio em biorrefinarias. As biomassas investigadas são, em sua maioria, provenientes de resíduos gerados por atividades agrícolas, florestais, industriais e agroalimentares que frequentemente se tornam um desafio de gestão econômica e ambiental para os empreendimentos, devido ao alto volume gerado. Entretanto, esses materiais representam uma alternativa favorável para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a conversão energética.

Contudo, a biomassa lignocelulósica apresenta comportamento recalcitrante devido à composição química e à estrutura física da parece celular vegetal constituída de celulose, hemicelulose e lignina (Kassaye; Pant; Jain, 2016) formando uma matriz lignocelulósica que dificulta o acesso de enzimas e reagentes. Essa barreira constitui o principal obstáculo à sacarificação eficiente (Xie *et al*., 2024). Dessa forma, é necessário a realização de pré-tratamentos capazes de romper a estrutura celular vegetal e tornar os componentes acessíveis à conversão. O pré-tratamento é uma das etapas mais onerosas desse processo, no entanto também é o processo mais promissor para maximizar a eficiência de conversão e reduzir custos (Amin *et al*., 2017). Entre os métodos comuns de pré-tratamento de lignocelulósicos estão os métodos físicos, químicos, físico-químicos, biológicos (Hendriks; Zeeman, 2009) e suas combinações. A escolha do método ideal depende de vários fatores, entre eles, da composição da biomassa, do produto final desejado e das condições técnico-econômicas do processo.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo a análise de pesquisas experimentais publicadas no ano de 2024 e 2025 com aplicações de pré-tratamento em biomassas lignocelulósicas para fins energéticos, evidenciando as variedades de biomassas e métodos avaliados, bem as rotas de conversão e estratégias de avaliação de pré-tratamentos. Além disso, o artigo aborda as tendências tecnológicas que emergem nas pesquisas recentes com o intuito de contribuir para a valorização dos resíduos lignocelulósicos enquanto alternativa sustentável na composição da matriz energética.

Material e Métodos

Neste estudo analítico foram conduzidas pesquisas a partir do banco de dados da plataforma ScienceDirect. Para relacionar as informações científicas foi realizada a busca avançada de publicações na categoria "Research articles" e área temática de "Energy" utilizando o termo "lignocellulosic pretreatment" presente no "Title, Abstract or Keywords". Foram selecionadas as publicações dos anos de 2024 e 2025 a fim de elencar as metodologias usuais e evidenciar o cenário atual da pesquisa aplicada sobre o tema. As pesquisas selecionadas foram classificadas em: origem da biomassa, método de pré-tratamento, rotas de conversão energética e estratégias de avaliação de pré-tratamentos.

Resultados e Discussão

Os principais componentes químicos da biomassa incluem extrativos, hemicelulose, celulose, lignina e cinzas. Dentre esses, extrativos, hemicelulose e celulose são naturalmente degradáveis, enquanto a lignina apresenta comportamento recalcitrante, sendo o principal fator de resistência de degradação da biomassa. A associação estrutural da lignina com a hemicelulose e a celulose forma uma matriz complexa que dificulta o acesso de agentes químicos e enzimas aos polissacarídeos (Dhavaleswarapu; Hoysall; Srinivasaiah, 2025). Por outro lado, a celulose e as hemiceluloses constituem a principal fonte de açúcares fermentáveis, essenciais para a produção de biocombustíveis por rotas biológicas (Audibert *et al*., 2025).

O agrupamento das biomassas na origem pode refletir composições estruturais semelhantes e impactar diretamente na estratégia de pré-tratamento adotada. Com relação aos componentes da lignocelulose, por exemplo, Gao *et al*. (2015) avaliaram que a biomassa algal contém cerca de 15 a 25% de celulose, 10 a 20% de hemicelulose e menos que 5% de lignina, enquanto a biomassa lenhosa possui entre 40–55%, 10–30% e 15–25%, respectivamente (Isikgor; Becer, 2015). Essas diferenças estruturais influenciam diretamente a recalcitrância do material e, consequentemente, a escolha do pré-tratamento, uma vez que biomassas com maior teor de lignina demandam processos mais intensivos para sua remoção, enquanto biomassas com baixa lignificação tendem a requerer estratégias menos severas, focadas principalmente na solubilização de polissacarídeos e na otimização da conversão energética.

A aplicação da metodologia proposta resultou na identificação de 96 artigos científicos, dos quais 58 foram compatíveis para análise detalhada quanto ao pré-tratamento de biomassas lignocelulósicas para produção de biocombustíveis. Nesses estudos, foram avaliados experimentalmente 46 tipos distintos de biomassa, posteriormente organizados em oito categorias (Figura 01). Foram predominantes as aplicações envolvendo resíduos agrícolas (17 estudos) e florestais (15), seguidos por resíduos agroalimentares (9) e agroindustriais (7), indicando uma concentração das pesquisas em biomassas amplamente disponíveis.

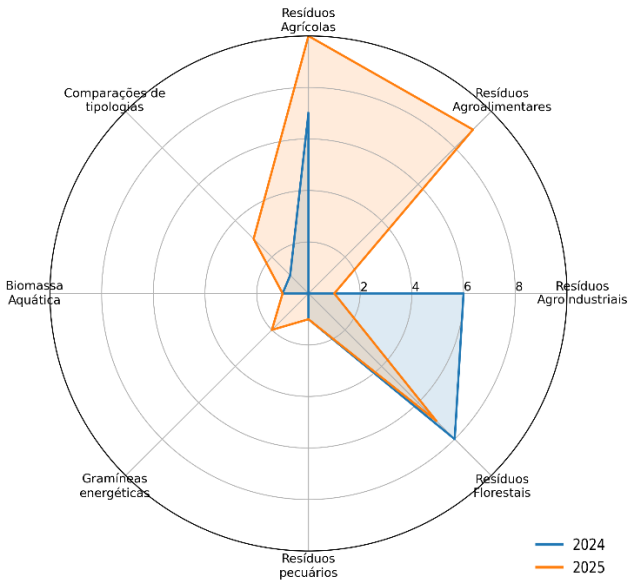


Figura 01: Pré-tratamento de lignocelulósicos para biocombustíveis por origem da biomassa.
Fonte: Os autores (2026)

Houve um crescimento de aproximadamente 41% no número de publicações sobre o tema, de 2024 para 2025, reforçando o interesse científico por fontes renováveis aplicadas à conversão energética. Além disso, as pesquisas envolvendo resíduos agrícolas e florestais, representaram cerca de 55% dos estudos avaliados. Esse padrão pode estar associado ao crescente interesse na produção de biocombustíveis de segunda geração a partir de biomassa lignocelulósica, uma vez que a produção a partir de culturas alimentares, atualmente a principal forma de produção, está relacionada à competição com a cadeia alimentar (Audibert *et al*., 2025). Nesse sentido, as pesquisas tem se direcionado para abordagens inovadoras de pré-tratamento para aumentar a eficiência e a sustentabilidade em biorrefinarias industriais (Song *et al*., 2025; Liang *et al*, 2025), principalmente no uso de matérias-primas não alimentares e composição estrutural relativamente padronizada.

Foram registradas 92 ocorrências de métodos de pré-tratamento distribuídas entre os 58 artigos analisados, correspondendo a 43 aplicações de métodos químicos, 29 físicos, 18 físico-químicos e 2 biológicos (Figura 02). A predominância de abordagens químicas e físico-químicas, reflete a busca por maior eficiência e celeridade na desestruturação da biomassa lignocelulósica.

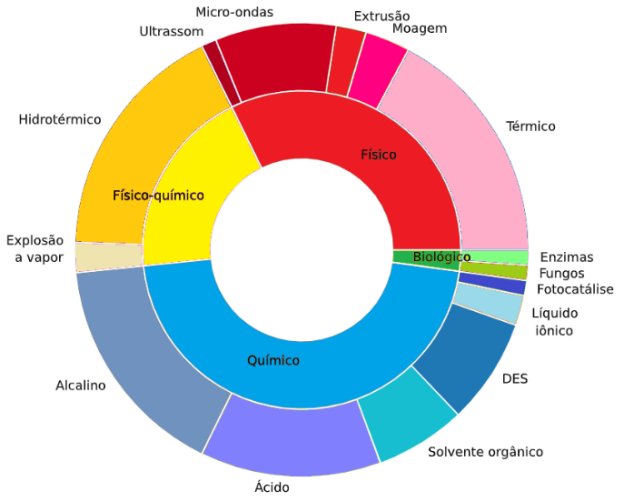


Figura 02: Métodos de pré-tratamento aplicados a biomassas lignocelulósicas.
Fonte: Os autores (2026)

Neste contexto, o pré-tratamento isolado pode apresentar limitações relevantes, como baixa eficiência na desestruturação da biomassa, maior tempo de processamento e elevado consumo energético, o que tem impulsionado o interesse por abordagens integradas e, consequentemente, mais complexas (Tan *et al*., 2025). Observou-se uma frequência média de combinação de métodos de aproximadamente 1,58 por artigo, corroborando a tendência da literatura em empregar estratégias combinadas para otimizar o desempenho do processo. De acordo com Martinez *et al.* (2022), a associação de diferentes técnicas potencializa a ruptura da estrutura lignocelulósica, reduz o tempo de processamento e melhora o rendimento ou a conversão energética da biomassa. Assim, diferentes tendências e estratégias puderam ser observadas nos métodos de pré-tratamento aplicados:

Métodos físicos

Os métodos físicos mais frequentes foram os tratamentos térmicos e micro-ondas com 16 e 07 aplicações respectivamente, frequentemente utilizados em combinação com reagentes químicos. No tratamento térmico convencional, os experimentos investigaram diferentes faixas de temperaturas (50 a 200°C) e tempos de exposição (5 a 180 min), conduzidos em estufas, banho marias ou reatores aquecidos, com o objetivo de avaliar o efeito do calor na desestruturação da biomassa. Já nos ensaios com micro-ondas, os parâmetros mais explorados foram o tempo de exposição, variando de 0,33 a 30 minutos e potências de 200 a 1000W, uma vez que seu uso desagrega a estrutura fibrosa, melhora a taxa de remoção da hemicelulose e apresenta baixo custo (Xia *et al*., 2024).

Entre as abordagens combinadas, destaca-se a aplicação da extrusão associada à impregnação alcalina com $Ca(OH)_2$ em palha de milho, que resultou em aproximadamente 14% de despolimerização dos componentes lignocelulósicos (celulose, hemicelulose e lignina), além de aumento de até 35% na produção de biometano, conforme reportado por Chevalier *et al*. (2025). Esses resultados indicam que a associação entre esforços mecânicos e agentes químicos pode promover maior ruptura estrutural da biomassa, superando limitações típicas dos métodos físicos isolados. Dessa forma, desvantagens do método físico, como a baixa remoção de lignina e o elevado consumo energético (Martinez *et al*., 2022) pode ser parcialmente mitigado por meio da integração de técnicas, tornando o processo mais eficiente e tecnicamente viável para aplicações em conversão energética.

Métodos químicos

As pesquisas que utilizaram métodos químicos isolados ou combinados a outros métodos, somaram cerca de 74% dos estudos. As principais aplicações investigaram reagentes alcalinos (15), ácidos (12), DES (7) e solventes orgânicos (6). É relatado a maior frequência de aplicação de métodos químicos devido à maior eficiência na conversão de carboidratos complexos em açúcares fermentescíveis em menor período de tempo (Binder; Raines, 2010), especialmente em combinação a métodos térmicos.

Nesse contexto, diferentes estratégias de pré-tratamento foram empregadas, no qual dentre a aplicação do método ácido destacou-se o emprego de HCl e H_2SO_4. Os tratamentos com ácidos diluídos são amplamente aplicados na hidrólise da celulose e da hemicelulose, favorecendo a liberação de açúcares fermentecíveis (Gao *et al*., 2015) e promovendo alterações estruturais na biomassa, embora possam elevar a formação de compostos inibitórios (Yu *et al*., 2018) como furfural a partir de pentoses e hidroximetilfurfural a partir de hexoses (Jamaldheen *et al*., 2022). O tratamento alcalino destaca-se como um dos métodos mais

utilizados para a deslignificação, promovendo a remoção parcial da lignina e aumentando a porosidade da biomassa (Mitra *et al*., 2025). Nas pesquisas avaliadas, as aplicações dos métodos alcalinos foram frequentes o emprego de NaOH e KOH. Os álcalis reagem seletivamente preservando os carboidratos, são comparativamente menos corrosivos e requerem condições de pré-tratamento mais suaves que os métodos ácidos (Kim; Lee; Kim, 2016).

Diante das limitações associadas aos pré-tratamentos convencionais com reagentes ácidos e alcalinos, como baixa seletividade e formação de compostos tóxicos, pesquisas recentes buscam o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, destacam-se os solventes orgânicos, que apresentam menor toxicidade em comparação aos métodos ácidos, e os solventes eutéticos profundos (DES), que vêm ganhando atenção devido à sua elevada biodegradabilidade e potencial de aplicação em processos mais seletivos e ambientalmente favoráveis (Chen *et al*., 2025). A utilização de solventes orgânicos fraciona simultaneamente os três componentes principais da biomassa, celulose, lignina e hemicelulose, de maneira eficientemente (Choi *et al*., 2019). Neste âmbito, foram relatados a utilização de glicerol, etilenoglicol, etanol, 1,4-butanodiol e polietilenoglicol, metanol, γ-valerolactona e carbonato de propileno. Uma das características do pré-tratamento com solventes orgânicos é a produção de inibidores de fermentação, ainda que em baixos teores, o que pode influenciar na bioconversão posterior dos substratos pré-tratados (Sun *et al*., 2015). Enquanto isso, os Solventes Eutéticos Profundos (DES) possuem baixo ponto de fusão, baixa volatilidade (Ma *et al*., 2025) e são considerados um alternativa mais sustentável. Nas pesquisas, foram avaliados a síntese de diversos DES como cloreto de colina e acetato de 1-etil-3-metilimidazólio combinados a glicerol e etilenoglicol e relatados benefícios como altos rendimento açúcares redutores, prevenção da degradação de polissacarídeos e melhor retenção de carboidratos (Chen *et al*., 2025).

Métodos físico-químicos

Os pré-tratamentos físico-químico são condições de processos que alteram a estrutura química da biomassa, dos quais os métodos hidrotérmicos e explosão a vapor obtiveram 16 e 02 aplicações respectivamente. Esses processos são considerados relativamente sustentáveis, destinados à extração de hemicelulose da biomassa lignocelulósica e à alteração da estrutura da celulose para processamento posterior (Shukla *et al*., 2023). No entanto, a maioria dos métodos físico-químicos foram combinados a reagentes químicos, o que, dependendo da severidade, pode requerer processos adicionais para adaptar a biomassa pré-tratada aos processos fermentativos.

O pré-tratamento hidrotérmico envolve a aplicação de alta temperatura e pressão à biomassa em um ambiente aquoso, levando à solubilização da hemicelulose, redistribuição da lignina e aumento da acessibilidade da celulose (Mamimin; O-Thong; Reungsang, 2024) enquanto o método de explosão a vapor envolve a adição de liberação repentina de pressão, causando expansão de vapor dentro do material lignocelulósico que resulta no desprendimento de fibras individuais pela interrupção da estrutura da parede celular e solubilização de hemicelulose e lignina (Singh; Suhag; Dhaka, 2015). Foram relatadas as variações de temperatura de 160 a 207 °C e tempo de 5 a 20 minutos nas aplicações de explosão a vapor. E os experimentos com os métodos hidrotérmicos foram realizados nas faixas de temperatura de 35 a 220°C, sob pressão de até 5 bar e reações de 10 minutos até 72 h. Subprodutos como furfural e 5-hidroximetilfurfural podem ser gerados a partir de açúcares solúveis durante o pré-tratamento com esses métodos, potencialmente inibindo a digestão anaeróbia (Wang *et al*., 2024; Zhou *et al*., 2023), principalmente em condições de altas temperatura, longos tempos de tratamento e alta concentração de reagentes adicionados.

Métodos biológicos

Os pré-tratamentos biológicos aplicados a lignocelulósicos baseiam-se principalmente no uso de microrganismos, fungos e enzimas capazes de degradar os componentes estruturais da parede celular vegetal. Os fungos e as bactérias produzem enzimas específicas para a degradação dos biopolímeros naturais (Sharma; Xu; Qin, 2019) atuando principalmente por meio da secreção extracelular de enzimas hidrolíticas, como as hidrolases, que degradam celulose e hemicelulose, e de enzimas ligninolíticas, responsáveis pela despolimerização da lignina (Pérez *et al*., 2002). No método enzimático, são adicionadas enzimas específicas, como proteases, lacases e peroxidases, em reatores anaeróbios para acelerar a etapa de hidrólise dos substratos, que apesar da seletividade para degradar determinadas biomassas, estudos vêm sendo realizados para determinar a eficiência do método por meio da adição de outros pré-tratamentos (Martinez *et al*., 2022).

A menor representatividade de aplicações biológicas nos estudos analisados pode estar relacionada às limitações importantes do método, como a lentidão do processo (Sharma; Xu; Qin, 2019), principalmente direcionados à aplicações em biorrefinarias que demandam de processos eficientes. No entanto, quando estrategicamente combinado à abordagens físico-químicas, os métodos biológicos podem obter resultados favoráveis, como relatado por Tan *et al*. (2025) com pré-tratamento inspirado no sistema digestivo de cupins, reconhecidos pela eficiência na degradação da lignocelulose. Nesse contexto, os autores propuseram a combinação de lacase com moagem em moinho de bolas para o tratamento da palha de trigo, estratégia que simula a ação mecânica e enzimática observada nos insetos. Esse tipo de abordagem integrativa entre processos biológicos e físicos pode representar um caminho viável para superar limitações individuais dos métodos e aumentar a eficiência do pré-tratamento.

Estratégias de avaliação de pré-tratamentos e rotas de conversão

A avaliação comparativa de pré-tratamentos aplicados a biomassas lignocelulósicas é complexa, uma vez que depende de múltiplas variáveis, como composição química e estrutural, tipo de método empregado, condições operacionais e rota de conversão energética adotada. Nesse contexto, parâmetros operacionais como concentração de reagentes, relação sólido/líquido, temperatura e tempo de reação são determinantes para eficácia do processo (Tan *et al*., 2025), sendo frequentemente otimizados

por meio de planejamentos experimentais e modelagens estatísticas, como superfícies de resposta, que permitem identificar condições ótimas de operação e maximizar a eficiência da conversão (Liang *et al*., 2025; Audibert *et al*., 2025).

Dessa forma, a análise da eficiência dos pré-tratamentos deve ser conduzida de maneira integrada, considerando parâmetros físicos, químicos e energéticos da biomassa, tanto na forma bruta quanto após o tratamento. Para garantir a padronização das amostras e reduzir a variabilidade experimental, é comum a aplicação prévia de métodos físicos de preparo, como secagem e moagem, com o objetivo de reduzir a umidade e o tamanho das partículas, geralmente para granulometrias próximas a 1 mm. Esse pré-processamento promove aumento da área superficial, melhora o contato entre a biomassa e os agentes de tratamento e contribui para maior reprodutibilidade dos resultados.

Paralelamente, a literatura destaca que a composição da biomassa, especialmente os teores de celulose, hemicelulose e lignina, é um dos principais fatores que influenciam na eficiência do pré-tratamento (Liang *et al*., 2025; Dhavaleswarapu; Hoysall; Srinivasaiah, 2025). Nesse sentido, os estudos analisados utilizam abordagens físicas e químicas para caracterizar as mudanças promovidas pelos pré-tratamentos. A avaliação das propriedades físicas da biomassa incluíram a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que demonstra alteração na microestrutura da superfície das amostras, a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para análise de mudanças de ligações químicas e grupos funcionais (Liang *et al*., 2025), além de técnicas como a Difração de Raios X (DRX) utilizada para avaliar a cristalinidade da celulose (Chen *et al*., 2025). E as análises das composições químicas envolveram principalmente a identificação de monossacarídeos e compostos inibidores por técnicas cromatográficas, como Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) (Pipereau *et al*., 2025).

Entretanto, a caracterização estrutural e composicional da biomassa não é suficiente para determinar a eficiência do pré-tratamento na produção de biocombustíveis, sendo necessária a avaliação do desempenho da biomassa tratada em etapas subsequentes de conversão energética. Nesse contexto, a produção dos biocombustíveis constitui um critério fundamental para validação dos pré-tratamentos aplicados. Nos estudos analisados, a produção de bioetanol e biometano apresentaram maior número de experimentos, estando predominantemente associadas ao uso de biomassas agrícolas e agroflorestais (Figura 03).

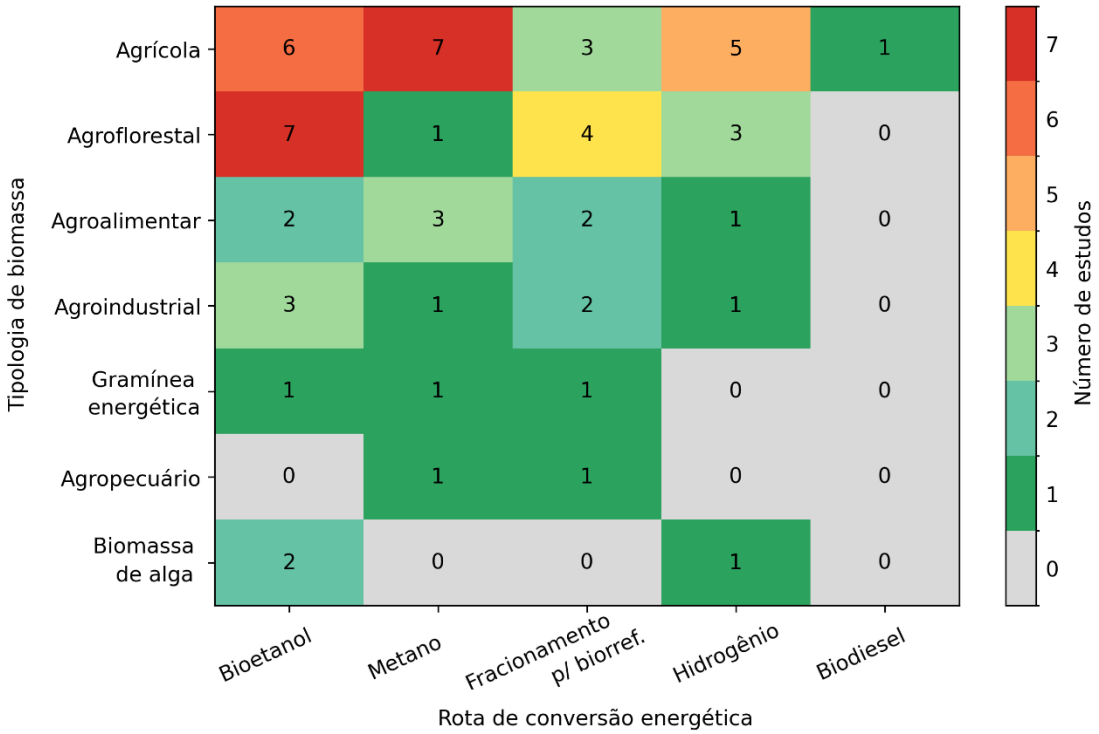


Figura 03: Distribuição das rotas de conversão energética investigadas para diferentes tipologias de biomassa. Fonte: Os autores (2026)

Nos processos voltados à produção de bioetanol de biomassa lignocelulósica, a eficiência do pré-tratamento está diretamente relacionada à liberação de açúcares fermentescíveis e à redução de compostos inibidores. Estudos como o de Audibert *et al*., (2025) utilizam planejamentos fatoriais combinados com análise econômica para determinar as melhores condições de pré-tratamento, equilibrando a maximização da liberação de açúcares fermentáveis e do rendimento de etanol com a minimização dos custos operacionais. Adicionalmente, estratégias como o uso de co-substratos têm sido exploradas para superar limitações de biomassas específicas. Por exemplo, microalgas *Chlorella vulgaris*, que apresentam baixos teores de celulose e hemicelulose, foram combinadas a resíduos lignocelulósicos de casca de arroz para aumentar a disponibilidade de açúcares fermentescíveis e melhorar o rendimento de bioetanol (Mitra *et al*., 2025).

Além dos fatores operacionais, a disponibilidade da matéria-prima e custos de transporte também são determinantes para a aplicação em escala industrial (Mitra *et al*., 2025), sendo a viabilidade econômica um critério essencial na avaliação dos

processos. Paralelamente, estratégias recentes têm buscado integrar diferentes métodos de pré-tratamento com o objetivo de maximizar a sacarificação da biomassa e otimizar o desempenho energético. Assim, Tan *et al*. (2025) propuseram um pré-tratamento simultâneo (biológico e físico) para a palha de trigo, cuja eficiência foi avaliada por meio de índices exergéticos, evidenciando ganhos tanto na taxa de conversão quanto na eficiência global do processo de produção do etanol.

Para rotas baseadas em digestão anaeróbia, como a produção de biogás e biometano, a avaliação da eficiência do pré-tratamento é frequentemente realizada por meio do ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), que permite quantificar a capacidade de geração de gás a partir da biomassa pré-tratada, seguindo protocolos padronizados. Nestes experimentos, a composição do biogás é analisada por Cromatografia Gasosa, possibilitando determinar a fração de metano e, consequentemente, o desempenho energético do sistema (Chevalier *et al*., 2025). Paralelamente, análises cinéticas têm sido incorporadas, como a identificação do ponto de inflexão em curvas sigmoides de produção de biogás, que indica o momento de máxima taxa de geração e fornece informações relevantes sobre a velocidade de conversão do substrato (Dhavaleswarapu; Hoysall; Srinivasaiah, 2025).

Entretanto, a avaliação da eficiência do pré-tratamento não deve se restringir apenas ao desempenho em uma rota específica de conversão, sendo necessário considerar a biomassa sob a perspectiva de sistemas integrados de aproveitamento. Destaca-se assim, o conceito de biorrefinaria, no qual a biomassa é utilizada de forma integral para a produção de múltiplos produtos de valor agregado (Mitra *et al*., 2025). Nesse sentido, além da geração de biocombustíveis, a lignina pode ser direcionada para a obtenção de compostos aromáticos e materiais avançados, enquanto os polissacarídeos podem ser convertidos em açúcares fermentescíveis ou intermediários químicos, como furfural e 5-hidroximetilfurfural (Liang *et al*., 2025). Assim, a recuperabilidade dos sistemas de pré-tratamento é um fator essencial para viabilizar processos econômica e ambientalmente sustentáveis, sendo frequentemente avaliada por meio de balanços de massa, que permitem quantificar a distribuição dos componentes da biomassa ao longo das etapas do processo, identificar perdas e avaliar a eficiência global de conversão. Além disso, a reciclabilidade dos reagentes químicos contribui para o desenvolvimento de processos circulares, embora possa implicar em reduções graduais de eficiência (Cañadas *et al*., 2025). Dessa forma, a eficiência do pré-tratamento deve ser analisada de forma abrangente, considerando não apenas um produto final, mas a recuperação global dos componentes da biomassa e sua integração em sistemas de biorrefinaria.

Considerações Finais

Os experimentos com biomassas lignocelulósicas para geração de biocombustíveis têm se concentrado em resíduos agrícolas e florestais, o que pode ser explicado pela ampla disponibilidade desses materiais, aliado ao fato de não competirem diretamente com a cadeia alimentar. Predominaram os pré-tratamentos químicos e físico-químicos, com destaque para o uso de reagentes alcalinos e ácidos em combinação a tratamentos térmicos. As amplas variações nas condições operacionais (como tempo de reação, temperatura, tipos de reagentes) e nas tipologias de biomassa analisadas, podem sugerir que a temática apresenta caráter exploratório, especialmente no que se refere à aplicação de pré-tratamentos combinados em novas matérias-primas. Ainda assim, as rotas de conversão mais recorrentes foram a produção de bioetanol e biometano, que dispõem de maior maturidade tecnológica.

A estratégia de pré-tratamento adotada depende das características da biomassa, das condições de operação e dos objetivos do processo. Nesse contexto, a avaliação da eficiência não deve se restringir ao rendimento de um único produto, mas considerar o aproveitamento integral da biomassa, em consonância com o conceito de biorrefinaria. Assim, aspectos como a recuperação de reagentes, o balanço de massa e energia e a viabilidade econômica tornam-se fundamentais para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis e aplicáveis em escala industrial.

Agradecimentos

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do Paraná - UFPR e ao Laboratório de Produção de Biocombustíveis – LPB, Setor Palotina.

Referências Bibliográficas

AMIN, F. R.; KHALID, H.; ZHANG, H.; RAHMAN, S.; ZHANG, R.; LIU, G.; CHEN, C.; Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion, **AMB Express**, 2017, v. 7, p. 72, 2017. https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4

AUDIBERT, E.; FLORET, J.; QUINTERO, A.; MARTEL, F.; RÉMOND, C.; PAES, G. Determination of trade-offs between 2G bioethanol production yields and pretreatment costs for industrially steam exploded woody biomass. **Applied Energy**, v. 380, p. 125028, 2025. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125028

BINDER , J. B.; RAINES, T. Fermentable sugars by chemical hydrolysis of biomass. **Proceedings of the National Academy of Sciences***, v.* 107, p. 4516-4521, 2010. https://doi.org/10.1073/pnas.0912073107

CAÑADAS, R.; DUQUE, A.; ALVAREZ, C.; HIGUERAS, I.; MANZANARES, P. Unlocking the potential of ionic liquid assisted fractionation of grapevine shoots for efficient fermentable sugar production and lignin recovery. **Journal of Environmental Management**, v. 394, p. 127589, 2025 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127589

CHEN, X.; SONG, W.; YU, H.; ZHU, J.; YANG, Y.; SUN, S. Rapid microwave-assisted deep eutectic solvent pretreatment for highly efficient saccharification and biohydrogen production from corn straw. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 103, p. 166–173, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.224

CHEVALIER, A.; LAMARQUE, J.; SAMBUSITI, C.; EVON, P.; VANDENBOSSCHE, V.; SANTANACH-CARRERAS, E.; MONLAU, F. Pilot-scale assessment of twin-screw extrusion combined with lime pretreatment to improve semi-continuous biomethane production from corn stover, and potential of produced digestate as fertilizer. **Journal of Environmental Management**, v. 337, p. 124635, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124635

CHOI, J. H.; JANG, S. K.; KIM, J. H.; PARK, S. Y.; KIM, J. C.; JEONG, H.; KIM, H. Y.; CHOI, I. G. Simultaneous production of glucose, furfural, and ethanol organosolv lignin for total utilization of high recalcitrant biomass by organosolv pretreatment. **Renewable Energy**, v. 130, p. 952-960, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.052

DHAVALESWARAPU, R. K.; HOYSALL, C. N.; SRINIVASAIAH, D. Thermal-alkaline pretreatment of different biomass to understand the interplay of composition of biomass, biogas yields, rates and mass balance. **Bioresource Technology Reports**, v. 30, p. 102162, 2025. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102162

GAO, L.; LI, D.; GAO, F.; LIU, Z.; HOU, Y.; CHEN, S.; Hydroxyl radical-aided thermal pretreatment of algal biomass for enhanced biodegradability. **Biotecnologia Biocombustíveis**, v. 8, p. 194, 2015. https://doi.org/10.1186/s13068-015-0372-2

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G.; Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 10-18, 2009. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023. Acesso em: 22 maio 2025.

ISIKGOR, F. H.; BECER, C. R. Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. **Polymer Chemistry**, v. 6, p. 4497-4559, 2015. https://doi.org/10.1039/C5PY00263J

JAMALDHEEN S. B.; KURADE, M. B.; BASAK, B.; YOO, C. G.; OH, K. K.; JEON, B. H.; KIM, T. H. A review on physico-chemical delignification as a pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced bioconversion. **Bioresource Technology**, v. 346, p. 126591, 2022. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126591

KASSAYE, S.; PANT, K. K.; JAIN, S. Synergistic effect of ionic liquid and dilute sulphuric acid in the hydrolysis of microcrystalline celulose. **Fuel Processing Technology**. v. 148, p. 289–294, 2016. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.032

KIM, J. S.; LEE, Y. Y.; KIM, T. H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Bioresour Technol**, v. 199, p. 48, 2016. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085

LIANG, J.; XIE, J.; JIANG, J.; MA, Y.; YE, J.; ZENG, X.; WANG, K. Environmentally benign process for valorization of lignocellulosic bamboo residues with green solvent propylene carbonate. **Green Energy & Environment**, v. 10, p. 1777–1788, 2025. https://doi.org/10.1016/j.gee.2025.03.002

MA, L.; ZHANG, S.; ZHANG, S.; LI, P.; LI, J.; LEI, S.; SUN, W.; ZHENG, G. The mechanism for enhancing the hydrogen production yield from corn straw through the synthesis of deep eutectic solvents with [Emim][OAc] and 1,4-butanediol. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 106, p. 1233-1242, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.038

MAMIMIN, C.; O-THONG, S.; REUNGSANG, A.; Enhancing biogas production from hemp biomass residue through hydrothermal pretreatment and co-digestion with cow manure: Insights into methane yield, microbial communities, and metabolic pathways. **Journal of Environmental Management**, v. 370, p. 123039, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123039

MARTINEZ, D. G.; BASTOS, J. A.; SOMER, J. G.; EDWIGES, T. **Pré-tratamento de biomassa**. Nota Técnica. Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Foz do Iguaçu, 2022
MITRA, R.; GHOSH, A.; BHATTACHARYA, I.; BHAR, R.; DUBEY, B. K.; GHOSH, A.; SEM, R. Strategic conversion of algal and lignocellulosic biomass wastes as mixed feedstock for enhanced and environment-friendly production of bioetanol. **Energy Conversion and Management**, v. 342, p. 120157, 2025. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120157

PÉREZ, J.; MUÑOZ-DORADO, J.; DE LA RUBIA, T.; MARTÍNEZ, J. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. **Int. Microbiol**, v. 5, p. 53-63, 2002. https://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3

PIPEREAU, K.; TRABLY, E.; SANTA-CATALINA, G.; GARCÍA-BERNET, D.; CARRERE, H. Targeted pretreatment and inoculation strategies for horse manure fermentation: Impact on metabolites and microbial community composition. **Journal of Environmental Management**, v. 387, p. 125894, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125894

QU, C.; DAI, K.; FU, H.; WANG, J.; Enhanced ethanol production from lignocellulosic hydrolysates by Thermoanaerobacterium aotearoense SCUT27/DargR1864 with improved lignocellulose-derived inhibitors tolerance. **Renewable Energy**, v. 173, p. 652 – 661, 2021. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.018

SHARMA, H. K.; XU, C.; QIN, W.; Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuels and Bioproducts: Na Overview. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, p. 235-251, 2019. DOI:10.1007/s12649-017-0059-y

SHUKLA, A.; KUMAR, D.; GIRDHAR, M.; KUMAR, A.; GOYAL, A.; MALIK, T.; MOHAN, A. Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. **Biotechnol Biofuels**, *v.* 16 , p. 44, 2023. https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2

SINGH, J.; SUHAG, M.; DHAKA, A. Augmented digestion of lignocellulose by steam explosion, acid and alkaline pretreatment methods: A review. **Carbohydr Polym**, v. 117, p. 624 2015. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.012

SONG, G.; LIU, D.; MADADI, M.; LIU, L.; LI, C.; LIU, Q.; SUN, C.; ZHANG, E.; ASHORI, A.; SUN, F. Surfactant-aided acid glycerol pretreatment of sugarcane bagasse: Dual benefits of substrate and lignin modifications for improved enzymatic hydrolysis. **Energy**, v. 320, p. 135520, 2025. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135520

SUN, F. F.; WANG, L.; HONG, J.; REN, J.; DU, F.; HU, J.; ZHANG, Z.; ZHOU, B. The impact of glycerol organosolv pretreatment on the chemistry and enzymatic hydrolyzability of wheat straw. **Bioresour Technol**, v. 187, p. 354, 2015. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.051

TAN, X.; QIU, S.; XIA, A.;LIN, K.; HUANG, Y.; ZHU, X.; CAI, K.; WEI, Z.; ZHU, X.; LIAO, Q. Simultaneous pretreatment of wheat straw with ball-milling and laccase to improve saccharification and exergy analysis of pretreatment-enzyme hydrolysis process. **Energy**, v. 334, p. 137635, 2025. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137635

WANG, C.; WU, X.; XIA, A.; NIZAMI, A. S.; HUANG, Y.; ZHU, X.; ZHU, X.; LIAO, Q. Improving anaerobic digestion of lignocellulosic hydrolysate derived from hydrothermal pretreatment via applied voltages. **Energy**, v. 312, p. 133651, 2024. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133651

XIA, Q.; ZHANG, L.; ZHAN, P.; TONG, Z.; QING, Y.; HE, J.; WU, Z.; WANG, H.; SHAO, H.; LIU, N. Combination of microwave with acid deep eutectic solvent pretreatment for reed (Phragmites australis) fractionation. **Renewable Energy**, v. 225, p. 120286, 2024. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120286

XIE, X.; SONG. K.; WANG, J.; HU, J.; WU, S.; CHU, Q. Efficient ethanol production from masson pine sawdust by various organosolv pretreatment and modified pre-hydrolysis simultaneous saccharification and fermentation **Renewable Energy**, v. 225, p. 120289, 2024. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120289

YU, Z.; DU, Y.; SHANG, X.; ZHENG, Y. ZHOU, J. Enhancing fermentable sugar yield from cassava residue using a two-step dilute ultra-low acid pretreatment process, **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 555-562, 2018. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.029

ZHOU, Z.; OUYANG, D.; LIU, D.; ZHAO, X. Oxidative pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis: Progress and challenges. **Bioresource Technology**, v. 367, p. 128208, 2023. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128208.

SOLUÇÃO ECOLÓGICA PARA DANOS POR CUPINS EM USINAS FOTOVOLTAICAS

Jose Angel Sola Arbeloa
PROJECVA - jose.sola@projecva.com

Palavras-chave: Eletricidade; Biologia; Ecologia

Resumo

Durante a construção e manutenção de usinas fotovoltaicas no interior do Brasil (clima semiárido, com abundância de colônias de cupim), os trabalhadores encontraram frequentemente danos no revestimento de cabos elétricos soterrados, com marcas e perfurações aparentemente feitas por esses insetos. Mediante inspeções de campo e entrevistas com biólogos e engenheiros (elétricos, civis e agrónomos) construiu-se uma teoria que explica a origem, posição e características dos danos observados. Uma vez compreendido o fenômeno, foi possível formular uma solução simples e de baixo custo, oferecendo uma alternativa viável e ecologicamente responsável para a prevenção de danos de origem animal comumente encontrados em instalações elétricas com cabos soterrados.

Introdução

A tendência dos afetados por danos animais em instalações elétricas soterradas costuma ser: a) a procura de fabricantes que oferecem cabos elétricos comerciais com proteções incrementadas, encarecendo drasticamente os projetos ou; b) o tratamento do problema como uma praga agrícola, aplicando paliativamente químicos ou pesticidas que geram impactos negativos para o meio ambiente e custos adicionais de manutenção. O objetivo do processo relatado no presente artigo foi investigar as verdadeiras causas do problema e trazer soluções alternativas sustentáveis.

Material e Métodos

Para entender e tratar o fenômeno foi efetuada uma análise de causa raiz visando formular e validar ou descartar hipóteses que explicariam as diversas incógnitas encontradas, conforme descrito a seguir. O processo de investigação incluiu participação in loco nos labores noturnos de reparação, onde foi possível verificar a presença dos insetos nas valas e entrevistar os operários que participavam das atividades, registrando e classificando os diferentes tipos de danos observados.



Figura 01: Reparos noturnos de cabos soterrados em usina fotovoltaica. Fonte: Projecva 2026

Após recolhimento de informações e, seguindo orientações dos especialistas, foram formuladas e avaliadas as seguintes incógnitas e hipóteses:

Alimentação

Em alguns casos, óleos vegetais são usados na indústria para doar flexibilidade aos materiais plásticos do revestimento dos cabos, o que poderia resultar em odores convidativos que pudessem levar aos insetos confundirem os cabos com raízes.

Os materiais sintéticos do isolamento dos cabos não possuem valor nutritivo para o cupim (Coptotermes Formosanus) que se alimenta exclusivamente de celulose, digerida a partir da madeira e matéria orgânica, em simbiose com protozoários e bactérias, reciclando nutrientes de volta ao solo. A ingesta dos materiais dos cabos como alimento resultaria na morte ou mal-estar físico dos indivíduos, desestimulando rapidamente a associação dos cabos com alimento.



Figura 02: Coptotermes Formosanus, "cupim". Fonte: Projecva 2026.

Temperatura

Se tratando de insetos exotérmicos a atividade do cupim é influenciada pela temperatura ambiente. Foi formulada a hipótese de que a espécie estivesse sendo atraída pelo calor gerado pela eletricidade fluindo pelos cabos. As temperaturas atingidas no interior dos cabos, dependendo do material de isolação (PVC, XLPE, EPR etc), oscilam entre 70ºC e 250ºC. Dependendo dos materiais específicos e do tipo de solo ou areia usado no preenchimento das valas, a irradiação de calor dos cabos poderia sim, em estações mais frias, criar ambientes com temperatura agradável para os insetos.

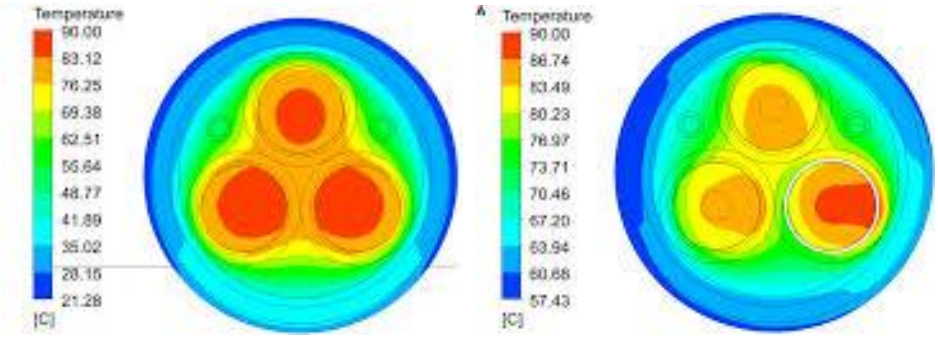


Figura 03: Temperaturas em cabos elétricos soterrados. Fonte: Projecva 2026.

Contudo, a hipótese da temperatura poderia explicar a presença confortável do cupim nas proximidades dos cabos, mas não explicaria o motivo das agressões ao material.

Transitabilidade

Os "tubos de lama", são estruturas de proteção construídas por cupins de solo, compostas por terra, saliva e excrementos. Eles ligam ninhos subterrâneos a fontes de alimento, como madeira e celulose, protegendo a colônia contra a luz, desidratação e predadores, frequentemente aparecendo em paredes.



Figura 4: Túnel sendo construído e transitado por uma colônia de cupim. Fonte: Projecva 2026.

Os circuitos elétricos trifásicos de meia e alta tensão são comumente formados por três cabos agrupados criando uma seção triangular, denominada "trifólio". Essa é a forma mais eficiente de transporte, balanceando os efeitos das ondas

eletromagnéticas dos três cabos. O espaço criado entre os três cabos oferece um excelente habitat para o cupim, acostumado a construir tuneis de uso exclusivo.

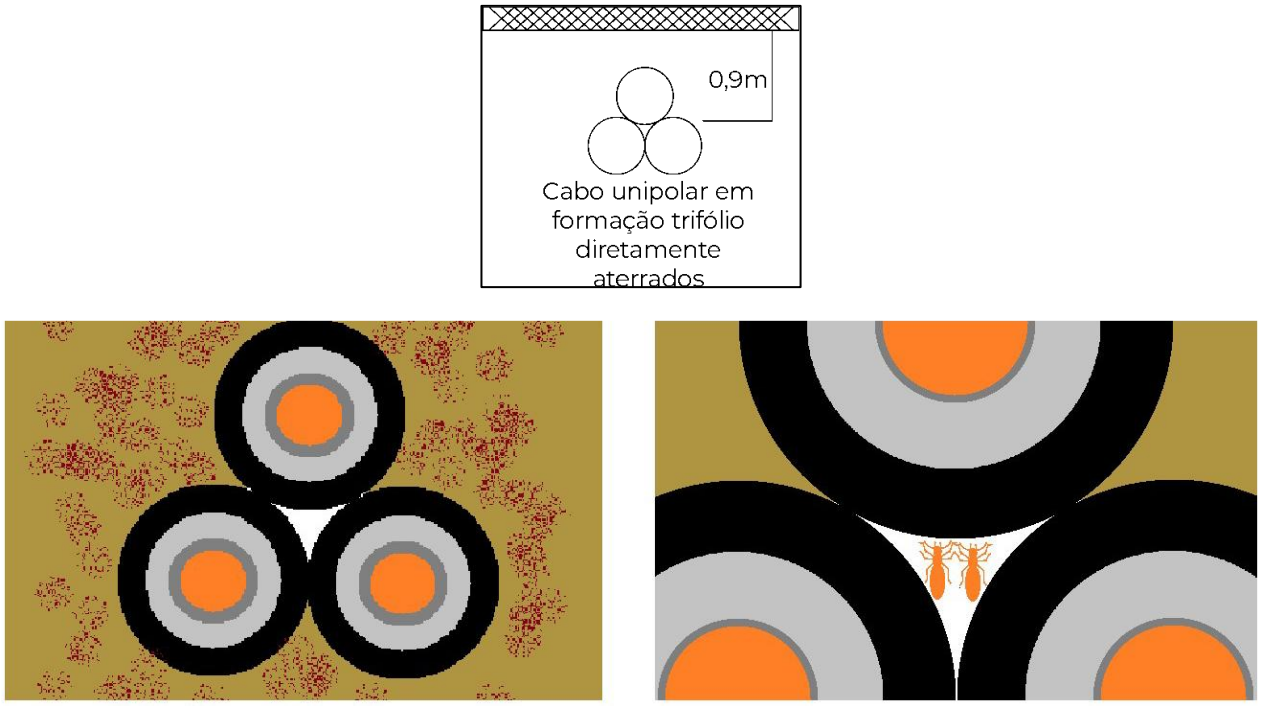


Figura 5: Cabos elétricos arranjados em trifólio criam um "túnel" transitado pelos insetos. Fonte: Projecva 2026.

Esta hipótese (o uso do espaço disponibilizado) explica também a presença de ninhos com larvas em eletrodutos de proteção dos cabos. Porém, ao igual que a temperatura, não oferecia (inicialmente) motivo para agressões persistidas aos mesmos.

Danos localizados

A análise da forma das áreas afetadas nos cabos apresentou dois padrões predominantes:

Sulcos transversais

Sulcos transversais que ocorrem de forma isolada ou evoluem a partir de sulcos longitudinais de maiores dimensões. Encontrados indistintamente nos três cabos dos trifólios.



Figura 6: Danos observados em padrão transversal ou ramificado. Fonte: Projecva 2026.

Sulcos longitudinais

Sulcos longitudinais, observados na mesma direção dos cabos. Aumentam progressivamente em comprimento, largura e profundidade.



Figura 7: Danos observados em padrão longitudinal. Fonte: Projecva 2026.

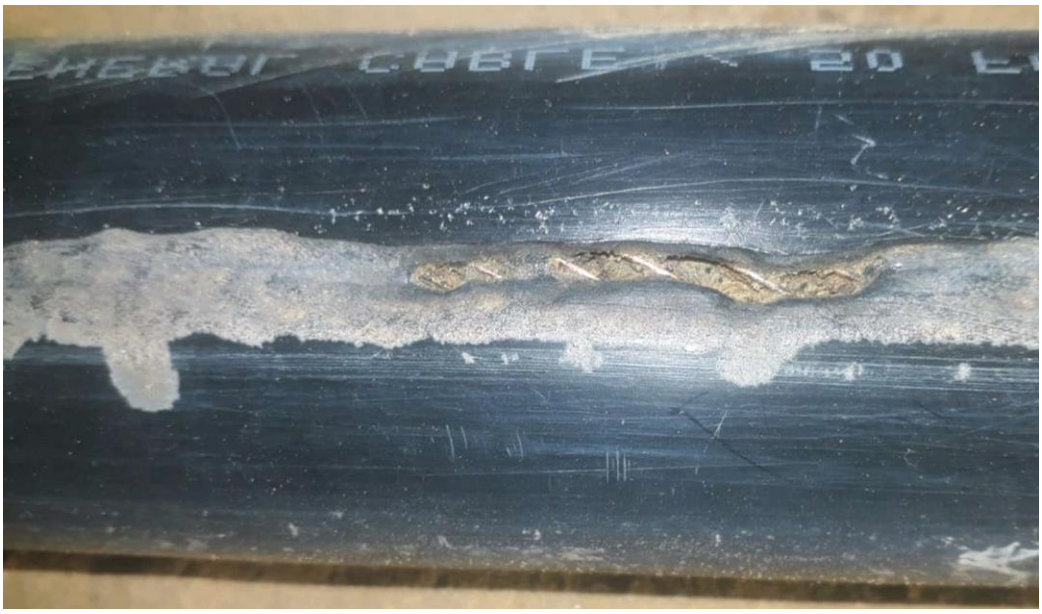


Figura 8: Danos observados em padrão longitudinal. Fonte: Projecva 2026.

Os sulcos longitudinais foram encontrados exclusivamente na parte interna dos cabos posicionados no topo do trifólio (“a fase de em cima”, conforme relatos dos trabalhadores).

Esse “enigma”: por que os insetos atacariam apenas uma das fases? foi o desencadeador da construção da teoria formulada no presente artigo.

Resultados e Discussão

A interpretação indica que o espaço interno do trifólio, não preenchido pelo reaterro, torna-se refúgio para as colônias após a supressão vegetal. Esse espaço atua como um dreno que acumula água das chuvas. Durante as "enchentes no túnel", os insetos roem a proteção do cabo superior para salvar a própria vida ou para desobstruir a circulação, gerando os sulcos longitudinais observados nos cabos superiores.

Simultaneamente, as galerias transversais de menor tamanho teriam sido abertas lateralmente para sair do espaço protegido seguindo o caminho de raízes atraídas pela umidade nos cabos.

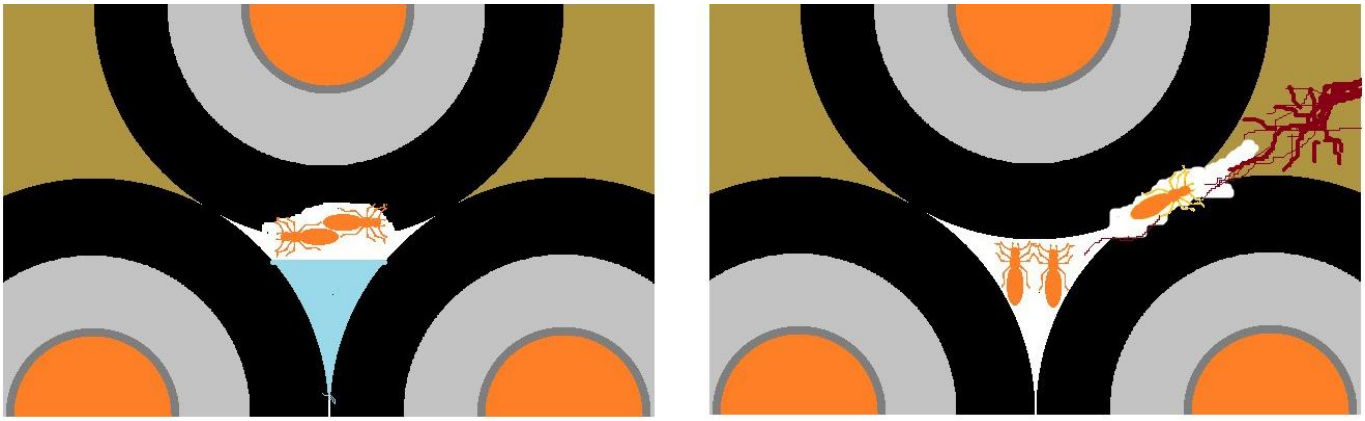


Figura 9: Acúmulos de água da chuva infiltrada forçando os insetos contra o cabo superior e atraindo raízes externas. Fonte: Projecva 2026.

Solução formulada. Preenchimento preventivo

Intuitivamente, uma das primeiras soluções formuladas foi a possível alteração da configuração em trifólio dos cabos para uma configuração em paralelo, a fim de não deixar espaços entre os cabos. Porém, conforme explicado, a máxima eficiência de transmissão é atingida e normalmente calculada com configurações em trifólio. Por questões de garantia, as alterações em obra dos projetos elétricos aprovados tendem a ser evitadas.

A solução formulada é acessória e de caráter preventivo. Consiste simplesmente no preenchimento do interior dos trifólios com areia (o mesmo material de proteção dos cabos na vala) antes de apoiar o cabo superior. É prática comum usar abraçadeiras plásticas para amarrar e classificar os grupos de cabos no interior das valas. Apenas seria necessário mudar o tipo de abraçadeira plástica para o recuperável (de valor similar) que permite abrir e fechar o travamento do amarre mais de uma vez.

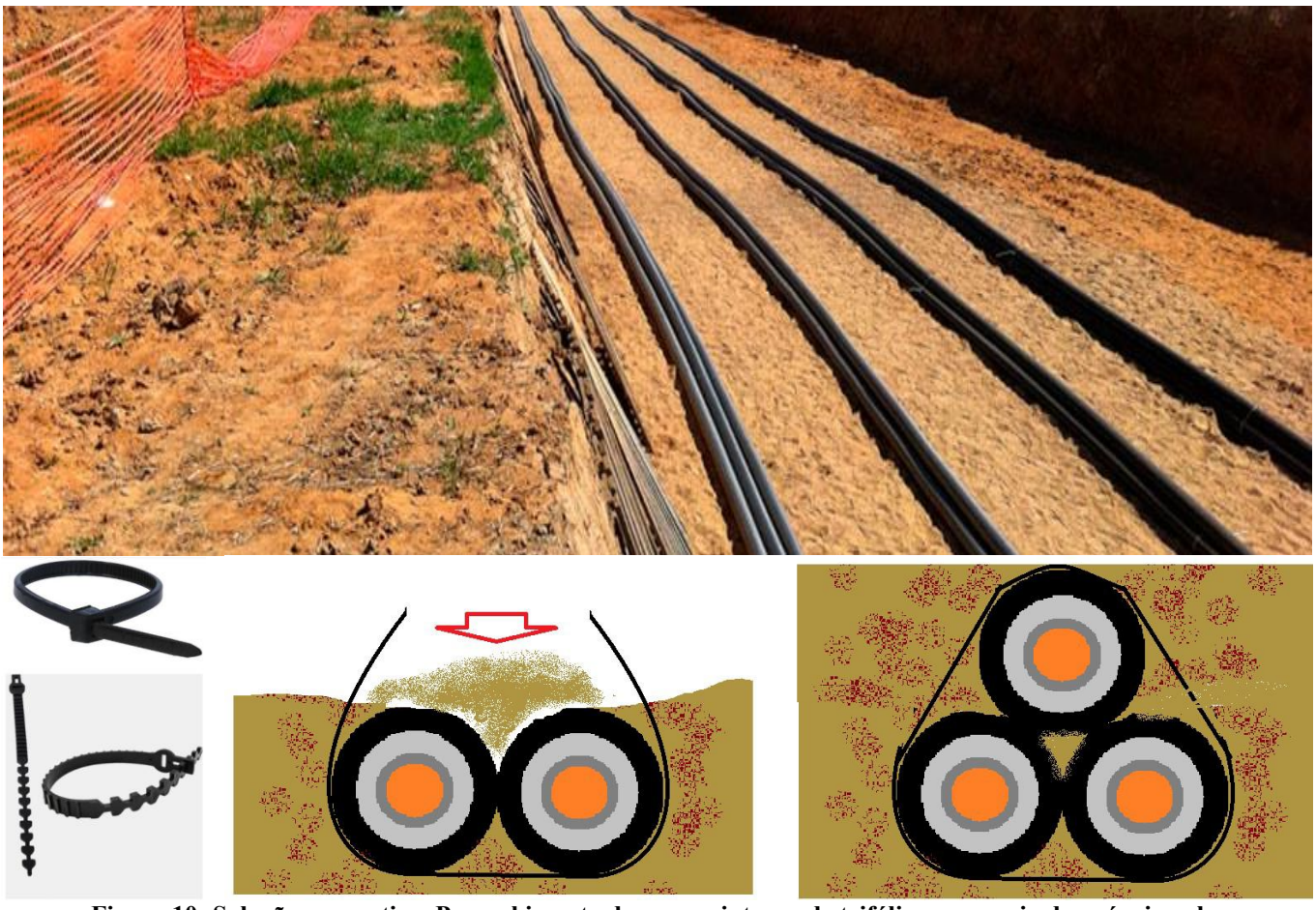


Figura 10: Solução preventiva. Preenchimento do espaço interno de trifólios com areia da própria vala. Fonte: Projecva 2026.

Logo após o lançamento dos cabos, antes de proceder ao reaterro da vala, apenas precisaria incorporar a atividade de desamarre, preenchimento do espaço interior dos trifólios com areia da própria vala e amarre definitivo. Essa atividade seria facilmente absorvível pelas equipes de instalação da fita de aviso.

Os ganhos a médio e longo prazo justificam totalmente o ajuste explicado, pois uma vez eliminado o espaço, não resta nenhuma chance do mesmo ser ocupado por animais. Ainda, a mesma técnica de preenchimento com areia poderia e deveria ser aplicada em eletrodutos, locais de conexão etc., para eliminar espaços favoráveis à criação de ninhos.

A solução preventiva formulada seria, em princípio, aplicável a outras espécies conhecidamente daninhas para as instalações elétricas (roedores, formigas etc.).

Considerações Finais

O estudo demonstrou que os danos observados em cabos elétricos soterrados nas usinas do semiárido brasileiro não decorrem de um comportamento alimentar ou territorial dos cupins, mas sim de uma resposta adaptativa à ocupação de espaços vazios entre os cabos.

O padrão de danos longitudinais no cabo superior dos trifólios evidenciou que a maior parte dessas perfurações foram tentativas de sobrevivência dos insetos diante de inundações nos dutos formados entre os cabos, após infiltração de água das chuvas.

A identificação dessa causa raiz permitiu desmistificar a necessidade de aplicação de químicos nocivos ou do uso cabos de alto custo, que oneram os projetos fotovoltaicos e trazem impactos negativos para o meio ambiente.

A técnica de preenchimento preventivo com areia apresenta-se como uma solução de baixo custo e alta replicabilidade, capaz de ser integrada às rotinas de instalação sem comprometer o cronograma das obras.

Recomenda-se a adoção desta prática como padrão em novos projetos, estendendo sua aplicação para outros componentes como eletrodutos e caixas de conexão. Recomendam-se, também, estudos futuros para confirmar a eficácia deste método contra outras espécies, como roedores e formigas, em diferentes biomas.

Assim, o artigo entrega uma contribuição relevante para o setor de energias renováveis, provando que a engenharia de precisão e a conservação ambiental podem caminhar juntas através de ajustes metodológicos práticos e acessíveis.

Este trabalho evidencia como o respeito e a compreensão do comportamento biológico podem oferecer respostas mais eficazes e soluções mais sustentáveis, fomentando uma maior interação positiva entre a engenharia e o meio ambiente.

Agradecimentos

Agradecimentos especiais para o Eng. Agrónomo Augusto Jaeger e o Eng. Eletricista João Carlos Dantas Moura.

Referências Bibliográficas

CONSTANTINO, R. Cupins do Brasil. Brasília: Editora UnB, 2015.

NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

PRYSMIAN GROUP. Manual de Instalação de Cabos de Energia. São Paulo, 2024

VILLALVA, M. G. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA COM PRÉ-TRATAMENTOS BIOLÓGICOS: TENDÊNCIAS OBSERVADAS NOS ÚLTIMOS 20 ANOS

1Rebeca de Lima Oliveira, 2Thiago Marques de Mello, 3Gislany Pereira de Lira, 4Sergio de França Nunes, 5Ana Luiza Esmeraldo de Almeida, 6André Felipe de Melo Sales Santos, 7Tatiana Souza Porto, 8Liliana Andréa dos Santos

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: rebeca.limaoliveira@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: thiago.mello@ufrpe.br; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: gislany.plira@ufrpe.br; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: sergio.nunes@ufrpe.br; 5 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: analuiza.almeida@ufrpe.br; 6 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: andre.felipesantos@ufrpe.br; Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: tatiana.porto@ufrpe.br; Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: liliana.santos@ufrpe.br

Palavras-chave: digestão anaeróbia; potencial bioquímico de metano; energia renovável.

Resumo

A bioconversão de resíduos vegetais em biocombustíveis gasosos se consolidou como uma rota tecnológica estratégica para a transição energética sustentável, embora a rigidez das paredes celulares dessas biomassas ainda represente um gargalo técnico significativo. Diante desse cenário, o presente estudo objetivou mapear o panorama científico global e as tendências evolutivas da área, com foco analítico nas biotecnologias de degradação da matéria orgânica. Para tanto, a fundamentação metodológica ancorou-se no protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Prisma), com o levantamento de dados realizado na base *Web of Science* no recorte temporal de 2005 a 2025. Complementarmente, a sistematização e o processamento das informações foram executados mediante integração computacional em ambientes *Python* e *RStudio*®, além da análise de redes bibliométricos via *VOSviewer*®. Como resultado, os dados evidenciaram uma ascensão exponencial das publicações a partir do ano de 2010, com um ápice produtivo entre 2019 e 2022, revelando ecossistemas de colaboração científica densamente concentrados nos eixos europeu e asiático. As evidências apontam que as fronteiras do conhecimento convergem para a superação da barreira da lignina por meio de catalisadores enzimáticos e consórcios fúngicos. O estudo de coocorrência de termos ratificou a centralidade da digestão anaeróbia e do rendimento de metano como indicadores críticos de desempenho. Diante do exposto, depreendeu-se que os pré-tratamentos biológicos desempenham um papel catalisador no avanço da bioeconomia, consolidando-se como uma abordagem indispensável para a bioeconomia do setor agroindustrial.

Introdução

A produção de energia a partir de fontes renováveis tem se intensificado nas últimas décadas, motivada pelo esgotamento de combustíveis fósseis e pelas mudanças climáticas. Entre as alternativas renováveis, a produção de biogás por digestão anaeróbia de resíduos orgânicos consolidou-se como uma tecnologia promissora, capaz de gerar energia sustentável e reduzir o volume de resíduos destinados a aterros. Nesse contexto, a biomassa lignocelulósica, incluindo bagaço de cana-de-açúcar, palha, cascas de frutas e legumes, serragem e outros resíduos agrícolas, destacou-se como uma das fontes mais abundantes de matéria-prima renovável no mundo (Achinivu *et al.,* 2021). Entretanto, a utilização eficiente da biomassa lignocelulósica enfrentou desafios significativos devido à sua estrutura complexa, composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. A presença de lignina, em particular, limitou a acessibilidade enzimática dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia, reduzindo a eficiência da produção de metano, principal componente energético do biogás (Santos *et al.,* 2020).

Para superar essas limitações, diferentes métodos de pré-tratamento foram investigados visando aumentar a degradação da biomassa e melhorar o desempenho dos processos de digestão anaeróbia. Esses métodos incluíram técnicas físicas, químicas, físico-químicas e biológicas, cada uma com vantagens e limitações específicas. Embora os pré-tratamentos químicos e físicos possam melhorar a digestibilidade, eles frequentemente envolvem custos elevados e riscos ambientais, como a formação de compostos inibidores que prejudicam o metabolismo microbiano (Mujtaba *et al.,* 2023). Por outro lado, os pré-tratamentos biológicos, baseados na aplicação de microrganismos, fungos ou enzimas, mostraram-se promissores por promoverem a delignificação de forma mais ambientalmente amigável, sem a geração de subprodutos tóxicos, além de serem potencialmente mais econômicos (D'Adamo; Gastaldi; Morone, 2022). Esses métodos facilitaram a degradação enzimática da biomassa, aumentando a disponibilidade de carboidratos fermentáveis e, consequentemente, a produção de metano. Estratégias que combinaram pré-tratamentos biológicos com abordagens físico-químicas também mostraram potencial para potencializar os efeitos de cada método isolado (Achinivu *et al.,* 2021).

Neste trabalho, a análise bibliométrica foi utilizada como ferramenta para compreender o desenvolvimento científico sobre o tema, permitindo identificar tendências de pesquisa, autores mais influentes, redes de cooperação internacional e tópicos emergentes. Ao mapear a produção científica relacionada à produção de biogás a partir de biomassa lignocelulósica com ênfase em pré-tratamentos biológicos, foi possível evidenciar lacunas no conhecimento e orientar futuras pesquisas, além de fornecer suporte para formulação de políticas públicas e estratégias de inovação tecnológica. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura, apoiada em análise bibliométrica, com foco na produção de biogás a partir de biomassa lignocelulósica e no uso de pré-tratamentos biológicos.

Materiais e Métodos

Levantamento Bibliográfico e Bibliométrico

Este estudo foi desenvolvido com base em uma abordagem quali-quantitativa, de caráter exploratório e descritivo, estruturando-se como uma análise bibliométrica. O delineamento metodológico fundamentou-se nas diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Prisma), cujo fluxo compreende quatro etapas sequenciais — identificação, seleção, elegibilidade e inclusão —, assegurando rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade dos resultados (Moher *et al.,* 2009), conforme apresentado na Figura 01.

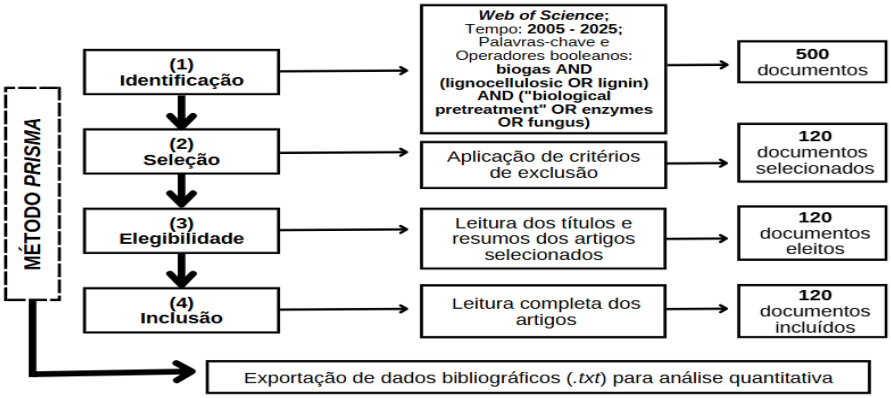


Figura 01: Fluxo metodológico da revisão sistemática, com base no protocolo Prisma, aplicado à coleta de dados na base *Web of Science* e à análise bibliométrica.
Fonte: Os autores (2026)

A coleta de dados foi finalizada em 23 de janeiro de 2026, por meio da plataforma Portal Periódicos do *CapesCafe*, utilizando a base de dados *Web of Science* e abrangendo todos os campos de indexação. Os termos de busca, combinados por operadores booleanos, foram: *(biogas AND (lignocellulosic OR lignin) AND ("biological pretreatment" OR enzymes OR fungus))*. Foram considerados artigos originais e de revisão, publicados entre 2005 e 2025, no idioma inglês. A aplicação dos critérios de seleção e a definição do conjunto final de estudos incluídos seguiram o fluxo estabelecido pelo protocolo Prisma.

Extração e Organização de Dados

Os dados bibliográficos foram exportados da base *Web of Science* em formato *TXT*, garantindo compatibilidade com os softwares utilizados na análise. A organização e análise descritiva dos dados foram realizadas no *Microsoft Excel* e em *Python*, possibilitando a elaboração de gráficos exploratórios. Para análise bibliométrica e construção de redes de colaboração, citação de documentos, autores, países e palavras-chave, foi utilizado o *sofware VOSviewer,* enquanto o *RStudio Desktop* foi empregado no tratamento de dados textuais e na geração de nuvens de palavras, permitindo identificar tendências temáticas e áreas de pesquisa mais recorrentes.

Resultados e Discussão

Análise e Categorização da Produção Científica

A análise bibliométrica da literatura sobre a produção de biogás a partir de biomassa lignocelulósica e lignina, com ênfase em pré-tratamentos biológicos, no período de 2005 a 2025, revelou padrões relevantes na evolução do conhecimento científico ao longo das últimas duas décadas. A busca inicial resultou em 500 documentos, dos quais 120 foram selecionados após as etapas de triagem, avaliação de elegibilidade e leitura integral, conforme os critérios previamente estabelecidos.

No intervalo entre 2005 e 2007, não foram identificadas publicações, configurando um período de ausência de produção científica. As primeiras contribuições surgiram em 2008 e 2009, com um estudo em cada ano (0,83%), marcando o início das investigações voltadas ao uso de pré-tratamentos biológicos, especialmente com enzimas fúngicas, para favorecer a digestão anaeróbia de materiais lignocelulósicos.

A partir de 2010, observa-se um crescimento progressivo do número de estudos, com três publicações (2,50%) em 2010, quatro (3,33%) em 2012, oito (6,67%) em 2015, dez (8,33%) em 2017 e onze (9,17%) em 2018, evidenciando a consolidação do tema na literatura científica. O período entre 2019 e 2022 concentrou o maior volume de publicações, com 16 estudos anuais (13,33%), indicando o ápice do interesse acadêmico na área. Nos anos mais recentes, verifica-se uma leve retração, com 12 publicações (10,00%) em 2023, cinco (4,17%) em 2024 e oito (6,67%) em 2025. A Figura 02 apresenta a evolução temporal das publicações ao longo do período analisado.

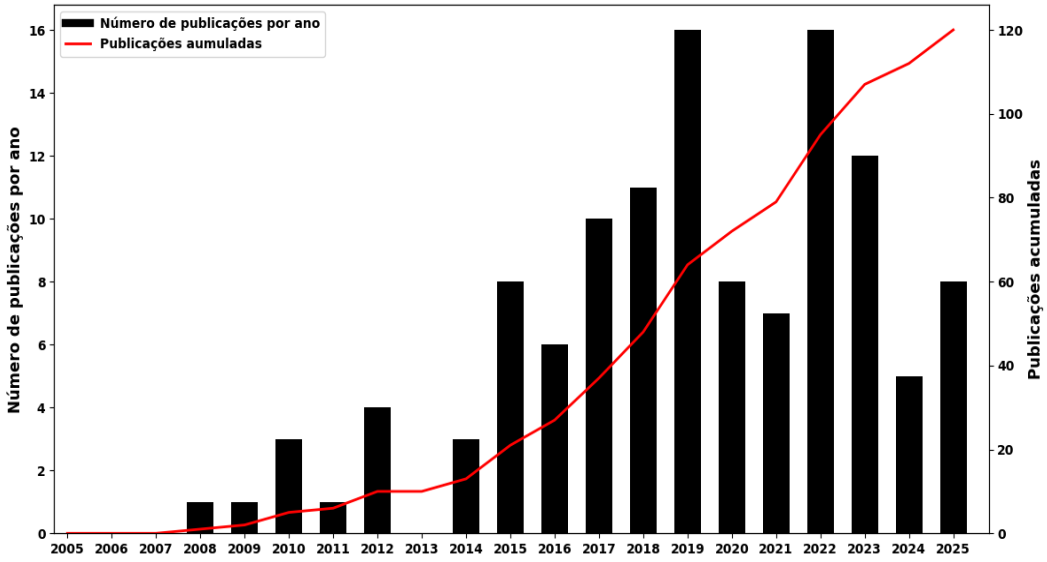


Figura 02: Evolução temporal do número de publicações científicas sobre a produção de biogás a partir de biomassa lignocelulósica e lignina, com ênfase em pré-tratamentos biológicos, no período de 2005 a 2025.
Fonte: Os autores (2026)

De modo geral, os resultados demonstram a expansão e posterior estabilização do interesse científico em estratégias de pré-tratamento biológico aplicadas à conversão de biomassa lignocelulósica em biogás, evidenciando a maturação da área e seu potencial contínuo de desenvolvimento tecnológico e inovação.

Análise das Citações de Documentos

A análise bibliométrica contemplou 120 documentos, todos atendendo ao critério mínimo de cinco citações, evidenciando a relevância e a consolidação do tema no âmbito científico. A rede de citações, apresentada na Figura 03, permitiu visualizar as inter-relações entre os estudos selecionados, destacando a formação de 15 *clusters*, os quais representam agrupamentos de publicações conectadas por referências e citações compartilhadas.

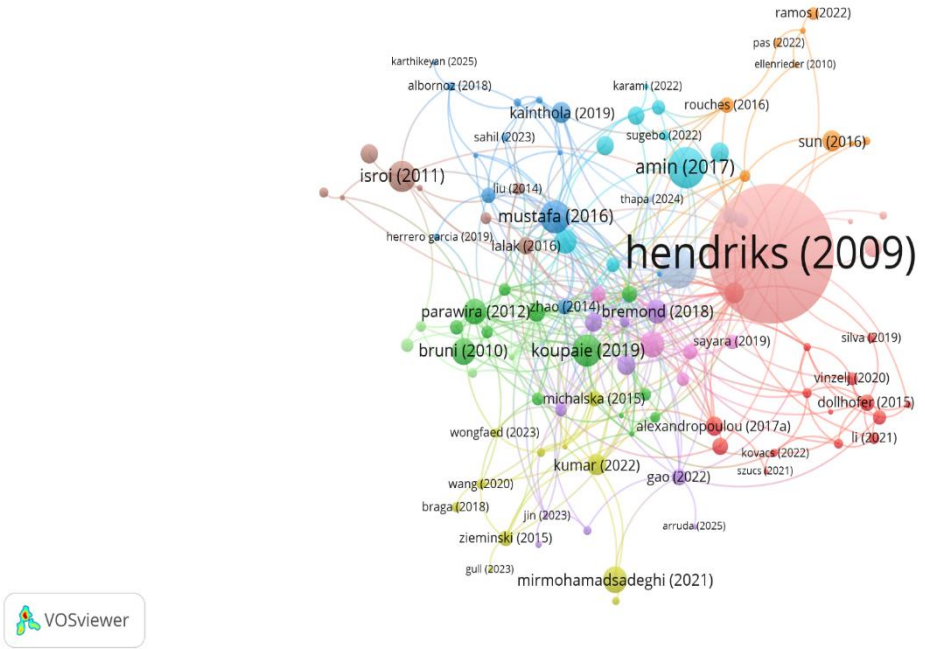


Figura 03: Estrutura da rede bibliométrica de citações entre documentos, evidenciando os agrupamentos (*clusters*) formados com base em referências compartilhadas e o grau de influência dos estudos no período analisado.
Fonte: Os autores (2026)

A dimensão desses agrupamentos é proporcional ao número de citações recebidas, possibilitando a identificação dos trabalhos de maior impacto e influência na área. Para uma análise mais representativa da rede, o Quadro 01 apresenta os cinco artigos mais citados.

Ranking	Título	Primeiro autor/ano	Número de citações	Revista	DOI
1º	*Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass*	Hendriks (2009)	2814	*Bioresource Technology*	https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027
2º	*Agricultural waste management strategies for environmental sustainability*	Koul (2022)	622	*Environmental Research*	https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285
3º	*Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion*	Amin (2017)	336	*AMB Express*	https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4
4º	*Recent advances in biological pretreatment of microalgae and lignocellulosic biomass for biofuel production*	Zabed (2019)	326	*Renewable and Sustainable Energy Reviews*	https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.048
5º	*Fungal pretreatment of rice straw with Pleurotus ostreatus and Trichoderma reesei to enhance methane production under solid-state anaerobic digestion*	Mustafa (2016)	229	*Applied Energy*	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.135

Quadro 01: Principais documentos mais citados relacionados à produção de biogás a partir de biomassa lignocelulósica (2009–2022).
Fonte: Os autores (2026)

A análise dos estudos mais citados permite identificar tendências consolidadas e direcionamentos estratégicos na área. O trabalho de Hendriks e Zeeman (2009), amplamente referenciado (2814 citações), estabelece fundamentos sobre a necessidade de pré-tratamentos para superar a recalcitrância estrutural da biomassa lignocelulósica, destacando limitações físicas impostas pela estrutura rígida à ação microbiana. Em complemento, estudos como os de Amin *et al.* (2017) e Zabed *et al.* (2019) avançam na sistematização de métodos de pré-tratamento, com ênfase em abordagens biológicas e integradas, evidenciando ganhos significativos na digestibilidade e no rendimento de biogás.

De forma mais específica, observa-se que os trabalhos com maior impacto se concentram na aplicação de enzimas ligninolíticas (como lacases e peroxidases) e no uso de fungos de podridão branca, capazes de promover a degradação seletiva da lignina, preservando frações fermentescíveis como celulose e hemicelulose. Estudos experimentais, como o de Mustafa *et al.* (2016), demonstram que o uso de *Pleurotus ostreatus* e *Trichoderma reesei* em pré-tratamentos pode elevar significativamente a produção de metano em sistemas de digestão anaeróbia em estado sólido. Paralelamente, abordagens mais recentes, como a de Koul *et al.* (2022), ampliam a discussão ao integrar estratégias de valorização de resíduos agrícolas sob a perspectiva da sustentabilidade ambiental. Em conjunto, esses achados indicaram que o avanço do campo está fortemente associado ao desenvolvimento de tecnologias de pré-tratamento mais eficientes, seletivas e ambientalmente sustentáveis, consolidando o papel dos processos biológicos como alternativas promissoras para otimizar a conversão de biomassa lignocelulósica em biogás.

Principais Autores Produtivos e Citações

Na análise da rede de coautoria, foram identificados 558 autores na base de dados; entretanto, apenas uma parcela restrita, com 06 autores, atendeu ao critério mínimo de três publicações, evidenciando a concentração da produção científica em um grupo seleto de pesquisadores mais produtivos e influentes. Entre os autores de maior destaque, sobressaem Katleen Raes, Michel Schroyen, Stijn W. H. Van Hulle e Han Vervaeren, cada um com três publicações e 194 citações, indicando elevada visibilidade e impacto acadêmico. Adicionalmente, Andrea Carvajal e Carolyn Palma também se destacaram, ambas com três publicações e 96 citações, consolidando sua relevância na rede analisada.

Observa-se que uma parcela significativa (04 autores) desses pesquisadores está vinculada à Universidade de Gante, na Bélgica, o que evidencia a formação de um núcleo consolidado de colaboração científica institucional. Esse padrão reflete o papel estratégico de instituições europeias no avanço das pesquisas relacionadas à conversão de biomassa e à produção de bioenergia, sustentado por investimentos consistentes em infraestrutura científica, financiamento e políticas públicas direcionadas à transição energética e à economia circular (Scarlat *et al.,* 2018). A estrutura das interações entre esses pesquisadores pode ser observada na Figura 04, a qual evidencia as conexões de coautoria e a formação de núcleos de colaboração científica, destacando a centralidade dos autores mais influentes no desenvolvimento da área.

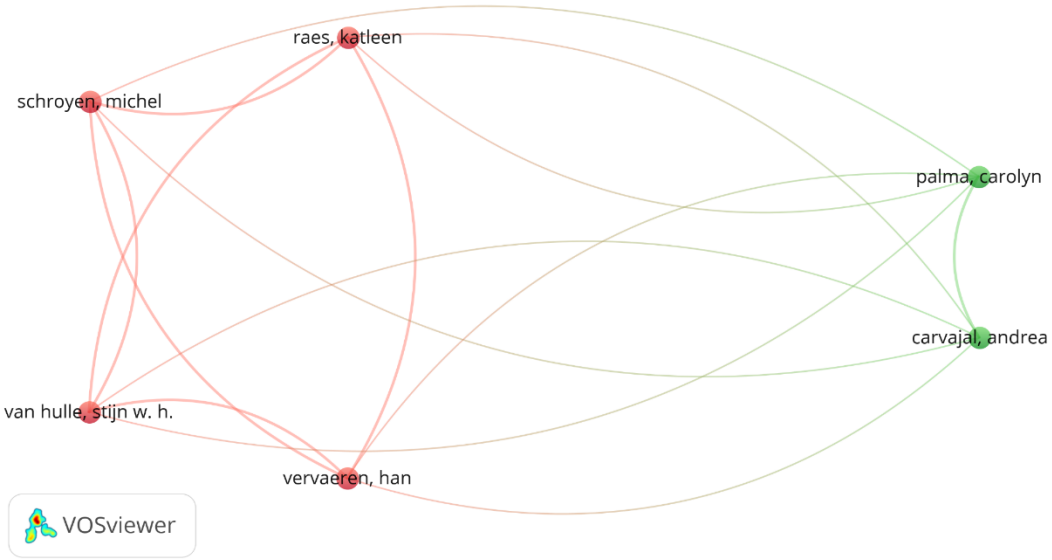


Figura 04: Estrutura da rede de coautoria entre os autores mais produtivos, considerando o critério mínimo de três publicações, evidenciando as conexões de colaboração científica e a centralidade dos pesquisadores no período analisado.
Fonte: Os autores (2026)

Além disso, a presença de pesquisadores vinculados à Universidade de Concepción, no Chile, demonstra a inserção da América Latina nesse campo de investigação. Esse envolvimento está diretamente relacionado à ampla disponibilidade de resíduos agrícolas e lignocelulósicos na região, o que impulsiona o desenvolvimento de estudos voltados à valorização energética da biomassa e, nos países em desenvolvimento, essas pesquisas assumem um papel ainda mais relevante por estarem alinhadas às demandas locais, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida das populações que geram esses resíduos, bem como para o enfrentamento de questões relacionadas à segurança e à saúde pública (Poveda-Giraldo; Solarte-Toro; Alzate, 2021).

Principais Periódicos e suas Citações

Foram identificados 67 periódicos responsáveis pela publicação de estudos relacionados à temática analisada, evidenciando a disseminação do conhecimento científico na área. A análise dessa distribuição permite compreender a concentração das publicações e sua evolução ao longo do tempo. A distribuição das publicações entre os periódicos pode ser observada na Figura 05, na qual a coloração dos *clusters* representa o ano médio de publicação, permitindo identificar tendências temporais no desenvolvimento das pesquisas.

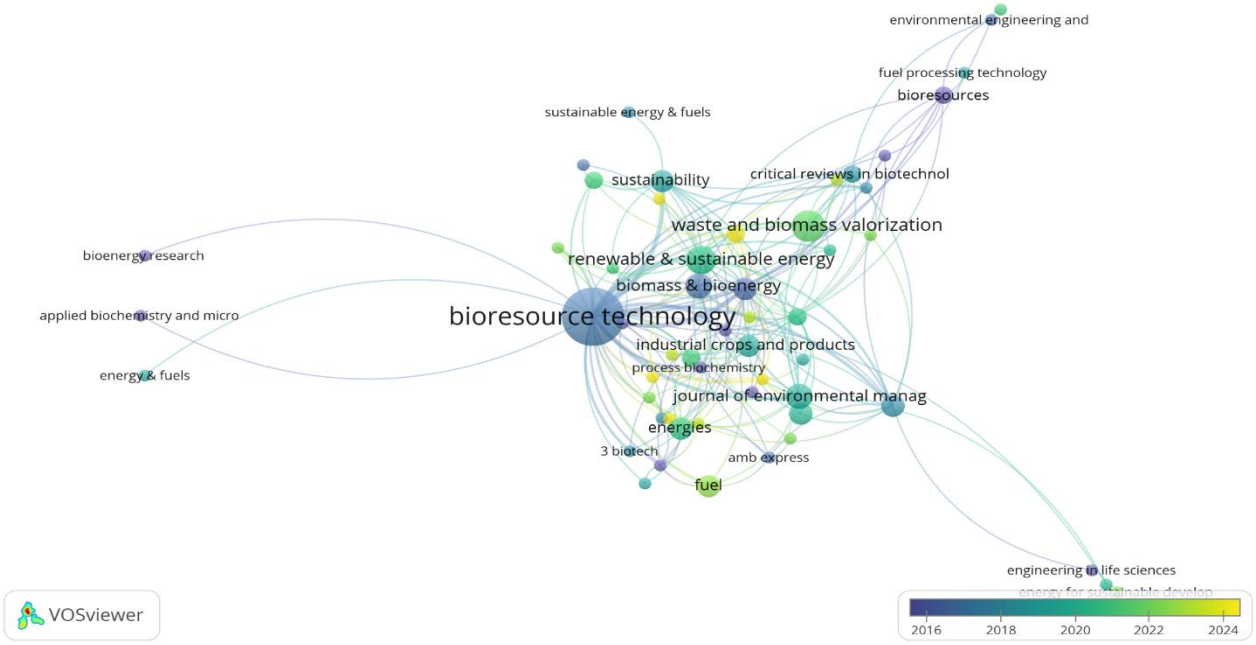


Figura 05: Distribuição das publicações científicas por periódicos, com indicação do ano médio de publicação, evidenciando a evolução temporal das contribuições no período analisado.
Fonte: Os autores (2026)

Dentre os periódicos analisados, destacam-se *Bioresource Technology* (19 documentos e 3898 citações), *Renewable & Sustainable Energy Reviews* (5 documentos e 774 citações), *Journal of Environmental Management* (4 documentos e 402 citações), *Biotechnology for Biofuels* (3 documentos e 285 citações) e *Applied Energy* (1 documento e 229 citações), os quais concentram maior produção científica e expressiva influência no campo de estudo, representando 26, 67% do total de artigos analisados. Esses periódicos apresentam elevados fatores de impacto, correspondendo a 9,0; 16,3; 8,4; 6,1 e 13,8, respectivamente. O fator de impacto é uma métrica que expressa a média de citações recebidas por artigos publicados em um periódico em um determinado período, sendo amplamente utilizado como indicador da relevância e visibilidade científica das revistas.A relevância desses periódicos está associada tanto à sua visibilidade quanto ao seu papel na difusão de pesquisas voltadas à conversão de biomassa lignocelulósica e à produção de biogás, consolidando-os como referências na área. Nesse contexto, observa-se que periódicos com maior fator de impacto concentram parcela significativa das publicações e citações, evidenciando sua importância na consolidação do campo de estudo.

Análise de Coautoria entre Países

Entre 58 países identificados na base de dados, 54 atenderam aos critérios mínimos estabelecidos (mínimo de um documento e cinco citações). A Figura 06 apresenta a rede de coautoria entre países, evidenciando a colaboração científica internacional na área analisada. A Índia liderou o cenário, com 19 documentos e 1.575 citações, resultado que pode ter estado relacionado à grande disponibilidade de resíduos agrícolas e à crescente busca por fontes energéticas sustentáveis no país. Em seguida, destacaram-se os Estados Unidos, com 11 publicações e 799 citações, o que refletiu sua forte infraestrutura científica e os elevados investimentos em inovação voltados ao desenvolvimento de tecnologias de bioenergia e ao aproveitamento energético de resíduos (Zhao; Ge; Li, 2014).

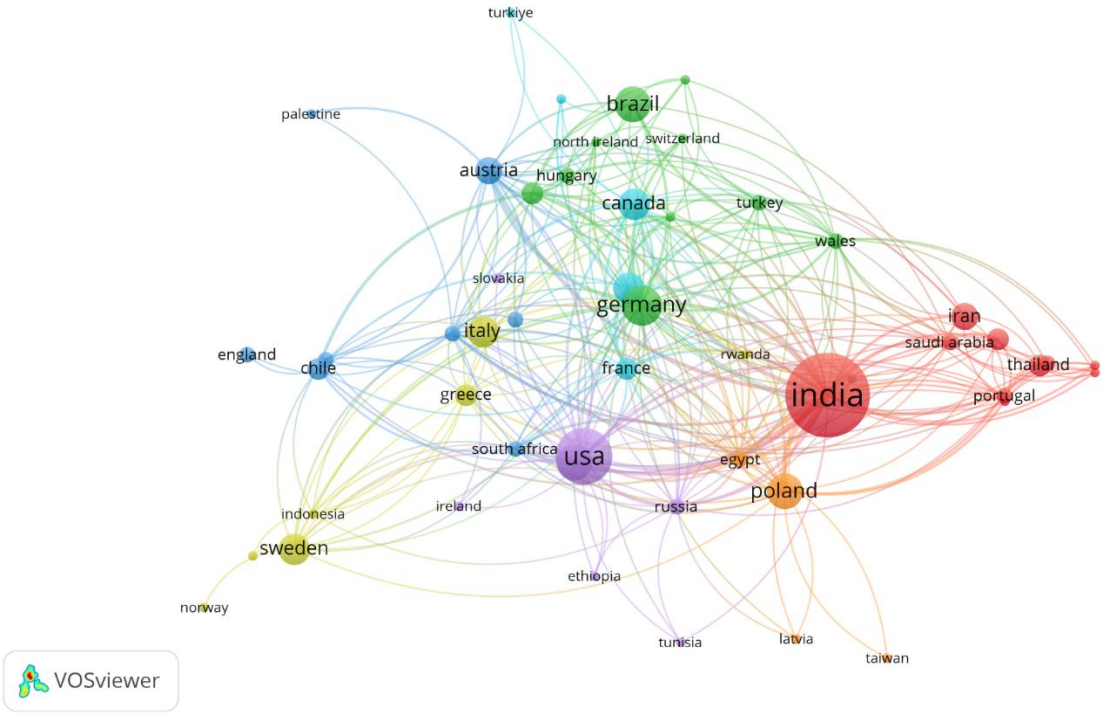


Figura 06: Rede de coautoria científica entre países na área analisada.
Fonte: Os autores (2026)

A Alemanha também apresentou contribuição relevante, com 7 documentos e 525 citações, possivelmente associadas às políticas de transição energética e ao incentivo à produção de energias renováveis. A Polônia, por sua vez, registrou 6 publicações e 307 citações, indicando o crescente interesse europeu no aproveitamento de biomassa e resíduos para fins energéticos, como apontado por Koniuszewska *et al.* (2020).

O Canadá, com 5 documentos e 308 citações, destacou-se pelo investimento em tecnologias sustentáveis e pela atuação em pesquisas voltadas à bioeconomia. Além desses países, o Brasil também apresentou participação relevante, com 6 documentos e 137 citações, resultado que pode ter estado associado à ampla disponibilidade de biomassa e à tradição nacional na produção de biocombustíveis, especialmente a partir da cana-de-açúcar (Silva; Pedezzi; Souto, 2017).

Análise de Palavras-Chave

Foram identificadas 650 palavras-chave, das quais 114 apresentaram pelo menos três ocorrências, critério mínimo adotado para inclusão na análise, sendo posteriormente organizadas em *clusters* com base em suas relações (Figura 7).

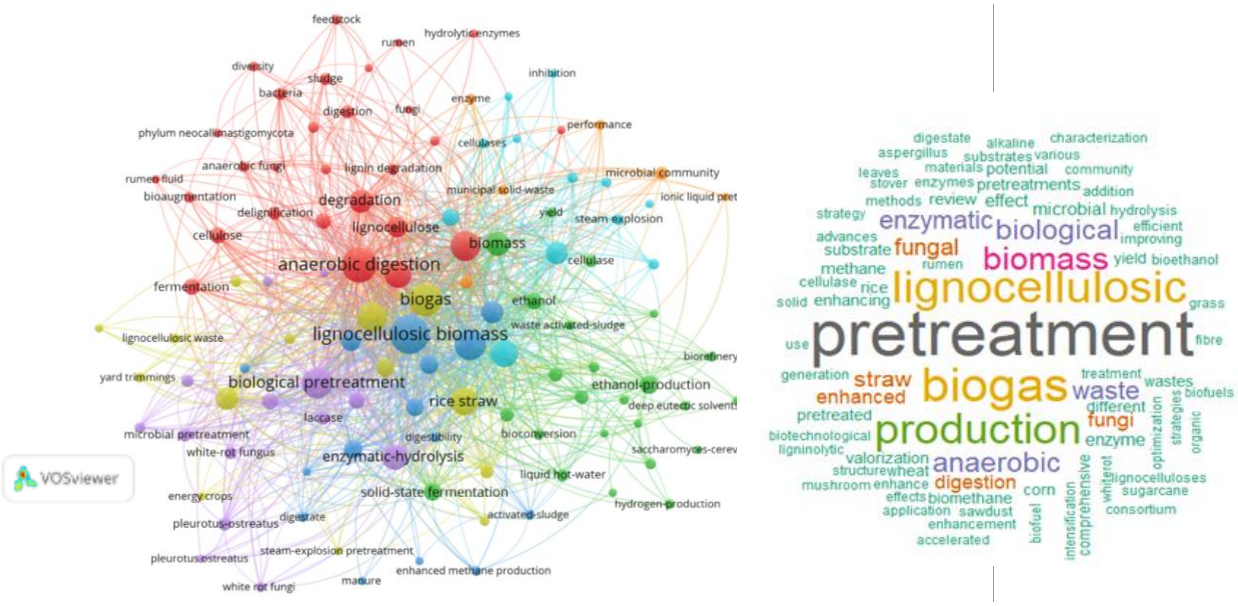


Figura 07: Rede de coocorrência de palavras-chave (*VOSviewer*) e nuvem de palavras dos resumos (*RStudio*). Fonte: Os autores (2026)

Destacou-se a predominância dos termos "*lignocellulosic biomass*" (56) e "*anaerobic digestion*" (47), cujos valores entre parênteses correspondem ao número de ocorrências. Adicionalmente, termos como "*biogas*" (41), "*biological pretreatment*" (36) e "*methane production*" (32) também apresentaram elevada frequência, reforçando a ênfase das pesquisas na aplicação de estratégias de pré-tratamento e na otimização da produção de biogás a partir de materiais lignocelulósicos. A análise dos resumos corroborou esses achados, evidenciando a recorrência de termos como "*biogas*", "*lignocellulosic*", "*pretreatment"* e "*enzymatic*", os quais reforçaram o direcionamento das pesquisas para a digestão anaeróbia e o desenvolvimento de métodos de pré-tratamento biológico voltados à melhoria da eficiência da conversão energética.

Considerações Finais

A análise bibliométrica evidenciou o crescimento e a consolidação das pesquisas sobre a produção de biogás a partir de biomassa lignocelulósica, com destaque para o aumento das publicações a partir de 2010 e concentração entre 2019 e 2022. Os estudos mais influentes enfatizam a importância dos pré-tratamentos biológicos, especialmente enzimáticos e fúngicos, na superação da recalcitrância da biomassa lignocelulósica e no aumento da produção de metano. Observou-se ainda a formação de redes colaborativas consolidadas, com predominância de instituições europeias, além da liderança de países como Índia e Estados Unidos. A concentração das publicações em periódicos de alto impacto e a recorrência de termos-chave associados à digestão anaeróbia e otimização da conversão energética reforçam a maturidade e relevância do campo. Nesse contexto, os pré-tratamentos biológicos se destacaram como estratégias promissoras para o avanço tecnológico e sustentável da produção de biogás.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo suporte institucional para a realização deste trabalho, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa. Agradecem, ainda, o suporte científico e técnico do Núcleo de Biotecnologia (Nubiotec/UFRPE), assim como a infraestrutura disponibilizada pelo Laboratório de Bioprocessos e Bioprodutos (LBB/UFRPE), estendendo este reconhecimento à sua equipe e aos orientadores, cujas contribuições, apoio e colaboração foram essenciais para a execução e o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ACHINIVU, Ezinne C.; MOHAN, Mood; CHOUDHARY, Hemant; DAS, Lalitendu; HUANG, Kaixuan; MAGURUDENIYA, Harsha D.; PIDATALA, Venkataramana R.; GEORGE, Anthe; SIMMONS, Blake A.; GLADDEN, John M.. A predictive toolset for the identification of effective lignocellulosic pretreatment solvents: a case study of solvents tailored for lignin extraction. **Green Chemistry**, Chicago, v. 23, n. 18, p. 7269-7289, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1039/d1gc01186c.

AMIN, Farrukh Raza; KHALID, Habiba; ZHANG, Han; et al. Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. **AMB Express**, Phagwara, v. 7, n. 1, p. 72, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285.

D'ADAMO, Idiano; GASTALDI, Massimo; MORONE, Piergiuseppe. Economic sustainable development goals: assessments and perspectives in europe. **Journal Of Cleaner Productio**n, Roma, v. 354, p. 131730, jun. 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131730.

HENDRIKS, A.T.W.M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, Wageningen, v. 100, n. 1, p. 10–18, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027.

KONIUSZEWSKA, Izabela; KORZENIEWSKA, Ewa; HARNISZ, Monika; CZATZKOWSKA, Malgorzata. Intensification of biogas production using various technologies: A review. **International Journal of Energy Research**, Olsztyn, v. 44, n. 8, p. 6240–6258, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.1002/er.5338

KOUL, Bhupendra; YAKOOB, Mohammad; SHAH, Maulin P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. **Environmental Research**, Phagwara, v. 206, p. 112285, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285.

MOHER, David; LIBERATI, Alessandro; TETZLAFF, Jennifer; ALTMAN, Douglas G.. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: the prisma statement. **Plos Medicine**, Ottawa, v. 6, n. 7, p. 1-10, 2009. DOI: http://dx.doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097.

MUJTABA, Muhammad; FRACETO, Leonardo Fernandes; FAZELI, Mahyar; MUKHERJEE, Sritama; SAVASSA, Susilaine Maira; MEDEIROS, Gerson Araujo de; PEREIRA, Anderson do Espírito Santo; MANCINI, Sandro Donnini; LIPPONEN, Juha; VILAPLANA, Francisco. Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. **Journal Of Cleaner Production**, Espoo, v. 402, p. 136815, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815.

MUSTAFA, Ahmed M.; POULSEN, Tjalfe G.; SHENG, Kuichuan. Fungal pretreatment of rice straw with Pleurotus ostreatus and Trichoderma reesei to enhance methane production under solid-state anaerobic digestion. **Applied Energy**, Hangzhou, v. 180, p. 661–671, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.135.

POVEDA-GIRALDO, Jhonny Alejandro; SOLARTE-TORO, Juan Camilo; CARDONA ALZATE, Carlos Ariel. The potential use of lignin as a platform product in biorefineries: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Manizales, v. 138, p. 110688, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110688.

SANTOS, Liliana Andréa dos; VALENÇA, Rebeca Beltrão; SILVA, Leandro César Santos da; HOLANDA, Sávio Henrique de Barros; SILVA, Anderson Felipe Viana da; JUCÁ, José Fernando Thomé; SANTOS, André Felipe Melo Sales. Methane generation potential through anaerobic digestion of fruit waste. **Journal Of Cleaner Production**, Recife, v. 256, p. 120389-120399, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120389.

SCARLAT, Nicolae; DALLEMAND, Jean-François; MONFORTI-FERRARIO, Fabio; BANJA, Monjola; MOTOLA, Vicenzo. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Ispra, v. 51, p. 969–985, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.062.

SILVA, Ronivaldo Rodrigues; PEDEZZI, Rafael; SOUTO, Tatiane Beltramini. Exploring the bioprospecting and biotechnological potential of white-rot and anaerobic Neocallimastigomycota fungi: peptidases, esterases, and lignocellulolytic enzymes. **Applied Microbiology and Biotechnology**, São Paulo, v. 101, n. 8, p. 3089–3101, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-017-8225-5.

ZABED, Hossain M.; AKTER, Suely; YUN, Junhua; ZHANG, Guoyan; AWAD, Faisal; QI, Xianghui; SAHU, J.N.. Recent advances in biological pretreatment of microalgae and lignocellulosic biomass for biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Zhenjiang, v. 105, p. 105–128, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.048.

ZHAO, Jia; GE, Xumeng; VASCO-CORREA, Juliana; LI, Yebo. Fungal pretreatment of unsterilized yard trimmings for enhanced methane production by solid-state anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, Ohio v. 158, p. 248–252, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.029.

POTENCIAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO DE RESÍDUOS DA BOVINOCULTURA LEITEIRA

1 Ana Carolina Costa Gomes, 2 Jeanne de Baldi Portes, 3 João Vitor Moreschi, 4Marcelo Bortoli

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: anagom@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: jeanneportes@alunos.utfpr.edu.br; 3 Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), e-mail:moreschij27@gmail.com; 4 Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: marcelobortoli@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Cama de gado leiteiro; subproduto; biogás.

Resumo

O crescimento populacional global tem intensificado a demanda por alimentos, destacando a importância da bovinocultura leiteira, especialmente no Sudoeste do Paraná. No entanto, essa atividade gera grandes volumes de resíduos orgânicos, como a cama de gado, que apresenta potencial para produção de energia renovável por meio da digestão anaeróbia. Este estudo teve como objetivo avaliar o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) da cama de gado leiteiro proveniente do sistema *Compost Barn* em Francisco Beltrão (PR), visando analisar sua viabilidade energética. O sistema avaliado possui 46 animais em lactação, e o material absorvente utilizado na cama é maravalha de *Pinus elliottii e Pinus taeda*. A pesquisa foi conduzida em escala laboratorial, com caracterização físico-química do substrato e do inóculo, além da aplicação de ensaios de PBM em sistema de batelada, utilizando diferentes relações inóculo/substrato (2:1, 1:1 e 1:2). Os resultados indicaram que a cama de gado leiteiro apresenta alto teor de sólidos voláteis totais (373,1 gSV/kg). No entanto, como a origem do material absorvente é maravalha, espera-se que o material apresente degradação lenta e que, por ser constituído por material lignocelulósico, a hidrólise seja uma etapa limitante do processo. A melhor performance foi observada na relação 1:2, que apresentou maior produção de biogás e teor de metano de 65,06%, resultando em um PBM de 342,15 NL CH_4/kg SV. Apesar do elevado potencial energético, a presença de H_2S (283 ppm) indica a necessidade de dessulfurização. Conclui-se que a cama de gado tem viabilidade para a geração de energia, contribuindo para a sustentabilidade e a autossuficiência energética em propriedades rurais.

Introdução

Com o crescimento populacional mundial, que atingiu aproximadamente 8,2 bilhões de pessoas em 2025 e pode chegar a 10,4 bilhões até 2100 (ONU, 2022), observa-se um aumento significativo na demanda por alimentos. Nesse contexto, a agricultura desempenha um papel fundamental para atender a essa necessidade crescente. O mercado agrícola mundial tem apresentado expansão ao longo dos anos, alcançando, em 2025, cerca de 30 mil toneladas de carcaças bovinas produzidas e uma produção de leite cru de 372 mil toneladas no mesmo período (OCDE; FAO, 2025).

Essa elevada produção de leite é essencial para a alimentação humana, uma vez que o leite bovino constitui uma importante fonte de nutrientes, como cálcio, zinco e vitaminas do complexo B (BRITO *et al*., 2021). O Brasil no ano de 2024 foi o sexto em produção de leite bovino no mundo, perdendo para Índia, União Europeia, EUA, China e Rússia, conseguindo produzir 4% do volume total produzido no mundo (ROSA DE JESUS *et. al* 2024).

Diante desse cenário, o Brasil consolidou-se, em 2023, como um dos principais produtores de leite bovino, com produção distribuída por todo o território nacional. Destacam-se, nesse contexto, as dez cidades com maior volume produtivo, localizadas predominantemente nas regiões Sudeste, especialmente nos estados de São Paulo e Minas Gerais, e Sul, com ênfase em Paraná e Rio Grande do Sul. Essa concentração produtiva reflete a presença de infraestrutura consolidada, condições edafoclimáticas favoráveis e elevado nível tecnológico na atividade leiteira nessas regiões, contribuindo significativamente para o desempenho do setor no país (Rosa de Jesus *et al.,* 2024).

A bovinocultura leiteira é uma das principais atividades agropecuárias no Sudoeste do Paraná, contribuindo significativamente para a economia regional e, ao mesmo tempo, demandando elevada energia elétrica em seus sistemas de confinamento. Entretanto, essa atividade acaba gerando um grande volume de resíduos orgânicos, principalmente em sistemas fechados que utilizam estruturas como *compost barn* e *free stall*, nos quais os animais permanecem, em tempo integral, confinados. Nesses sistemas, o acúmulo de fezes, urinas e material vegetal absorvente, resulta na formação da chamada cama de gado, um subproduto com alto teor orgânico que, se descartado de forma inadequada, pode ter um impacto ambiental relevante (ZANELLA, 2024).

Entre as alternativas sustentáveis para o tratamento desses resíduos, destaca-se a digestão anaeróbia, processo biológico conduzido por microrganismos na ausência de oxigênio, que transforma a matéria orgânica em biogás – composto principalmente por metano (CH4) – e em efluente rico em nutrientes, com potencial de uso como biofertilizante (CASTRO NETO *et al*., 2023; HOLLIGER *et al*., 2016). A utilização de biodigestores rurais, como os do tipo lagoa coberta, tem ganhado popularidade nas propriedades rurais, principalmente pela possibilidade de geração de energia renovável, de autossuficiência e de redução de impactos ambientais (CIBiogás, 2015).

A cama de gado leiteiro, por conter altos teores de sólidos voláteis (SV) e carbono orgânico, demonstra potencial energético promissor para uso na digestão anaeróbia. Contudo, características como alta lignocelulose, baixa umidade e baixa relação Carbono/Nitrogênio (C/N) podem limitar sua biodegradabilidade e afetar a eficácia do processo (MACHADO *et al.*,

2024). Uma das estratégias cruciais para otimizar o desempenho da degradação de substratos complexos é ajustar a relação inóculo/substrato (I/S), que busca equilibrar a concentração de microrganismos com a carga orgânica disponível, sendo um fator determinante para a eficiência da conversão em biogás.

A cama de confinamento de gado leiteiro apresenta propriedades físico-químicas que reforçam seu potencial como substrato para digestão anaeróbia. O teor de materiais voláteis é geralmente elevado, com variação de 75 a 85%, e nutrientes como fósforo e nitrogênio amoniacal também estão presentes em concentrações significativas, contribuindo para a carga orgânica do material. Estudos de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) indicam que esses resíduos podem alcançar valores próximos a 0,022 m^3 de biogás por quilograma de sólidos voláteis adicionados após aproximadamente 40 dias de fermentação, demonstrando eficácia energética significativa (SANTANA, 2024).

Apesar desse potencial, a composição heterogênea da cama, caracterizada pela presença de lignocelulose e pela variabilidade na relação C/N, considerada ideal entre 20:1 e 30:1 para processos de fermentação anaeróbia (SANTANA, 2024; CAMPOS *et al.*, 2020), ainda representa um desafio à eficiência do processo (HOLLIGER *et al*., 2016).

Apesar do potencial demonstrado pela cama de gado, os resultados de produção de biogás podem variar significativamente conforme os métodos laboratoriais empregados nos testes de PBM. Nesse contexto, Holliger *et al.,* (2016) enfatizam a necessidade de padronização dos estudos de PBM, estabelecendo diretrizes para o preparo do substrato, seleção do inóculo, condições de incubação, monitoramento e interpretação dos dados. Essa metodologia padronizada é essencial para garantir resultados reprodutíveis e permitir comparações confiáveis entre diferentes substratos, como a cama de gado leiteiro.

Nessa situação, torna-se importante investigar o uso da cama de gado como substrato para fermentação anaeróbia em áreas rurais do sudoeste do Paraná, onde predominam sistemas de produção fechados, com confinamento em tempo integral dos animais e a necessidade de autossuficiência energética. Essa abordagem não só permite a recuperação energética de resíduos subutilizados, como também contribui para o desenvolvimento rural sustentável, por meio da autossuficiência energética e do uso racional dos recursos disponíveis.

Com base no que foi exposto, o objetivo geral deste estudo foi avaliar o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) da cama de gado leiteiro produzida em sistema de confinamento, em Francisco Beltrão, sudoeste do Paraná, servindo como subsídio técnico para a análise da viabilidade de aproveitamento energético na propriedade. Para tanto, o estudo se propõe a caracterizar as propriedades físico-químicas da cama de gado, aplicar e validar a metodologia padronizada de PBM utilizando a metodologia proposta por Holliger *et al.,* (2016), para estimar a produção máxima de metano e, finalmente, quantificar o potencial energético do resíduo para a autossuficiência da unidade rural.

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa laboratorial para determinar o potencial bioquímico de metano (PBM) da cama de gado leiteiro, seguida de uma análise da viabilidade energética da aplicação dos resultados em escala real. Os ensaios e a produção experimental serão realizados nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Francisco Beltrão.

Caracterização e coleta das amostras

O substrato avaliado foi a cama de gado leiteiro proveniente de um sistema de confinamento do tipo Compost Barn, localizado em uma propriedade rural produtora de leite no município de Francisco Beltrão, sudoeste do Paraná.

A cama de gado leiteiro é constituída principalmente por maravalha de madeira e dejetos frescos dos animais. Com elevado teor de sólidos e de carbono, a cama de gado apresenta propriedades físico-químicas que a posicionam como um substrato com potencial promissor para a conversão em biogás.

A amostra foi coletada em abril de 2025. Para os testes, a coleta foi realizada na área superficial da cama, garantindo que o material amostrado refletisse as condições operacionais do *Compost Barn*.

Após a coleta do material, foi acondicionado em sacos plásticos herméticos e colocado em refrigeração no laboratório. No laboratório, a amostra foi inicialmente homogeneizada manualmente, por meio de revolvimento cuidadoso, a fim de reduzir a heterogeneidade decorrente da presença de partículas maiores de maravalha e de dejetos frescos. Esse processo assegura que a amostra utilizada nos ensaios de caracterização físico-química e nos testes de PBM seja representativa e adequada, em conformidade com as recomendações de padronização descritas por Holliger *et al*. (2016).

Caracterização físico-química das amostras

O substrato (cama de gado) e o inóculo foram submetidos à caracterização físico-química conforme método padrão (APHA), determinando-se os parâmetros essenciais para o planejamento e a análise dos ensaios PBM. As análises de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV) foram realizadas na UTFPR, Campus de Francisco Beltrão, conforme a metodologia proposta pela APHA (2012). Para parâmetros nutricionais como nitrogênio total Kjedahl (NTK), necessários para o cálculo da relação carbono/nitrogênio, utilizou-se um laboratório terceirizado.

Determinação qualitativa da composição do biogás

A composição do biogás foi determinada com o equipamento Biogas 5000, da Geotech. O equipamento faz medições de CH_4 e CO_2 em percentagem e H_2S e NH_3 em ppm. As análises foram realizadas logo após coletas em saco plástico/alumínio específico para coleta de gases.

Potencial bioquímico de metano (PBM)

A determinação do PBM da cama de gado leiteiro foi conduzida em sistema batelada, sendo adotada a metodologia proposta por Holliger *et al*. (2016), o que garante a padronização e a comparabilidade dos resultados.

Foram realizados três tratamentos, todos em triplicata, além de um controle negativo (somente com inóculo) e de um controle positivo (inóculo e celulose). Os tratamentos foram baseados na relação entre os sólidos voláteis do inóculo e da cama de gado leiteira. Para investigar a influência da proporção de biomassa microbiana no substrato, foram estabelecidas as seguintes relações inóculo/substrato: o primeiro, na proporção 2:1; o segundo, na proporção 1:1; e o terceiro, na proporção 1:2. O volume de biogás produzido foi normalizado às condições normais de temperatura e pressão (CNTP), com base em dados de temperatura ambiente e de pressão atmosférica medidos diariamente no laboratório.

Resultados e discussão

Essa seção apresenta e discute os resultados da caracterização físico-química da cama de gado e dos ensaios de PBM, com o objetivo de determinar o potencial energético do substrato para a bovinocultura leiteira do Sudoeste do Paraná.

Caracterização Físico-Química do Substrato e do Inóculo

Na Tabela 01, apresentam-se os dados de caracterização dos sólidos totais e voláteis da amostra de cama de gado leiteiro e do inóculo utilizado nos testes de PBM.

Amostra	Parâmetros	Valor (g/kg)
Cama de gado	ST	516,1
Cama de gado	SV	373,1
Inóculo	ST	71,20
Inóculo	SV	40,92
Cama de gado	Relação SV/ST	0,723
Inóculo	Relação SV/ST	0,575

Tabela 01. Caracterização dos parâmetros de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV).
Fonte: Autoria Própria (2025)

A cama de gado apresentou elevado teor de sólidos totais (ST), característica típica de resíduos com baixa umidade, geralmente associada ao uso de materiais absorventes como a maravalha. Esse perfil influencia diretamente o processo de biodigestão, podendo dificultar a degradação da matéria orgânica. Nesse contexto, um dos fatores mais críticos é a proporção de sólidos voláteis na base seca (SV/ST), que representa a fração orgânica potencialmente biodegradável e está diretamente relacionada à eficiência na produção de biogás.

Para a cama de gado, a relação SV/ST foi de 72,3%. Apesar de poder ser considerada ótima, essa relação precisa ser observada com cautela, uma vez que a alta presença de materiais fibrosos (maravalha) sugere que a hidrólise pode ser uma etapa limitante do processo anaeróbio, pois a lignina e a celulose dificultam o acesso dos microrganismos ao carbono orgânico, e consequentemente dificultam o processo de acidogênese, mesmo em materiais com alto teor de matéria orgânica. O inóculo, por sua vez, apresentou uma relação SV/ST de 57,5%, valor adequado a um inóculo ativo.

A etapa de hidrólise é a primeira das quatro fases da degradação da matéria orgânica na digestão anaeróbia, responsável pela decomposição de compostos de alta massa molecular em estruturas mais simples. Nesse processo, carboidratos, proteínas e lipídios são convertidos em açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Quanto mais complexo for o composto, maior será a dificuldade de sua degradação, tornando a hidrólise a etapa limitante do processo (AMARAL et al., 2022).

Otimização da Relação Inóculo/Substrato

Na Tabela 02 podem ser observados os resultados acumulados da produção de biogás para os diferentes tratamentos.

Tratamento	Relação I/S ($SV_{inóculo}/SV_{substrato}$)	Produção Acumulada de Biogás (mL)
T1	2:1	330,0
T2	1:1	509,3
T3	1:2	881,1

Tabela 02. Resultados dos ensaios de PBM em três relações Inóculo/Substrato.
Fonte: Autoria Própria (2025).

Os resultados mostram uma relação inversa entre a proporção de inóculo e a produção de biogás. O T3 resultou no maior valor de produção acumulada de biogás durante o estudo, sendo aproximadamente três vezes maior do que o T1, que foi o menor volume produzido. Ao comparar com os dados obtidos por Cani *et al*. (2023), que realizaram a codigestão de dejetos bovinos com bagaço de malte na proporção 1:1, observando um volume acumulado de biogás de 117,5 mL, nota-se que o tratamento T3 do presente estudo apresentou desempenho significativamente superior. De fato, o volume de biogás produzido no T3 foi aproximadamente oito vezes maior do que o observado por Cani *et al*. (2023), evidenciando maior eficiência na produção de biogás nas condições avaliadas.

Os resultados são um indicativo de que a baixa relação inóculo/substrato, 1:2 pode ser justificada pelo caráter lignocelulósico do substrato. Em materiais complexos, a liberação lenta de compostos orgânicos solúveis (devido a hidrólise lenta) evita a sobrecarga orgânica e a inibição por ácidos graxos voláteis, mesmo com uma baixa quantidade relativa de inóculo. O T3 pode, portanto, carregar a máxima quantidade de substrato por reator sem falhar, maximizando a produção de biogás por unidade de massa adicionada. Esse resultado indica que o fator limitante no processo é a velocidade de hidrólise do substrato, não ocorrendo inibição.

Composição e Qualidade do Biogás Produzido

A análise da composição do biogás na condição ótima, tratamento 3 pode ser observada na Tabela 3. O principal resultado da análise foi a concentração de metano (CH4) de 65,06%, o que classifica o biogás como de boa qualidade, situando-o no limite superior da faixa de interesse para a geração de eletricidade e de calor. Este teor elevado de CH_4 é uma consequência direta do sucesso da estratégia de otimização adotada, que conseguiu liberar a energia do material lignocelulósico de forma altamente eficiente.

Componente	Concentração média	Unidade	Implicação
Metano (CH_4)	46,97	%	Potencial energético
Dióxido de carbono (CO_2)	23,33	%	Gás inerte
Oxigênio (O_2)	2,1	%	Contaminação/segurança
Amônia (NH_3)	161,00	%	Nutrição/Inibição
Gás Sulfúrico (H_2S)	282,33	ppm	Corrosão (impureza)
Balanço (Bal)	27,6	%	N_2 e outros inerte

Tabela 03. Composição média do biogás.
Fonte: Autoria Própria (2025).

Em relação à qualidade do biogás produzido no tratamento T3, verificou-se teor de metano de 65,06%, o que o enquadra como biogás de elevado potencial energético, adequado para aplicações em sistemas de conversão, como motogeradores. No entanto, a caracterização das impurezas revelou a presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S), um composto indesejável devido ao seu potencial corrosivo e tóxico. Dessa forma, torna-se tecnicamente necessária a incorporação de uma etapa de dessulfurização, seja por processos físico-químicos ou biológicos, visando à proteção dos equipamentos, ao aumento da vida útil dos sistemas e adequação do biogás aos padrões de utilização energética.

Apesar da necessidade de tratamento complementar do biogás, o elevado potencial metanogênico bruto (PBM) observado no tratamento T3 evidencia a eficiência do processo de biodigestão adotado, constituindo um indicador robusto de desempenho. Esse resultado fornece embasamento técnico consistente para a condução de análises de viabilidade técnico-econômica. A partir da extrapolação desses dados, é possível confirmar o potencial de implementação da tecnologia em escala real, contribuindo significativamente para a autossuficiência energética em sistemas de bovinocultura leiteira e promovendo ganhos ambientais associados ao manejo adequado de resíduos orgânicos.

A remoção do sulfeto de hidrogênio (H_2S) presente no biogás pode ser realizada tanto no interior do biodigestor quanto em etapas posteriores de tratamento. No ambiente interno, destacam-se estratégias como a microaeração controlada e a adição de agentes químicos, como o cloreto férrico ($FeCl_3$), que promovem a oxidação e/ou precipitação do enxofre. Em sistemas externos, empregam-se processos como adsorção (por exemplo, em carvão ativado ou óxidos metálicos), absorção em soluções líquidas e separação por membranas. De modo geral, essas tecnologias podem ser classificadas em rotas biológicas, físicas ou químicas, sendo selecionadas conforme a concentração de H_2S, a escala do sistema e os requisitos de uso do biogás (SILVA; MEZZARI, 2022).

Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

Na tabela 04, observam-se os resultados da produção de biogás e de metano durante os testes em batelada para os três tratamentos. O PBM final foi determinado com base nos resultados do tratamento 3, que adotou a estratégia de integração tecnológica mais eficiente. O valor validade do PBM é de 342,15 $NL_{CH4}/kgSV_{adicionado}$, calculado a partir de 5g de sólidos voláteis (SV) adicionados. Este PBM, novamente elevado, e o crescimento drástico em relação ao T2 confirmam que a tecnologia integrada superou o obstáculo da lignocelulose, liberando o potencial energético da cama de gado.

Tratamento	CH_4 Total produzido (NmL)	CH_4 no Biogás (%)	PBM $\left(\frac{NLCH4}{kg*SV}\right)$
T1	540,99	54,69	144,26
T2	935,22	61,31	187,04
T3	1710,73	65,06	342,15

Tabela 04 Dados obtidos para CH_4 Total produzido em mL, CH_4 no Biogás (%) e o PBM calculado em cada teste realizado. Fonte: Autoria Própria (2025).

Em relação à qualidade do biogás produzido no T3, observou-se teor de metano de 65,06%, o que o classifica como de alta qualidade. Apesar da necessidade de tratamento do gás, o potencial bioquímico de metano (PBM) robusto do tratamento T3 fornece subsídios técnicos relevantes para a análise de viabilidade. Quando esse potencial é considerado, confirma-se a viabilidade da integração da tecnologia, contribuindo para a autossuficiência energética na bovinocultura leiteira.

Considerações finais

O presente estudo atingiu o objetivo de avaliar o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) da cama de gado leiteiro em confinamento, confirmando o sucesso da estratégia de otimização da relação inóculo/substrato e fornecendo subsídio à viabilidade energética.

A caracterização inicial revelou o desafio intrínseco do substrato, que sugere a presença de lignocelulose e impôs a hidrólise como a etapa limitante da digestão anaeróbia. Contudo, a otimização de tecnologias mais eficiente é responsável pela maior produção de metano. Este desempenho culminou em um PBM final elevado, comprovando que a estratégia do T3 foi eficaz para superar o obstáculo da lignocelulose e liberar o potencial energético do resíduo.

A qualidade do biogás também é de alta qualidade, com 65,06% de metano, mas a detecção de H_2S impõe a inclusão, de forma obrigatória, de uma etapa de dessulfurização para prevenir a corrosão dos equipamentos de geração de energia.

O PBM final fornece, assim, o subsídio técnico para a avaliação da viabilidade econômica e de engenharia de processo para possível aproveitamento energético desse material em propriedades de bovinocultura leiteira.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Araucária PR/Edital CENTELHA II (Projeto Nº CEN2023051000013) pela bolsa de Desenvolvimento Tecnológico, à CAPES pela bolsa de mestrado e ao apoio concedido pela Fundação Araucária, por meio de uma bolsa de iniciação científica, e agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio e pela colaboração na pesquisa realizada.

Referências Bibliográficas

AMARAL, A. C. do; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. O processo de biodigestão. In: KUNZ, A. *et al.* **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2. ed. Concórdia: Embrapa, 2022. p. 15–28.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 22 ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.

BRITO, L. F.; BEDERE, N.; DOUHARD, F.; OLIVEIRA, H. R.; ARNAL, M.; PEÑAGARICANO, F.; SCHINCKEL, A. P.; BAES, C. F.; MIGLIOR, F. Review: genetic selection of high-yielding dairy cattle toward sustainable farming systems in a rapidly changing world. *Animal*, v. 15, suppl. 1, p. 100292, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100292.

CAMPOS, C. M. M. et al. Importância da relação C/N na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos: revisão. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 2, p. 227–236, 2020.

CANI, Ariani; TRIPOLI, Kauê Daris; SOARES, Carolina Santos Gonçalves Gerber; ROSÁRIO, Jeane de Almeida do; SOARES, Juliana Ferreira. Produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de dejetos bovinos e suínos com bagaço de malte. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 6., 2023. Anais [...]. [S. l.]: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento (IBEAS), 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.XV-002. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2023/XV-002.pdf. Acesso em: 30 mar. 2026.

CASTRO NETO, A. R. de et al. Produção de biogás a partir de resíduos agropecuários: avanços e perspectivas no Brasil. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 12, n. 2, p. 55–72, 2023.

CIBIOGÁS. Estudo de viabilidade técnica e econômica da digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais. Foz do Iguaçu: Centro Internacional de Energias Renováveis, 2015.

HOLLIGER, C. et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 2016. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2016.336.

MACHADO, A. P. et al. Co-digestão anaeróbia de resíduos agropecuários: potencial energético e limitações tecnológicas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 29, n. 1, p. 1–12, 2024.

OCDE; FAO. *OECD-FAO Agricultural Outlook*. OECD Agriculture Statistics (banco de dados), 2025. Disponível em: http://data-explorer.oecd.org/s/1hc.O. Acesso em: 30 mar. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Population Data Portal*. Disponível em: https://population.un.org/dataportal/. Acesso em: 30 mar. 2026.

ROSA DE JESUS, L.; VIEIRA, P. R. P.; PEREIRA, S. G.; OLIVEIRA, N. M. de. Produção de leite no Brasil, Minas Gerais e mesorregião do Alto Paranaíba: uma breve revisão narrativa de literatura. *Scientia Generalis*, v. 5, n. 2, p. 500–507, 2024. DOI: https://doi.org/10.22289/sg.V5N2A53. Disponível em: https://scientiageneralis.com.br/index.php/SG/article/view/631. Acesso em: 30 mar. 2026.

SANTANA, A. B. S. Caracterização físico-química e potencial de produção de biogás da cama de confinamento de bovinos de leite. Francisco Beltrão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso.

SILVA, Marcio Luis Busi da; MEZZARI, Melissa Paola. Tratamento e purificação de biogás. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. 2. ed. Concórdia: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2022. cap. IV.

ZANELLA, B. C. Aproveitamento energético de dejetos da bovinocultura leiteira em biodigestores rurais no Sudoeste do Paraná. Francisco Beltrão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.

POTENCIAL DE CO-LOCALIZAÇÃO ENTRE AQUICULTURA MARINHA E ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO LITORAL DO RIO DE JANEIRO: UMA ANÁLISE BASEADA EM EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

1 João Pedro dos Santos Krahe, 2 Kayo Cezar Freitas Soares, 3 Thaís Ascoli Morrete, 4 Jéssica Bandeira Pereira

1 Arvut Engenharia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), e-mail: jpskrahe@gmail.com; 2 Arvut Engenharia e Meio Ambiente, e-mail: kayo@arvut.com.br; 3 Arvut Engenharia e Meio Ambiente, e-mail: coordenacao03@arvut.com.br; 4 Arvut Engenharia e Meio Ambiente, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e-mail: jessica_rp95@hotmail.com

Palavras-chave: aquicultura offshore; infraestrutura compartilhada offshore; multi-use marinho.

Resumo

A crescente demanda por fontes de energia renovável e a intensificação do uso do espaço marinho vêm impulsionando o uso de estratégias integradas de uso múltiplo (*multi-use*) dos oceanos. Nesse contexto, a co-localização entre aquicultura marinha e parques eólicos *offshore* surge como uma alternativa promissora para otimizar a ocupação espacial e a sustentabilidade das atividades marítimas. A partir disso, tendo em vista o potencial para a atividade na região, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de integração entre sistemas aquícolas e futuros empreendimentos eólicos *offshore* no litoral do Rio de Janeiro. Para tal, a metodologia foi estruturada em duas etapas: (i) levantamento da literatura científica internacional sobre experiências de co-localização entre sistemas aquícolas e empreendimentos de geração eólica *offshore* e (ii) análise das atividades de maricultura já desenvolvidas no litoral do estado do Rio de Janeiro. A partir desses dados, foi conduzida uma análise comparativa, visando identificar modelos aquícolas com potencial de adaptação ao contexto do litoral fluminense. Os resultados sugerem que sistemas de cultivo de baixo nível trófico, como moluscos bivalves e macroalgas, apresentam maior compatibilidade com ambientes *offshore*, devido à menor complexidade operacional, menor dependência de insumos externos e maior resiliência às condições ambientais. Por outro lado, o cultivo de peixes marinhos, embora tecnicamente viável, apresenta maiores desafios relacionados a custos, infraestrutura e operação nesses ambientes. No litoral do Rio de Janeiro, a maricultura caracteriza-se, predominantemente, por sistemas de pequena escala instalados em áreas costeiras abrigadas, com destaque para o cultivo de moluscos e o crescimento recente da produção de macroalgas, especialmente da espécie exótica *Kappaphycus alvarezii*. A análise comparativa sugere que a implementação da co-localização no contexto brasileiro deve ocorrer de forma gradual, priorizando sistemas mais simples e já estabelecidos regionalmente. Conclui-se que, embora promissora, a integração entre aquicultura e energia eólica *offshore* depende de avanços tecnológicos, adequação às condições ambientais locais e fortalecimento de instrumentos de planejamento espacial marinho.

Introdução

As mudanças climáticas, impulsionadas pelo uso de fontes de energia fósseis, vem acelerando a procura por fontes renováveis capazes de atender as demandas energéticas globais (BILGILI; ALPHAN, 2022). A geração eólica surge como uma fonte capaz de reduzir a emissão de dióxido de carbono, a poluição radioativa, a liberação de substâncias perigosas e a utilização de recursos não renováveis (ESTEBAN *et al*., 2011; LEUNG; YANG, 2012; MARTÍNEZ *et al.*, 2009A, 2009B; SAIDUR *et al.,* 2010). Mais recentemente, a energia eólica *offshore* vem ganhando destaque e ampla participação nessa transição, ampliando a participação de fontes renováveis na geração energética (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2023). Em comparação aos parques eólicos *onshore*, os parques no ambiente marinho possuem, principalmente, maior potencial de vento e, por consequência, maior potencial de geração de energia (BERGSTRÖM; SÖDERBERG, 2008).

A expansão desses empreendimentos vem aumentando a competição pelo espaço marinho, tendo em vista que diversas atividades econômicas e ecológicas dependem de tais áreas (BOUSSARIE *et al.*, 2023). A partir dessa problemática, o planejamento espacial marinho vem sendo utilizado com o objetivo de organizar e viabilizar diferentes usos do espaço oceânico. Com essa metodologia, busca-se, entre outros, reduzir conflitos e promover o desenvolvimento sustentável das atividades marítimas (DOUVERE, 2008). Dentro desse contexto, vem ganhando destaque o conceito de uso múltiplo do espaço marinho (*multi-use*), que propõe a integração de diferentes atividades em uma mesma área, como geração de energia e outras formas de exploração dos recursos marinhos (STUIVER *et al.*, 2016). A co-localização entre parques eólicos *offshore* e sistemas de aquicultura marinha é uma das alternativas mais discutidas atualmente, sendo uma estratégia que pode otimizar o uso da infraestrutura existente, reduzir conflitos espaciais e gerar benefícios econômicos e ambientais (MICHLER-CIELUCH; KRAUSE; BUCK, 2009).

No contexto europeu, vem sendo avaliada a possibilidade de cultivo de moluscos bivalves, macroalgas e peixes em áreas localizadas no interior ou nas proximidades de parques eólicos no ambiente marinho, aproveitando as estruturas já existentes. Alguns resultados indicam que espécies de baixo nível trófico, como mexilhões e macroalgas, apresentam elevado potencial para esse tipo de sistema (GIMPEL *et al.*, 2015). Além disso, o cultivo de peixes em sistemas semelhantes também

vem sendo discutido, destacando o potencial de espécies marinhas de alto valor comercial em estruturas integradas de produção aquícola e geração energética (MIRANDA *et al.*, 2025). Tais resultados indicam que a co-localização entre aquicultura e geração de energia pode contribuir para a diversificação produtiva do ambiente marinho e, desse modo, ampliar a produção sustentável de alimentos e otimizar o uso das áreas destinadas à infraestrutura energética.

O Brasil apresenta elevado potencial para o desenvolvimento dessa tecnologia ao longo de sua zona costeira. Apesar disso, a energia eólica *offshore* ainda se encontra em estágio inicial de planejamento e licenciamento no país. Estudos conduzidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020) indicam que o potencial eólico nas plataformas continentais de águas rasas do Brasil pode alcançar aproximadamente 700 GW de capacidade instalada. Nesse contexto, o litoral do Sudeste brasileiro destaca-se como um dos mais favoráveis para a implantação de parques eólicos *offshore*, em função, principalmente, de seu regime de ventos e da disponibilidade de áreas marinhas adequadas. Paralelamente, a região também apresenta iniciativas relacionadas à maricultura, atividade já presente em amplos trechos da costa sudeste brasileira, incluindo áreas do litoral do Rio de Janeiro (LANDUCI *et al*., 2021).

A partir disso, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de co-localização entre sistemas de aquicultura marinha e empreendimentos de geração eólica *offshore* no litoral do estado do Rio de Janeiro. Para isso, são apresentados dados internacionais de integração entre aquicultura e parques eólicos no ambiente marinho, assim como uma análise das atividades aquícolas já desenvolvidas no litoral fluminense, buscando identificar quais modelos produtivos apresentam maior potencial de aplicação no contexto regional.

Materiais e Métodos

O presente estudo possui caráter exploratório e baseou-se em revisão bibliográfica e análise sobre a integração entre aquicultura marinha e parques eólicos *offshore* no contexto do litoral do Rio de Janeiro. A metodologia foi estruturada em duas etapas principais: (i) levantamento da literatura científica internacional sobre experiências de co-localização entre sistemas aquícolas e empreendimentos de geração eólica *offshore* e (ii) análise das atividades de maricultura já desenvolvidas no litoral do estado do Rio de Janeiro. A partir da análise comparativa entre as semelhanças das atividades, objetivou-se avaliar o potencial de aplicação desses modelos no contexto regional.

Para a revisão bibliográfica, foram consultadas as bases de dados científicas *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*, frequentemente utilizadas em pesquisas acadêmicas. A estratégia de busca foi estruturada por meio da combinação de palavras-chave utilizando operadores booleanos (AND, OR), conforme descrito por Foo e colaboradores (2021). Tal abordagem visa maximizar a abrangência e a relevância do levantamento bibliográfico.

Visando a identificação de estudos relacionados à aquicultura marinha e sua aplicação ou viabilidade em parques eólicos *offshore*, foram utilizadas combinações de termos associados à geração de energia eólica no ambiente marinho, aquicultura e uso múltiplo do espaço oceânico. Elas foram estruturadas da seguinte forma: ("*offshore wind farm**" OR "*offshore wind energy*" OR "*offshore wind turbine**") AND (*aquaculture* OR *mariculture* OR "*marine aquaculture*") AND ("*co-location*" OR "*multi-use*" OR "*marine spatial planning*").

Além disso, para o levantamento de estudos relacionados à aquicultura marinha no litoral do estado do Rio de Janeiro, foram utilizadas combinações de palavras-chave voltadas a tal contexto, organizadas da seguinte forma: ("*marine aquaculture*" OR *mariculture* OR *aquaculture*) AND ("Rio de Janeiro" OR "*southeast Brazil*").

As buscas foram realizadas com delimitação temporal entre 2000 e 2025. Foram priorizados artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais que apresentassem informações sobre sistemas de produção aquícola, espécies cultivadas e experiências de integração com infraestruturas *offshore*.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, a amostra final foi composta por 10 documentos, sendo 5 de caráter internacional focados em co-localização e 5 voltados especificamente à maricultura no Rio de Janeiro. Com base nesse conjunto, procedeu-se à análise qualitativa das experiências internacionais, com enfoque nos principais modelos produtivos descritos na literatura. Paralelamente, realizou-se o levantamento das espécies cultivadas e dos sistemas de maricultura desenvolvidos na região.

Com base nessas etapas, realizou-se uma análise comparativa visando identificar quais modelos de produção aquícola apresentam maior potencial de adaptação ao contexto ambiental e produtivo do litoral fluminense. Para tal, foram considerados aspectos como tipo de cultivo, nível trófico das espécies e viabilidade técnica.

Resultados

O cultivo de moluscos bivalves destaca-se como uma das alternativas mais promissoras para integração de aquicultura com parques eólicos *offshore*. Estudos pioneiros, como o de Michler-Cieluch, Krause e Buck (2009), demonstraram a viabilidade do cultivo de mexilhões (*Mytilus edulis*) em estruturas do tipo *longline* associadas a turbinas eólicas no Mar do Norte. As fundações das turbinas e os sistemas de ancoragem podem ser utilizados como suporte para as estruturas aquícolas, contribuindo para a otimização do uso da infraestrutura. Paralelamente, o cultivo de macroalgas também vem sendo apontado como uma alternativa compatível com sistemas *offshore*, especialmente devido ao seu baixo nível trófico e à capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos, como a absorção de nutrientes e a captura de carbono. Gimpel e seus colaboradores (2015) indicam que espécies como *Saccharina latissima* apresentam elevado potencial para cultivo de modo integrado às estruturas dos parques eólicos.

Além dos sistemas de baixo nível trófico, o cultivo de peixes associado a parques eólicos *offshore* também vem sendo explorado pela literatura. Diversas configurações de estruturas aquícolas têm sido desenvolvidas e aprimoradas nas últimas

décadas, como gaiolas flutuantes, semissubmersíveis e submersas (MUIR; SCOTT, 2000; CHU *et al.,* 2020). Estes sistemas, apesar de mais complexos, apresentam potencial para a produção de espécies de alto valor comercial, contribuindo para a diversificação produtiva e intensificação do uso econômico do espaço marinho (MIRANDA *et al.*, 2025).

Uma síntese dessas abordagens é apresentada por Miranda e seus colaboradores (2025), que compilaram diferentes modelos de sistemas aquícolas *offshore* e suas características estruturais e ambientais, assim como suas vantagens e desvantagens. A Tabela 1 apresenta uma adaptação dessa síntese.

Sistema aquícola	Tipo de estrutura	Dimensões	Condições ambientais	Vantagens	Desvantagens
Peixes	Gaiola flutuante flexível (SeaQurePen)	Diâmetro até 200 m	Corrente: até 1,5 m/s; Ondas: até 4 m	Baixo custo de instalação; Fácil implantação	Alta deformação estrutural; Acesso limitado em condições severas
	Gaiola flutuante rígida (Havfarm)	~430 m × 60 m	Ondas: até 12 m	Alta estabilidade; Plataforma operacional eficiente	Alto custo de capital; Necessidade de infraestrutura portuária
	Gaiola semissubmersível flexível (Refa)	~28 m de diâmetro	–	Baixo custo; Evita camada superficial em tempestades	Alta deformação estrutural
	Gaiola semissubmersível rígida (Ocean Farm 1)	~110 m de diâmetro; 68 m altura	Corrente: ~0,75 m/s; Ondas: até 6 m	Alta estabilidade; Permite automação	Alto custo; Necessidade de monitoramento estrutural
	Gaiola submersa (Aquapod)	Diâmetro > 20 m	Ondas: até 15 m	Operação remota; Evita condições superficiais severas	Baixa visibilidade; Operação complexa
	Tanque fechado (EGGET)	~9 m altura × 7 m largura	–	Controle da qualidade da água; Proteção contra patógenos	Alto custo; Dependência energética
	Estrutura fixa de fundo (Genghai 1)	>80 m diâmetro; ~60 m altura	–	Alta resistência ambiental; Plataforma estável	Alto custo; Possível impacto em bentos
Moluscos	Longline com linhas suspensas	Linhas até 200 m; suspensões até 10 m	Corrente: ~1 m/s; Ondas: >10 m	Baixo custo; Adequado a áreas energéticas	Perda de juvenis em eventos extremos
Macroalgas	Sistema longline	Linhas até 200 m; profundidade até 4 m	Corrente: ~1,15 m/s; Ondas: até 4 m	Baixo custo; Alto valor agregado; Sequestro de carbono	Risco de danos estruturais em eventos extremos

Tabela 1: Principais sistemas de aquicultura com potencial de integração a parques eólicos *offshore*.
Fonte: Adaptado de MIRANDA *et al.* (2025).

De maneira geral, as experiências internacionais demonstram que a co-localização entre aquicultura e parques eólicos *offshore* é uma estratégia potencialmente viável, especialmente para sistemas de cultivo de baixo nível trófico, como moluscos bivalves e macroalgas (MICHLER-CIELUCH; KRAUSE; BUCK, 2009; GIMPEL *et al.*, 2015; MIRANDA *et al.*, 2025). Esses sistemas apresentam maior compatibilidade com os ambientes *offshore* e menor complexidade estrutural e funcional. Por outro lado, o cultivo de peixes, embora promissor, demanda maior investimento e desenvolvimento tecnológico (CHU *et al.*, 2020; MIRANDA *et al.*, 2025). Esses resultados fornecem subsídios importantes para a avaliação da aplicabilidade desse modelo em outras regiões, como o litoral brasileiro.

No Sudeste nacional, a aquicultura marinha é caracterizada pela diversidade de espécies cultivadas e pela predominância de sistemas produtivos de pequena escala, ainda em processo de consolidação. No Rio de Janeiro, especificamente, destacam-se os cultivos de moluscos bivalves, peixes marinhos e macroalgas. Estas atividades são desenvolvidas, principalmente, em ambientes costeiros abrigados e com a utilização de tecnologias relativamente simples (LANDUCI *et al.*, 2021).

Entre os moluscos bivalves, a região apresenta o cultivo da vieira (*Nodipecten nodosus*), do mexilhão (*Perna perna*) e da ostra do Pacífico (*Crassostrea gigas*) (ABELIN; DE ARAÚJO; ROMBENSO, 2016; LANDUCI *et al.*, 2021). Geralmente, essas culturas são realizadas por meio de sistemas suspensos, como *longlines*, adaptados às condições de baixa hidrodinâmica

encontradas em baías e estuários da região. Essas atividades apresentam caráter predominantemente artesanal e de pequena escala, geralmente associadas a comunidades tradicionais.

A piscicultura marinha da região, por outro lado, ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento, sendo predominantemente realizada em sistemas de tanques-rede de pequena escala. Entre as espécies cultivadas, destaca-se o beijupirá (*Rachycentron canadum*), cuja produção vem aumentando ao longo dos últimos anos, embora ainda pouco volumosa e produtiva (LANDUCI *et al.*, 2021; VALENTI *et al.*, 2021). Esses resultados refletem a complexidade da criação de peixes em ambientes marinhos, especialmente no que se refere à adaptação de sistemas a condições ambientais mais energéticas.

A viabilidade do cultivo de macroalgas no litoral sudeste brasileiro vem sendo indicada por meio de estudos e relatórios técnicos, como o Boletim da aquicultura em águas da União: relatório anual de produção (RAP) (BRASIL, 2024). No Rio de Janeiro, destaca-se a criação da espécie exótica *Kappaphycus alvarezii*, com ocorrência em trechos do litoral entre a Baía de Sepetiba e regiões adjacentes (LANDUCI *et al.*, 2021). Dados recentes publicados pelo Ministério da Pesca e Aquicultura indicam que a produção dessa espécie vem aumentando rapidamente no estado, conquistando elevada representatividade na aquicultura marinha na região (BRASIL, 2024). Esses dados evidenciam o alto potencial da atividade, embora ainda concentrada em uma única espécie cultivada.

A aquicultura marinha no litoral do Rio de Janeiro concentra-se em áreas costeiras abrigadas, cujas condições hidrodinâmicas favorecem a instalação de estruturas aquícolas. No entanto, essas áreas estão sujeitas à pressão antrópica, incluindo poluição e contaminação, o que pode comprometer a qualidade da água e a viabilidade dos cultivos (LANDUCI *et al*., 2021; GUTIÉRREZ *et al*., 2019). Este é um dos fatores que mais limita a expansão da atividade em ambientes costeiros.

De maneira geral, a maricultura no Rio de Janeiro é caracterizada por um sistema ainda em desenvolvimento, baseado em tecnologias de baixa a média complexidade e limitado por questões ambientais e estruturais. Tais resultados demonstram as limitações à expansão da atividade nos ambientes costeiros da região, reforçando a necessidade de avaliação dos modelos produtivos em ambientes *offshore*.

Discussão

Os resultados obtidos no presente estudo evidenciam que a co-localização entre aquicultura marinha e parques eólicos *offshore* é uma estratégia tecnicamente viável e bem estruturada. Apesar disso, é uma atividade dependente das características ambientais, tecnológicas e produtivas de cada região. A partir da análise comparativa entre experiências internacionais e o contexto do litoral do Rio de Janeiro, torna-se possível identificar tanto oportunidades quanto limitações relevantes para a aplicação desse modelo no Brasil.

No cenário internacional, evidencia-se uma maior maturidade tecnológica e operacional dos sistemas aquícolas *offshore*, culminando na integração com infraestruturas energéticas marinhas. Estudos como os de Michler-Cieluch, Krause e Buck (2009) e Gimpel e seus colaboradores (2015) demonstram que o cultivo de organismos de baixo nível trófico, como moluscos bivalves e macroalgas, apresenta elevada compatibilidade com parques eólicos *offshore*, principalmente, devido à menor demanda por insumos externos, menor complexidade operacional e maior resiliência às condições ambientais. Em adição, tais sistemas contribuem para a prestação de serviços ecossistêmicos, como a remoção de nutrientes e a captura de carbono, reforçando sua relevância no uso sustentável do espaço marinho.

Enquanto isso, a criação de peixes marinhos em ambientes *offshore*, apesar de viável, apresenta desafios relacionados à complexidade estrutural, custos operacionais e necessidade de monitoramento constante (CHU *et al.,* 2020; MIRANDA *et al.*, 2025). Tais fatores limitam a aplicabilidade desses sistemas em regiões onde a atividade aquícola se encontra em estágio inicial de desenvolvimento, como é o caso do litoral do Rio de Janeiro. Dessa forma, a viabilidade desta forma de cultivo marinho depende de avanços tecnológicos, planejamento adequado e políticas públicas.

A maricultura do litoral fluminense encontra-se em estágios iniciais de desenvolvimento, predominantemente caracterizada por sistemas de pequena escala, instalados em ambientes costeiros abrigados e com baixa a média complexidade tecnológica (LANDUCI *et al.*, 2021). A partir disso, é possível identificar três sistemas com maior relevância regional. O cultivo de moluscos bivalves representa o segmento mais tradicional e estruturado, apresentando forte inserção socioeconômica em comunidades costeiras, embora ainda limitado. Por outro lado, o cultivo de macroalgas vem apresentando crescimento recente e elevado potencial de expansão, impulsionado, principalmente, pela produção de *Kappaphycus alvarezii*. Por fim, a piscicultura marinha encontra-se em estágio inicial de desenvolvimento, com baixa representatividade e apresentando desafios técnicos associados à complexidade desses sistemas. Essa diferenciação entre os modelos de cultivo é fundamental para a avaliação do potencial de integração com parques eólicos *offshore*.

As atividades aquícolas de moluscos bivalves e macroalgas apresentam maior potencial de aplicabilidade às condições de operação em ambientes *offshore*, especialmente em função do uso de estruturas suspensas, como *longlines*, com menor exigência de manejo intensivo. Além disso, no caso das macroalgas, a possibilidade de geração de serviços ecossistêmicos, como a absorção de nutrientes e a captura de carbono, reforça seu potencial no contexto de uso sustentável do espaço marinho (GIMPEL *et al.,* 2015). Paralelamente, a piscicultura marinha, embora apresente elevado potencial econômico, demanda estruturas mais complexas, maior controle operacional e investimentos elevados. Tais fatores limitam sua aplicabilidade em cenários de co-localização no contexto brasileiro (CHU *et al.,* 2020; MIRANDA *et al.*, 2025). Dessa forma, sua integração com parques eólicos *offshore* tende a depender de avanços prévios da tecnologia e da consolidação da atividade em escala regional.

É importante ressaltar que a predominância atual de sistemas aquícolas em áreas costeiras abrigadas no estado do Rio de Janeiro está associada, em grande parte, à busca por condições ambientais mais estáveis e menor exposição a eventos

extremos. Portanto, a transição para ambientes *offshore* com maior energia hidrodinâmica representa um desafio técnico, exigindo adaptações estruturais e operacionais nos sistemas de cultivo.

Os resultados apontam que os cultivos de moluscos bivalves e macroalgas configuram-se como as alternativas mais promissoras para integração com parques eólicos *offshore* no litoral do Rio de Janeiro, em função, principalmente, de sua menor complexidade operacional, menor dependência de insumos externos e maior compatibilidade com estruturas suspensas. Além disso, trata-se de atividades já estabelecidas no contexto regional, o que favorece sua adaptação a novos ambientes. Apesar disso, essa adequação deve ser analisada junto às condições ambientais locais, incluindo fatores como hidrodinâmica, qualidade da água e disponibilidade de áreas para a instalação dos sistemas. No caso das macroalgas, embora o cultivo de *Kappaphycus alvarezii* apresente elevado potencial e crescimento recente na região, a dependência de uma espécie exótica levanta preocupações relevantes, especialmente no que diz respeito ao risco de dispersão e impactos sobre ecossistemas nativos. Dessa forma, a expansão dessa atividade no contexto *offshore* deve ser conduzida com planejamento minucioso e cautela, incorporando avaliações de risco e estratégias de monitoramento ambiental.

A consolidação da energia eólica *offshore* no Brasil pode representar não apenas uma alteração da matriz energética, mas também uma oportunidade para reconfiguração do uso do espaço marinho. A integração com a maricultura, especialmente por meio de sistemas de baixo nível trófico, representa uma alternativa capaz de articular produção de alimentos e geração de energia renovável. Considerando o elevado potencial eólico da costa brasileira, a adoção de modelos de uso múltiplo (*multi-use*) pode e deve ser realizada, contribuindo para o desenvolvimento de uma economia azul mais integrada e resiliente.

Por fim, a implementação de sistemas de co-localização no litoral brasileiro dependerá não apenas da viabilidade técnica dos sistemas produtivos, mas também do avanço em aspectos regulatórios, planejamento espacial marinho e desenvolvimento tecnológico. Nesse sentido, os resultados deste estudo indicam que a adoção de abordagens graduais, priorizando sistemas de menor complexidade e maior compatibilidade ambiental, pode representar um caminho mais viável e estratégico para a integração entre aquicultura marinha e parques eólicos *offshore* no contexto nacional.

Considerações Finais

Os resultados deste estudo indicam que a co-localização entre aquicultura marinha e parques eólicos *offshore* é uma estratégia promissora para a otimização do uso do espaço oceânico, integrando produção de alimentos e geração de energia renovável. As evidências internacionais demonstram que sistemas aquícolas de baixo nível trófico, como o cultivo de moluscos bivalves e macroalgas, apresentam maior compatibilidade com infraestruturas eólicas *offshore*, destacando-se, portanto, como modelos prioritários para implementação.

No litoral do Rio de Janeiro, a maricultura apresenta características estruturais que limitam a transposição imediata desse modelo para ambientes *offshore*, incluindo a predominância de sistemas de pequena escala, baixa complexidade tecnológica e dependência de condições costeiras abrigadas. Ainda assim, a presença consolidada do cultivo de moluscos e o crescimento recente da produção de macroalgas indicam oportunidades para adaptação gradual desses sistemas a cenários de maior energia, como aqueles associados a parques eólicos *offshore*.

Apesar disso, a implementação desse modelo no contexto brasileiro requer a superação de diversos desafios. Destacam-se, entre eles, a necessidade de adaptação das tecnologias aquícolas para condições *offshore*, a ampliação do conhecimento sobre os efeitos ambientais da co-localização e o fortalecimento de políticas públicas. Em adição, aspectos específicos, como o uso de espécies exóticas no cultivo de macroalgas, devem ser cuidadosamente avaliados, considerando seus potenciais riscos ecológicos.

Conclui-se que a integração entre aquicultura marinha e parques eólicos *offshore* apresenta elevado potencial no litoral do Rio de Janeiro, mas sua aplicação depende de uma abordagem gradual, baseada em evidências científicas, inovação tecnológica e adequação às condições ambientais e socioeconômicas locais. Estudos futuros devem priorizar análises experimentais e projetos-piloto em escala regional, de modo a validar a aplicabilidade desses sistemas e subsidiar a tomada de decisão no âmbito da gestão costeira e marinha.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Arvut Engenharia e Meio Ambiente pelo apoio institucional e pela oportunidade de representação da empresa no evento, o que possibilitou o desenvolvimento e a consolidação deste trabalho. Agradecem também às instituições e pesquisadores cujos estudos contribuíram para a fundamentação teórica e análise apresentada.

Referências Bibliográficas

ABELIN, P.; DE ARAÚJO, A. L.; ROMBENSO, A. N. Current status of scallop culture in Brazil. *World Aquaculture*, v. 47, n. 3, p. 12–17, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/308740809_Current_Status_of_Scallop_Culture_in_Brazil. Acesso em: 04 abr. 2026.

BERGSTROM, H.; SÖDERBERG, S. Wind mapping in Sweden: summary of results and methods used. *Elforsk Report*, v. 9, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284778715_Wind_mapping_in_Sweden_-_Summary_of_results_and_methods_used. Acesso em: 05 abr. 2026.

BILGILI, M.; ALPHAN, H. Global growth in offshore wind turbine technology. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 24, n. 7, p. 2215–2227, 2022. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1202466/v1. Acesso em: 03 abr. 2026.

BOUSSARIE, G.; KOPP, D.; LAVIALLE, G.; MOUCHET, M.; MORFIN, M. Marine spatial planning to solve increasing conflicts at sea: a framework for prioritizing offshore windfarms and marine protected areas. *Journal of Environmental Management*, v. 339, p. 117857, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117857. Acesso em: 07 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Pesca e Aquicultura. *Boletim da aquicultura em águas da União: relatório anual de produção (RAP) – 2024*. Brasília, DF: MPA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mpa/pt-br/assuntos/aquicultura/aquicultura-em-aguas-da-uniao/boletim-da-aquicultura_digitalv2-compactado.pdf. Acesso em: 05 abr. 2026.

CHU, Y.; WANG, C. M; PARK, J. C.; LADER, P. Review of cage and containment tank designs for offshore fish farming. *Aquaculture*, v. 519, p. 734928, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734928. Acesso em: 02 abr. 2026.

DOUVERE, F. The importance of marine spatial planning in advancing ecosystem-based sea use management. *Marine Policy*, v. 32, p. 762–771, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2008.03.021. Acesso em: 10 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Roadmap de energia eólica offshore no Brasil*. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil. Acesso em: 09 abr. 2026.

ESTEBAN, M. D.; DÍEZ, J. J.; LÓPEZ, J. S.; NEGRO, V. Why offshore wind energy? *Renewable Energy*, v. 36, n. 2, p. 444–450, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.009. Acesso em: 03 abr. 2026.

FOO, Y. Z.; O'DEA, R.; KORICHEVA, J.; NAKAGAWA, S.; LAGISZ, M. A practical guide to question formation, systematic searching and study screening for literature reviews in ecology and evolution. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 12, n. 7, p. 1330–1345, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.13654. Acesso em: 05 abr. 2026.

GIMPEL, A.; STELZENMÜLLER, V.; GROTE, B.; BUCK, B. H.; FLOETER, J.; NÚÑEZ-RIBONI, I.; POGODA, B.; TEMMING, A. A GIS modelling framework to evaluate marine spatial planning scenarios: co-location of offshore wind farms and aquaculture in the German EEZ. *Marine Policy*, v. 55, p. 102–115, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.01.012. Acesso em: 01 abr. 2026.

GUTIÉRREZ, J. M.; MOLISANI, M. M..; CONCEIÇÃO, M. B.; WEBER, L. I. Characterisation of coastal aquaculture sites in the state of Rio de Janeiro, Brazil, using genotoxicity biomarkers. *Regional Studies in Marine Science*, v. 32, p. 100870, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100870. Acesso em: 02 abr. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *World energy transitions outlook 2023: 1.5°C pathway*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023. Acesso em: 05 abr. 2026.

LANDUCI, F. S.; BEZ, M. F.; RITTER, P. D.; COSTA, S.; SILVESTRI, F.; ZANETTE, G. B.; CASTELAR, B.; COSTA, P. M. S. Mariculture in a densely urbanized portion of the Brazilian coast: current diagnosis and directions for sustainable development. *Ocean & Coastal Management*, v. 213, p. 105889, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105889. Acesso em: 05 abr. 2026.

LEUNG, D. Y. C.; YANG, Y. Wind energy development and its environmental impact: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 1031–1039, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.024. Acesso em: 03 abr. 2026.

MARTÍNEZ, E.; SANZ, F.; PELLEGRIN, S.; JIMÉNEZ, E.; BLANCO, J. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy*, v. 34, n. 3, p. 667–673, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.020. Acesso em: 06 abr. 2026.

MARTÍNEZ, E.; SANZ, F.; PELLEGRIN, S.; JIMÉNEZ, E.; BLANCO, J. Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 14, n. 1, p. 52–63, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/s11367-008-0033-9. Acesso em: 05 abr. 2026.

MICHLER-CIELUCH, T.; KRAUSE, G.; BUCK, B. H. Marine aquaculture within offshore wind farms: social aspects of multiple-use planning. *GAIA*, v. 18, n. 2, p. 158–162, 2009. DOI: https://doi.org/10.14512/gaia.18.2.14. Acesso em: 08 abr. 2026.

MIRANDA, F.; ROSA-SANTOS, P.; TAVEIRA-PINTO, F.; GUAN, D.; FAZERES-FERRADOSA, T. Aquaculture and offshore wind: a review of co-location design challenges. *Ocean Engineering*, v. 318, p. 120161, 2025. DOI:

https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120161. Acesso em: 07 abr. 2026.

MUIR, J. F.; SCOTT, D. C. B. Offshore cage systems: a practical overview. In: MUIR, James F.; BASURCO, Beatriz (ed.). *Mediterranean offshore mariculture*. Zaragoza: CIHEAM, 2000. p. 79–89. Disponível em: https://om.ciheam.org/om/pdf/b30/00600651.pdf. Acesso em: 08 abr. 2026.

SAIDUR, R.; RAHIM, N. A.; ISLAM, M. R.; SOLANGI, K. H. A review on global wind energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 7, p. 1744–1762, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.007. Acesso em: 03 abr. 2026.

STUIVER, M.; SOMA, K.; KOUNDOURI, P.; VAN DEN BURG, S.; GERRITSEN, A.; HARKAMP, T.; DALSGAARD, N.; ZAGONARI, F.; GUANCHE, R.; SCHOUTEN, J.; HOMMES, S.; GIANNOULI, A.; SÖDERQVIST, T.; ROSEN, L.; GARÇÃO, R.; NORRMAN, J.; RÖCKMANN, C.; DE BEL, M.; ZANUTTIGH, B.; PETERSEN, O.; MØHLENBERG, F. The governance of multi-use platforms at sea for energy production and aquaculture: challenges for policy makers in European seas. *Sustainability*, v. 8, n. 4, p. 333, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/su8040333. Acesso em: 06 abr. 2026.

VALENTI, W. C.; BARROS, H. P.; MORAES-VALENTI, P.; BUENO, G. W.; CAVALLI, R. O. Aquaculture in Brazil: past, present and future. *Aquaculture Reports*, v. 19, p. 100611, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611. Acesso em: 04 abr. 2026.

PLANEJAMENTO ESPACIAL MARINHO DA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL COM ENFOQUE EM POTENCIAIS ÁREAS PARA A INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE

1 Daniel S. Mergulhão, 1Fernando R. Martins

1 Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Mar (IMAR); e-mails: mergulhao@unifesp.br; fernando.martins@unifesp.br

Palavras-chave: Energia Eólica Offshore; Planejamento Espacial Marinho; Margem Oriental/Meridional do Brasil.

Resumo

As pressões antropogênicas sobre os sistemas naturais estão intensificando a crise ecológica global, evidenciando os limites planetários, especialmente as mudanças climáticas, diretamente ligadas ao consumo de combustíveis fósseis como fonte de energia. O desenvolvimento humano está intrinsecamente ligado ao consumo de energia, como reconhecido na Agenda 2030 por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável *(ODS)* 7 e outros ODS relacionados. Assim, a transição para energias limpas torna-se um dos maiores desafios contemporâneos. Nesse cenário, a energia eólica *offshore* surge como uma alternativa estratégica no Brasil, impulsionada pelo elevado potencial eólico em águas territoriais e pelos avanços regulatórios. Contudo, ainda carece de estudos socioambientais abrangentes e de Planejamento Espacial Marinho *(PEM)* fundamentado na sustentabilidade oceânica. Este estudo teve como objetivo identificar áreas favoráveis à implementação de Parques Eólicos *Offshore (PEOs)* na Margem Oriental/Meridional do Brasil *(sudeste brasileiro)*. A metodologia está em conformidade com a Lei 15.097/2025, que estabelece diretrizes para a emissão da Declaração de Interferência Prévia *(DIP)*, e regulamenta conflitos entre parques eólicos e outras atividades marítimas. Para este fim, foi aplicado o Método de Tomada de Decisão Multicritério *(MTDM)*, combinado com análises de Sistemas de Informação Geográfica *(SIG)* e avaliação dos graus de interferência. O processo metodológico compreendeu seis etapas: *(1)* definição de critérios por meio de revisão sistemática; (2) levantamento de dados disponíveis para a área de estudo; *(3)* exclusão de áreas inviáveis com base em critérios técnicos e legais; *(4)* classificação dos critérios restantes em zonas de conflito e sinergia; *(5)* sobreposição de camadas SIG para atribuição de pontos; e *(6)* classificação final das áreas com base nos graus de interferência, considerando o número de interferências negativas e positivas. Essa classificação, representada pela codificação *"Zx-y+"*, facilita a análise crítica e a tomada de decisão informada, priorizando locais com menor conflito e maior potencial de implementação. Os locais foram agrupados em três categorias: Zona de Exclusão *(ZE)*, Zona de Potencial Positivo *(ZPP)* e Zona de Potencial Negativo *(ZPN)*. Com base nesses parâmetros, foram estabelecidos três aspectos norteadores: classe da turbina eólica *(Classes IEC II e III)*, batimetria *(até 50 m – águas rasas)* e altura do cubo *(100, 150 e 200 m)*. Esse processo gerou seis cenários de avaliação. Os resultados mostraram que, em águas rasas, as áreas da Classe III são de 7.746 km², 7.578 km² e 7.466 km², e para a Classe II, de 6.787 km², 6.532 km² e 948 km². Conflitos e sinergias foram identificados em todo o território avaliado, envolvendo aspectos técnicos, ambientais, de petróleo e gás, de navegação, de pesca, de mineração, de patrimônio histórico e cultural, de turismo e interesses da defesa.

Introdução

O conceito de limites planetários define as condições seguras para o desenvolvimento humano, indicando que atividades antrópicas já ultrapassaram limites críticos, como o das mudanças climáticas *(ARTAXO, 2014)*. As alterações na atmosfera, causadas por emissões de gases e aerossóis, têm provocado impactos amplos, incluindo insegurança alimentar e aumento da frequência e intensidade de eventos extremos desde a década de 1950 *(ROCKSTRÖM, 2009a, 2009b)*. No Brasil, esses efeitos são evidentes em desastres recentes, como as chuvas intensas no Rio Grande do Sul em 2024 e eventos recorrentes na Região Norte, que afetam milhares de pessoas, sobretudo populações vulneráveis *(ALPINO, 2022; MARENGO, 2024; CEMADEN, 2026)*.

Por outro lado, a Agenda 2030 da ONU estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), integrando dimensões ambientais, sociais e econômicas, visando promover qualidade de vida e desenvolvimento social dentro dos limites do planeta. Esses objetivos incluem desde a preservação da biodiversidade e mitigação das mudanças climáticas até a erradicação da pobreza, promoção da saúde, educação, igualdade de gênero e desenvolvimento econômico sustentável. Nesse contexto, destaca-se a importância de soluções energéticas limpas e acessíveis, alinhadas à necessidade global de reduzir emissões e promover um crescimento mais equilibrado *(SCARANO, 2021)*. A energia eólica *offshore* é apontada como uma alternativa estratégica para a transição energética, contribuindo para a diversificação da matriz elétrica e alcance de metas climáticas globais. O Brasil apresenta elevado potencial nesse setor e vem avançando em sua regulamentação, como evidenciado pelo Marco Legal das Eólicas *Offshore* (Lei nº 15.097/2025) e por normas que disciplinam a cessão de áreas marítimas e os critérios técnicos, ambientais e jurídicos para implantação dos empreendimentos. Além disso, instrumentos como as Declarações de Interferência Prévia (DIP) e o Portal Único de Gestão (PUG-offshore) fortalecem a organização e a transparência do processo *(BRASIL, 2022a, 2022b, 2025)*.

Por fim, o Planejamento Espacial Marinho (PEM) desempenha um papel fundamental ao orientar o uso sustentável do espaço oceânico, equilibrando diferentes atividades, como exploração de petróleo, pesca, conservação ambiental e geração de energia. Na Margem Oriental/Meridional do Brasil, especialmente no Sudeste, há grande potencial para implantação de parques

eólicos *offshore*, mas também múltiplos interesses e possíveis conflitos. Assim, o estudo propõe identificar áreas favoráveis com base em critérios técnicos, como tipo de aerogerador, altura e profundidade, e na análise de conflitos e sinergias, fornecendo subsídios para uma tomada de decisão mais integrada, sem estabelecer uma hierarquização rígida das áreas *(EULER, 2009; MARINHA DO BRASIL, 2021; CT ALMEIDA, 2025)*.

Este estudo consistiu em mapear áreas potencialmente favoráveis à implementação de Parques Eólicos *Offshore* (PEO) na Margem Oriental/Meridional do Brasil, considerando três aspectos técnicos centrais: (1) a classe do aerogerador, (2) a altura de cubo e (3) a profundidade do mar, bem como a avaliação dos conflitos e das sinergias entre os PEOs e os demais usos do espaço marítimo na região. Para o atendimento desse objetivo geral, definiram-se objetivos específicos voltados à identificação de cenários técnicos de viabilidade para o aproveitamento do recurso eólico *offshore*, com base em dados secundários disponíveis. Em seguida, buscou-se delimitar as áreas costeiras que atendem a esses cenários, considerando sua localização geográfica e suas dimensões. Por fim, realizou-se a análise integrada de conflitos e sinergias com outros usos do espaço marinho com base nos princípios do Planejamento Espacial Marinho (PEM), visando identificar áreas potencialmente favoráveis à implantação de parques eólicos *offshore* e, assim, subsidiar os processos de tomada de decisão no âmbito do licenciamento ambiental. Além disso, avaliaram-se, com base nos resultados obtidos, os projetos eólicos *offshore* em licenciamento ambiental federal junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), na costa do Sudeste brasileiro.

Materiais e Métodos

A metodologia baseou-se no Método de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM) somado a uma avaliação baseada em Graus de Interferência (GI) entre os diferentes usos do espaço marítimo em um ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). A MTDM visa determinar a melhor alternativa com base em premissas implícitas ou explícitas que são influenciadas por diversos fatores, como biológicos, culturais e sociais, entre outros *(TAHERDOOST, 2023)*.

O estudo foi desenvolvido em seis etapas: (1) identificação dos critérios utilizados na implementação de PEOs com base na literatura; (2) levantamento de dados para a região estudada; (3) definição das Zonas de Exclusão (ZE), com base em restrições legais e técnicas; (4) classificação dos demais critérios em Zonas Potenciais Negativas (ZPN), que indicam conflitos, e Zonas Potenciais Positivas (ZPP), que indicam sinergias com os PEOs; (5) sobreposição dos dados em SIG para contabilizar critérios positivos e negativos; e (6) classificação das áreas conforme o grau de interferência. A análise não soma pontuações, mas apresenta a quantidade de conflitos e sinergias por área, usando uma codificação *(ex.: Z3-2+)*. A Lei 15.097/2025 e a Declaração de Interferência Prévia (DIP) foram adotadas como referenciais no desenvolvimento das etapas acima descritas, uma vez que definem conflitos decorrentes de interferência com outras atividades no ambiente marinho.Além dos conflitos e sinergias, a análise considera também zonas de exclusão definidas com base em critérios legais e técnicos que impedem a instalação.

A região Sudeste, foco do estudo, possui cerca de 2,4 milhões de km² *(42% da Amazônia Azul)* e grande potencial para energia eólica *offshore*, podendo contribuir significativamente para a matriz energética brasileira. O resultado final consiste em um *ranking* das áreas, que não define prioridade absoluta de implantação, mas orienta a ordem inicial de avaliação detalhada dos conflitos no âmbito do Planejamento Espacial Marinho (PEM) e do licenciamento ambiental. O estudo também define três aspectos técnicos norteadores: classe dos aerogeradores (IEC II e III), altura do cubo (100, 150 e 200 m) e profundidade do mar *(até 50 m para águas rasas)*, combinados em seis cenários distintos para análise *(Figura 1)*.

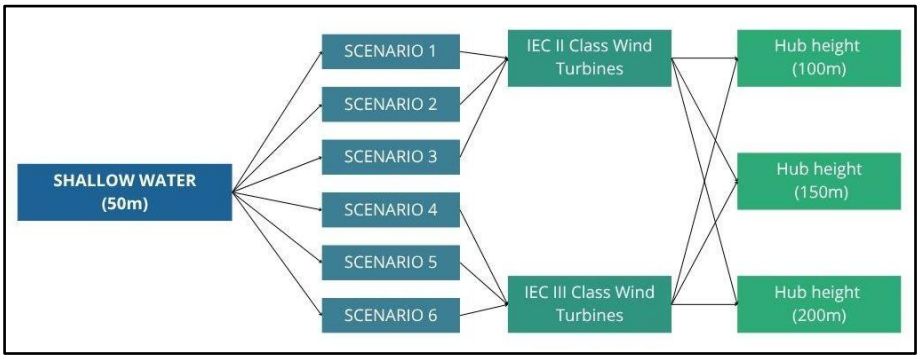


Figura 1. Esquematização do inter-relacionamento dos aspectos norteadores.

O estudo baseou-se na análise de artigos de revisão (2019–2024) e de pesquisas recentes (2024–2025), identificando inúmeros critérios avaliados em estudos de viabilidade de implementação de empreendimentos eólicos *offshore*. A velocidade do vento e a batimetria destacam-se como os fatores mais importantes, influenciando diretamente a viabilidade técnica. Outros aspectos relevantes incluem distância da costa, infraestrutura disponível, conflitos de uso do mar e impactos ambientais. Foram identificados oito fatores principais para análise, incluindo energia eólica *offshore* (F1), meio ambiente (F2), exploração de óleo e gás (F3), navegação e portos (F4), atividade pesqueira (F5), exploração mineral (F6), patrimônio histórico e atividade turística costeira (F7) e áreas de interesse da defesa (F8), garantindo uma avaliação abrangente para a escolha de áreas adequadas. Além disso, os múltiplos critérios distribuídos entre os fatores foram classificados em ZPP, ZPN ou ZE, como está apresentado na Figura 2.

O fator de energia eólica *offshore* foi avaliado com base em três critérios principais: velocidade do vento, profundidade do mar e distância de infraestrutura elétrica. A base de dados para velocidade do vento foi Global Wind Atlas (GWA),

considerando alturas de 100, 150 e 200 m. Foram priorizadas turbinas das Classes IEC II e III, mais adequadas aos ventos moderados do Sudeste brasileiro, enquanto áreas com velocidades abaixo dos limites (8,5 m/s e 7,5 m/s) foram classificadas como zonas de exclusão *(ESMAP, 2021; GENÇ et al. 2021; VINHOZA & SCHAEFFER, 2021; CHEN et al., 2024; DIMITRIOU et al., 2025; UMOH et al., 2025; GLOBAL WIND ATLAS, 2025)*. A profundidade do mar para fundações fixas limitou-se em 50 metros, sendo áreas fora desses limites também excluídas *(SPYRIDONIDOU & VAGIONA, 2020; BARZEHKAR et al. 2024; GHERBOUDJ, 2024; MARTINEZ & IGLESIAS, 2024; DIMITRIOU et al., 2025)*. Por fim, a proximidade com subestações de energia elétrica foi considerada um fator positivo, adotando-se um raio de até 60 km como distância ideal para a viabilidade técnica e econômica *(SPYRIDONIDOU & VAGIONA, 2020)*.

O fator meio ambiente considera áreas de alta relevância ecológica para evitar impactos e conflitos na instalação de PEOs. Foram utilizados critérios como as Áreas Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade (APCB), as regiões sensíveis do PRIM-PGMar e as áreas de corais (PAN Corais), todas classificadas como zonas potenciais negativas devido à sua sensibilidade ambiental. Já as Unidades de Conservação (UC) foram classificadas como zonas de exclusão, pois possuem proteção legal e podem dificultar a instalação de empreendimentos de grande escala. A distribuição de mamíferos marinhos *(misticetos e odontocetos)* e de tartarugas foi analisada com base em dados de avistagem, gerando mapas de calor para identificar áreas de maior concentração. Essas áreas, especialmente as de maior densidade *(KDE 50%),* foram classificadas como zonas potencialmente negativas, pois indicam maior sensibilidade ambiental. Para os cetáceos, utilizou-se modelagem espacial para mapear concentrações ao longo da costa do Sudeste. Já para as tartarugas *(testudines)*, foram consideradas principalmente áreas de reprodução na zona costeira, devido à maior disponibilidade de dados. Assim, essas regiões exigem maior atenção, especialmente na instalação de cabos de transmissão de energia elétrica.

O fator de exploração de óleo e gás considera áreas relacionadas à exploração e produção de petróleo e gás (O&G), importantes por potenciais conflitos com parques eólicos *offshore*. O polígono do pré-sal, campos de produção, blocos exploratórios *(sob contrato, em oferta permanente ou em estudo)* foram classificados como zonas potenciais negativas, pois indicam uso já existente ou interesse econômico na área. Já os poços exploratórios e, principalmente, os dutos submarinos, possuem restrições mais rígidas: foi definida uma faixa de segurança de 500 metros ao redor dos dutos, sendo essas áreas classificadas como zonas de exclusão devido a limitações legais e operacionais, conforme previsto no Art. 60º da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM).

O fator de navegação e portos avalia a compatibilidade espacial e os impactos da instalação de PEOs considerando aspectos de segurança marítima, logística portuária e operação *offshore*. As rotas de navegação, delimitadas pela Marinha do Brasil, correspondem a áreas de alto fluxo de embarcações e foram classificadas como zonas de exclusão devido ao potencial de conflito com PEOs. As Áreas a Serem Evitadas (ATBA), que incluem tráfego intenso de embarcações de apoio ao setor de O&G e rotas mercantes críticas, foram consideradas zonas potenciais negativas, demandando avaliação criteriosa, mas não restrições absolutas. Por outro lado, os Portos Organizados, essenciais para a instalação, operação e manutenção dos parques eólicos, tiveram *buffers* de 200 km aplicados, sendo classificados como zonas potenciais positivas, o que favorece a localização de PEOs próximas a essas infraestruturas.

O fator de atividade pesqueira avalia a compatibilidade da instalação de PEOs com a pesca artesanal e industrial na costa Sudeste do Brasil. Os dados foram obtidos da plataforma *SeaSketch*, indicada pela Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), e representam informações oficiais sobre uso espacial na Amazônia Azul. Para a pesca artesanal, foi gerada uma camada de intensidade de uso, e as áreas com maior concentração *(KDE 50%)* foram classificadas como zonas potenciais negativas, refletindo os espaços mais utilizados por comunidades tradicionais, geralmente em áreas costeiras. No caso da pesca industrial, que se distribui por toda a região, qualquer área disponível para implementação de PEOs é considerada potencialmente sujeita a conflitos, demandando avaliação detalhada durante o licenciamento ambiental.

O fator de exploração mineral avalia a compatibilidade da instalação de PEOs com atividades minerárias na costa do Sudeste do Brasil. Considera-se tanto as áreas de processo minerário ativo, onde há direitos concedidos para pesquisa ou exploração de recursos minerais, quanto as áreas de bloqueio minerário, onde a atividade foi restrita por incompatibilidade com outros usos de interesse público. Ambas as categorias são fundamentais para evitar conflitos de uso, garantir segurança jurídica e técnica, e identificar regiões viáveis para PEOs. Por isso, todas essas áreas foram classificadas como zonas potenciais negativas.

O fator de patrimônio histórico e atividade turística costeira considera dois critérios principais para a implantação de PEOs. Primeiramente, sítios arqueológicos e naufrágios históricos são protegidos pelo Estado e exigem autorização legal para qualquer intervenção. Para proteger essas áreas, foram adotadas zonas de amortecimento de 600 metros ao redor de pontos de sítios arqueológicos e naufrágios *(IPHAN, 2021)*, classificando-as como zonas de exclusão. Em segundo lugar, o impacto visual dos PEOs a partir da costa foi avaliado, considerando a sensibilidade paisagística das regiões. Para localidades com baixa sensibilidade, recomenda-se uma distância mínima de 8 km da costa, aumentando para áreas de sensibilidade média e alta, a fim de reduzir efeitos visuais e equilibrar fatores ambientais, sociais e econômicos. Assim, foi gerado um buffer de 8 km a partir das linhas de base, configurando uma área de exclusão para preservar o patrimônio paisagístico e turístico.

O fator de áreas de interesse da defesa considera zonas estratégicas para a soberania e segurança marítima do Brasil, definidas pela Marinha do Brasil por meio do Comando de Operações Marítimas e Proteção da Amazônia Azul (COMPAAz). Essas áreas são utilizadas para o tráfego, o patrulhamento e a proteção da Amazônia Azul, sendo essenciais para evitar conflitos com operações militares. Dessa forma, todas as áreas de interesse da defesa foram classificadas como zona potencial negativa para a instalação de PEOs.

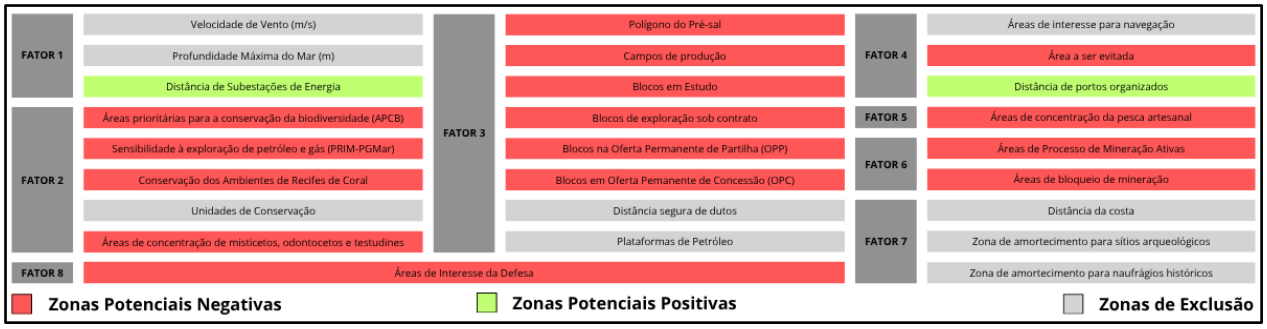


Figura 2. Classificação dos critérios.

Resultados e Discussão

Para aerogeradores Classe II com altura de cubo de 100 m, as áreas viáveis para a implantação de PEOs mostram-se limitadas e espacialmente fragmentadas, concentrando-se predominantemente entre a Região dos Lagos e o norte do litoral fluminense, com ocorrências secundárias no sul do Espírito Santo, totalizando cerca de 948 km². Ao se considerar aerogeradores da mesma classe com altura de cubo de 150 m, observa-se uma expansão expressiva das áreas aptas à implantação de PEOs, que passam a abranger 6.532 km², o que representa um aumento aproximado de 589% em relação ao cenário anterior. Esse crescimento promove o preenchimento de lacunas previamente identificadas entre o norte do litoral fluminense e o sul do Espírito Santo, resultando tanto na formação de novos polígonos quanto na ampliação das áreas já mapeadas. Por sua vez, para aerogeradores Classe II com altura de cubo de 200 m, verifica-se um incremento marginal das áreas disponíveis em comparação ao cenário de 150 m, alcançando 6.787 km², o que corresponde a um aumento de aproximadamente 4%. De maneira geral, os resultados indicam que, embora a elevação adicional da altura do cubo contribua para a ampliação da área disponível, os ganhos associados a essa mudança são substancialmente inferiores àqueles observados na transição entre os cenários de 100 m e 150 m, evidenciando retornos decrescentes em termos de expansão espacial das áreas aptas.

No Cenário IV, analisam-se as áreas disponíveis para a implementação de PEOs em águas rasas, considerando aerogeradores de Classe III, caracterizados por velocidade média anual de vento de 7,5 m/s e altura de cubo de 100 metros. Esse cenário incorpora uma variação tecnológica em relação ao anterior, ao admitir equipamentos aptos a operar em regimes de vento mais baixos que os da Classe II. Mesmo mantendo a mesma altura do cubo, observa-se uma ampliação da área total disponível, que passa a englobar integralmente o cenário precedente e acrescenta 679 km², totalizando 7.466 km², o que representa um crescimento aproximado de 10%. No Cenário V, verifica-se a continuidade dessa expansão territorial, ainda que em menor magnitude em comparação com o cenário anterior. A nova área incorporada corresponde a 112 km², resultando em um acréscimo de aproximadamente 1,5% na área total disponível, que passa a atingir 7.587 km². Essa expansão ocorre novamente em direção ao litoral capixaba, avançando no sentido da capital do estado do Espírito Santo, Vitória. Por fim, no Cenário VI, identifica-se uma nova ampliação com dimensão intermediária em relação às anteriores, elevando a área total disponível em águas rasas para cerca de 7.746 km², o que representa um incremento adicional de aproximadamente 2%. Dessa forma, observa-se uma expansão territorial progressiva ao longo dos cenários analisados, evidenciando o impacto das variações tecnológicas e dos critérios adotados na delimitação das áreas aptas à implementação de PEOs. A Figura 3 apresenta a progressão espacial dos cenários avaliados.

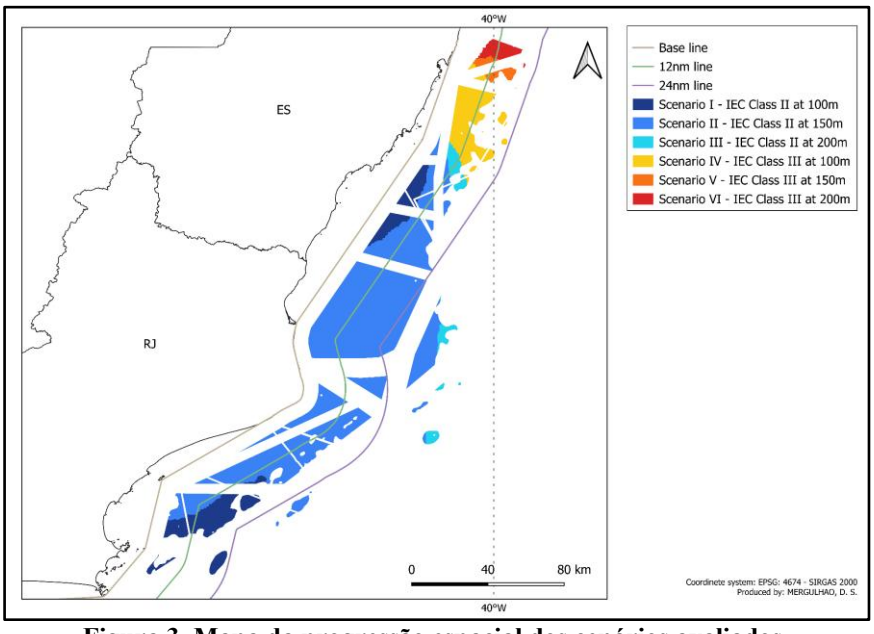


Figura 3. Mapa da progressão espacial dos cenários avaliados.

A área total disponível ao longo dos seis cenários apresenta sinergias tanto com Portos Organizados (PO) quanto com Subestações de Energia Elétrica (SEE). No que se refere aos portos, destacam-se aqueles cujas zonas de atendimento logístico abrangem áreas disponíveis, a saber: Porto Organizado do Rio de Janeiro, Niterói, Forno, Vitória e Barra do Riacho.

Em relação à infraestrutura elétrica, as áreas identificadas inserem-se em zonas de atendimento de até 17 subestações, sendo 15 em operação e 2 em fase de planejamento. Entre elas, incluem-se: SE Lagos, SE Macaé Merchant, SE Marlim Azul, SE Mário Lago, SE Norte Fluminense, SE Rio Novo do Sul, SE Viana, SE UTE Viana, SE Viana 2, SE UTE Mário Lago, SE UTE Norte Fluminense, SE Campos, SE Campos 2, SE UTE GNA I, além das subestações planejadas SE GNA II e SE Porto de Açu, e, por fim, a SE Vitória. Dessa forma, observa-se uma ampla articulação entre as áreas potenciais e as infraestruturas portuária e elétrica existentes e projetadas.

Em relação aos aspectos conflitantes, estes foram quantificados totalizando 34 conflitos distintos existentes na área total disponível para águas rasas, com 7.746 km². Estes conflitos estão associados aos fatores meio ambiente, exploração de óleo e gás, navegação e portos, atividade pesqueira, exploração mineral e áreas de interesse da defesa. Deste modo, os conflitos associados aos fatores são (a) Meio ambiente: áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade de relevância extremamente alta e muito alta, áreas prioritárias para preservação de ambientes coralíneos, áreas de sensibilidade da biodiversidade costeira e marinha à exploração e produção de petróleo e gás natural em nível extremamente alto e muito alto, áreas de concentração muito alta a moderada de baleia-jubarte, baleia-franca, baleia-minke-comum, golfinho-nariz-de-garrafa e orca, áreas de concentração alta de baleia-de-Bryde e áreas de concentração alta a moderada de golfinho-de-dentes-rugosos; (b) Exploração de óleo e gás: blocos de exploração em estudo, campos de produção ativos e devolvidos e o polígono do pré-sal; (c) Navegação de portos: áreas a serem evitadas (ATBA) na bacia de campos norte e sul; (d) Atividade pesqueira: áreas de concentração de pesca artesanal; (e) Exploração mineral: áreas de bloqueio minerário e de processo minerário ativo; e (f) Áreas de interesse da defesa: áreas de interesse militar 01 e 03 localizadas no Sudeste.

Após a contabilização dos conflitos e das sinergias, realizou-se a classificação em relação aos Graus de Interferência (GI). Os GIs foram classificados conforme cada cenário analisado, a Figura 4 apresenta um mapa com a classificação da área total disponível.

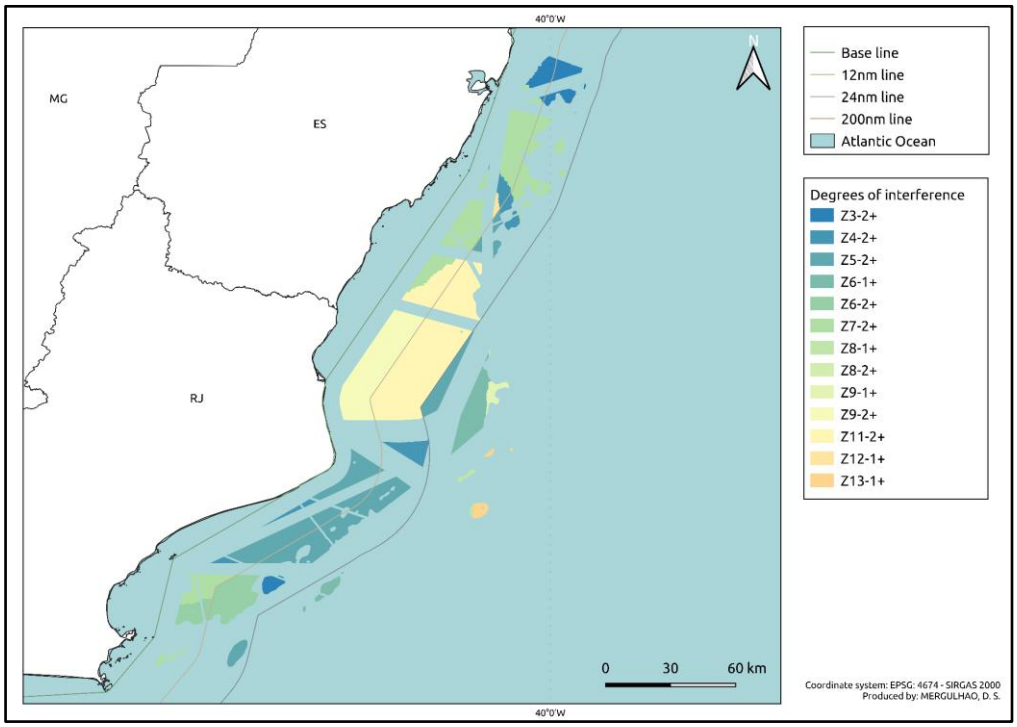


Figura 4. Avaliação da área disponível com base nas interferências identificadas.

Para a região Sudeste, a área total atualizada é de 7.642 km², considerando as sobreposições entre os projetos eólicos. Quando essas sobreposições são desconsideradas, a área efetivamente ocupada reduz-se a 6.566 km². Observa-se, ainda, que o estado do Rio de Janeiro concentra aproximadamente 88% dessa área, enquanto o estado do Espírito Santo responde pelos 12% restantes. Os nove projetos eólicos *offshore* localizados na região Sudeste totalizam uma potência instalada prevista de 18.929 MW, dos quais 15.509 MW estão concentrados no estado do Rio de Janeiro e 3.420 MW no estado do Espírito Santo.

Foram avaliados seis parques eólicos *offshore* com projetos em licenciamento federal junto ao IBAMA na região Sudeste brasileira. Apesar de existirem outros empreendimentos em licenciamento, os dois projetos-piloto e o projeto eólico localizado em águas profundas não foram considerados. Pode-se notar na Figura 5 que todos os parques apresentam sobreposição com áreas de águas profundas *(acima de 50 metros de profundidade)* ou com áreas classificadas como zonas de exclusão. Além disso, observa-se que a maioria dos projetos *(01, 06, 10A, 10B e 14A)*.

A Tabela 1 apresenta um compilado das informações obtidas nas análises de viabilidade dos empreendimentos eólicos *offshore*. Ressalta-se que as siglas utilizadas correspondem aos seguintes parâmetros: IDe — número identificador do empreendimento; AT (km²) — área total do empreendimento; Int. PF (m) — intervalo de profundidade dos empreendimentos; DC (km) — distância do centro do projeto eólico ao ponto mais próximo da costa; AZE (%) — área inserida em Zonas de Exclusão (ZE); Fatores — Fatores cujo empreendimento abrange; SEE — número de Subestações de Energia Elétrica disponíveis para atendimento; PO — número de Portos Organizados com potencial de atendimento; ZPN — Zona Potencial Negativa, ou seja, a quantidade de potenciais conflitos identificados nas áreas remanescentes; e Classificação — indicação quanto à viabilidade do empreendimento (Viável, Viável com leve ajuste, Viável com forte ajuste e Inviável). Para esse fim, o critério de viabilidade foi estruturado em quatro categorias: o projeto eólico é classificado como "viável" quando 100% de sua área se encontra fora de zonas de exclusão; como "viável com leve ajuste" quando até 25% da área está inserida nessas zonas; como "viável com forte ajuste" quando 25% a 50% da área apresenta sobreposição com zonas de exclusão; e, por fim, como "inviável" quando mais de 50% da área do empreendimento se encontra inserida em zonas de exclusão.

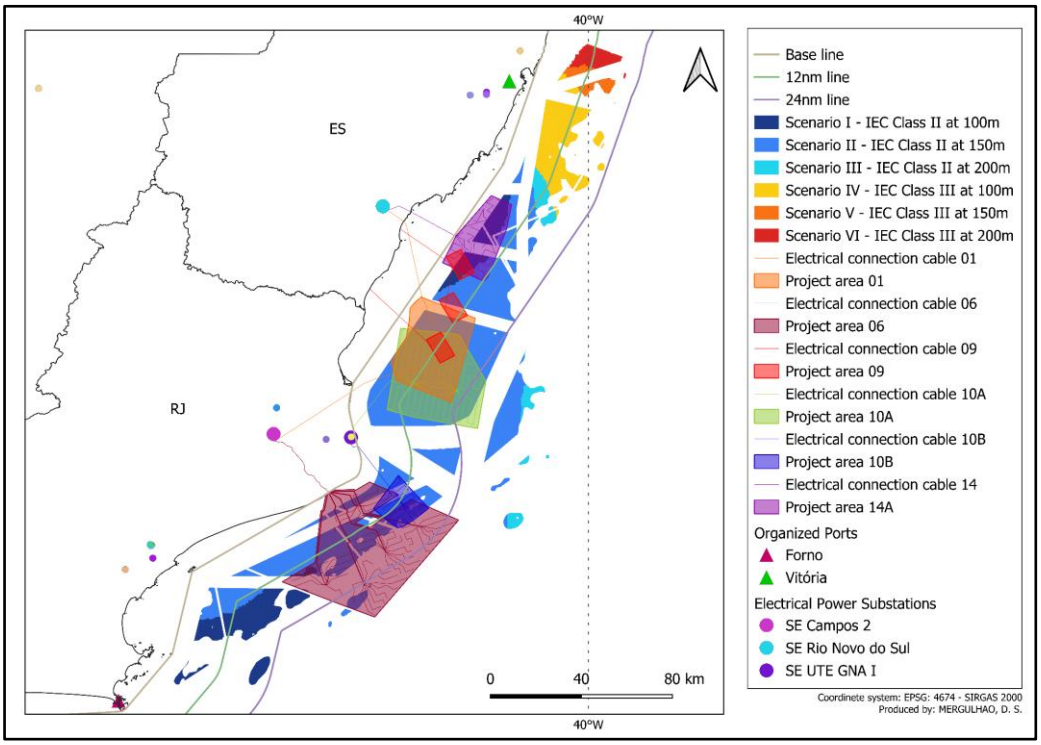


Figura 5. Avaliação dos projetos eólicos em processo de licenciamento ambiental junto ao IBAMA.

IDe	AT (km²)	PF (m)	DC (km)	AZE	Fatores	SEE	PO	ZPN	Classificação
01	1.173	0 a -50	33	13%	F2, F5, F6 e F8	6	3	8	Leve Ajuste
06	2.556	0 a -100	32	49%	F2, F3, F5 e F6	5	1	11	Forte Ajuste
09	280	0 a -50	33	30%	F2, F5, F6 e F8	3	2	10	Forte Ajuste
10A	1.555	0 a -50	37	7%	F2, F3, F5 e F6	6	3	11	Leve Ajuste
10B	315	0 a -75	23	26%	F2 e F5	4	2	7	Forte Ajuste
14A	664	0 a -50	25	50%	F2, F5, F6 e F8	4	2	9	Forte Ajuste

Tabela 1: Compilação de informações sobre empreendimentos eólicos offshore na região Sudeste do Brasil.

Conclusão

O estudo teve como objetivo compreender os desafios da integração de áreas favoráveis à implantação de parques eólicos *offshore* na região Sudeste do Brasil, considerando os usos atuais do espaço marinho. Para isso, utilizou uma abordagem integrada com o Método de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM), análises em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e avaliação de interferências técnicas, econômicas, sociais e ambientais. Foram elaborados seis cenários distintos para identificar áreas disponíveis e potenciais conflitos, revelando variações significativas de extensão entre águas rasas e entre diferentes classes e alturas dos cubos dos aerogeradores. Os resultados forneceram uma base sistematizada de oportunidades e restrições, contribuindo para o planejamento energético *offshore* e destacando o potencial da energia eólica na transição energética e na descarbonização, especialmente em interação com o setor de óleo e gás.

Referências

ALPINO, T. de M. A. et al. **Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: uma revisão da literatura.** Ciência & Saúde Coletiva. v. 27, n. 01, pp. 273-286. 2022. DOI: 10.1590/1413-81232022271.05972020. ISSN 1678-4561.

ARTAXO, P. **Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno?** Revista USP, Novembro de 2014. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i103p13-24.

BARZEHKAR, M.; PARNELL, K.; SOOMERE, T.; KOIVISTO, M. **Offshore wind power plant site selection in the Baltic Sea.** Regional Studies in Marine Science, Volume 73, 2024, 103469, ISSN 2352-4855, DOI: 10.1016/j.rsma.2024.103469.

BRASIL. **Lei nº 15.097, de Janeiro de 2025.** Disciplina o aproveitamento de potencial energético offshore; e altera a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, a Lei nº 14.182, de 12 de julho de 2021, e a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Brasília, 10 de janeiro de 2025; 204° da Independência e 137° da República. 2025.

BRASIL. **Portaria Interministerial MME/MMA nº 3, de 19 de Outubro de 2022.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 de Outubro de 2022b, ed. 200, sec. 1, p. 65.

BRASIL. **Portaria Normativa nº 52/GM/MME, de 19 de Outubro de 2022.** Estabelece as normas e procedimentos complementares relativos à cessão de uso onerosa para exploração de central geradora de energia elétrica offshore no regime de produção independente de energia ou de autoprodução de energia, de que trata o art. 5º, inciso I, do Decreto nº 10.946, de 25 de janeiro de 2022. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 de Outubro de 2022a, ed. 200, sec. 1, p. 65.

CEMADEN. **Estado do clima, extremos de clima e desastres no Brasil em 2025.** Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Fevereiro de 2026.

CHEN, W.; JIANG, X.; HUANG, N.; HUANG, Y.; YONG, X.; XU, C. **A two-stage framework for site selection of deep-sea offshore wind-to-hydrogen projects based on GIS - MULTIMOORA method under Pythagorean triangular fuzzy environment.** Ocean Engineering, Volume 313, Part 1, 2024, 119416, ISSN 0029-8018, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119416.

CT ALMEIDA, L. **Novo mapa do Brasil é expandido com 5,7 milhões de km² de área marítima.** Marinha do Brasil, Agência Marinha de Notícias, 28/09/2023. Disponível em: https://www.agencia.marinha.mil.br/amazonia-azul/novo-mapa-do-brasil-e-expandido-co m-57-milhoes-de-km2-de-area-maritima. Acesso em: 03/07/2025.

DIMITRIOU, I. C.; SARMAS, E.; TRACHANA, G. P.; MARINAKIS, V.; DOUKAS, H. **Multi-Criteria GIS-based offshore wind farm site selection: Case study in Greece.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 207, 2025, 114962, ISSN 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2024.114962.

EHLER, C. & DOUVERE, F. **Marine Spatial Planning: a step-by-step approach toward ecosystem-based management.** Intergovernmental Oceanographic Commission and Man and the Biosphere Programme. IOC Manual and Guides No. 53, ICAM Dossier No.6. Paris: UNESCO. 2009.

ESMAP. **Offshore Wind Technical Potential: Analysis and Maps.** Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), 2021. Disponível em: https://esmap.org/esmap_offshorewind_techpotential_analysis_maps. Acesso em: 25/11/2024.

GENÇ, M. S et al. **Determining Suitable Regions for Potential Offshore Wind Farms in Bandırma Bay using Multi-criteria-Decision-Making Method.** Müh.Bil.ve Araş.Dergisi. 2021;3(1):123-132. doi:10.46387/bjesr.900204.

GHERBOUDJ, I. **GIS-based suitability mapping for offshore and onshore wind energy in the United Arab Emirates.** Energy for Sustainable Development, Volume 80, 2024, 101439, ISSN 0973-0826, DOI: 10.1016/j.esd.2024.101439.

GWA. **Velocidade de Vento nas Alturas de 100, 150 e 200 metros.** Global Wind Atlas (GWA). Disponível em: https://globalwindatlas.info/en/. Acesso em: 08/01/2025.

IPHAN. **Portaria GAB-IPHAN/IPHAN nº 25, de 15 de Julho de 2021.** Estabelece os critérios para fins de operacionalização do Sistema de Avaliação de Impacto ao Patrimônio - SAIP e os critérios para análise manual da Ficha de Caracterização de Atividade - FCA no âmbito dos processos de licenciamento ambiental em que o Iphan participe. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), 15 de Julho de 2021.

MARENGO, J. A. et al. **O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024.** Estudos Avançados, 38(112), 203–228. 2024. DOI: 10.1590/s0103-4014.202438112.012.

MARINHA DO BRASIL. **Planejamento Espacial Marinho.** Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Setembro de 2021.

MARTINEZ, A. & IGLESIAS, G. **Evaluation of offshore wind energy zones within marine spatial planning: A case study in the Spanish Mediterranean Sea.** Energy Reports, Volume 11, 2024, Pages 3461-3473, ISSN 2352-4847, DOI: 10.1016/j.egyr.2024.03.018.

ROCKSTRÖM, J. et al. **A Safe Operating Space for Humanity.** Nature, 461, 2009a, pp. 472-5.

ROCKSTRÖM, J. et al. **Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity.** Ecol. Soc., 14, 32, 2009b.

SCARANO, F. R.; PADGURSCHI, M. de C. G.; FREIRE, L. M.; AGUIAR, A. C. F.; CARNEIRO, B. L. R.; PIRES, A. P. F.. **Para além dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: desafios para o Brasil.** Bio Diverso, Porto Alegre, v. 1, n. 1, 2021.

SPYRIDONIDOU, S.; VAGIONA, D. G. **Systematic Review of Site-Selection Processes in Onshore and Offshore Wind Energy Research.** Energies 2020, 13, 5906. DOI: 10.3390/en13225906.

TAHERDOOST, H. & MADANCHIAN, M. **Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts.** 10.3390/encyclopedia3010006.

UMOH, K.; HASAN, A.; KENJEGALIEV, A. **Combined AHP-GIS methodology for floating offshore wind site selection in South Africa.** Ocean Engineering, Volume 317, 2025, 120037, ISSN 0029-8018, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.120037.

VINHOZA, A. & SCHAEFFER, R. **Brazil's offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 146, 2021, 111185, ISSN 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111185.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E TÉRMICA DA BIOMASSA DE PIAÇAVA (*Attalea funifera*): POTENCIAL PARA APLICAÇÕES ENERGÉTICAS E SUSTENTÁVEIS

1 Samara de Cássia Cezar Bonifácio de Jesus, 2 Rita de Cássia Lacerda Brambilla Rodrigues, 3 Thiago Averaldo Bimestre,

1 Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista UNESP, e-mail: samara.bonifácio@unesp.br; 2 Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo USP, e-mail: ritaclb_rodrigues@usp.br, 3Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista UNESP, e-mail:thiago.bimestre@unesp.br.

Palavras-chave: biomassa lignocelulósica; piaçava; caracterização energética..

Resumo

O aproveitamento energético de biomassas lignocelulósicas tem sido amplamente investigado como alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para o desenvolvimento da bioeconomia. Entre as biomassas de interesse nacional destaca-se a piaçava (Attalea funifera), espécie nativa do bioma Mata Atlântica e amplamente explorada no estado da Bahia, cuja cadeia produtiva gera resíduos lignocelulósicos com potencial energético ainda pouco explorado. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização físico-química e térmica da biomassa residual de piaçava, visando avaliar sua adequação para aplicações energéticas sustentáveis. Foram realizadas análises imediata, elementar, determinação do poder calorífico e composição estrutural da biomassa. Os resultados indicaram teores médios de materiais voláteis superiores a 71%, baixo teor de umidade e valores médios de cinzas inferiores a 18%, características favoráveis para aplicações termoquímicas. A análise elementar revelou elevados teores de carbono e hidrogênio, indicando boa densidade energética. O poder calorífico superior médio foi superior a 18 MJ/kg, evidenciando potencial competitivo quando comparado a outras biomassas lignocelulósicas. A composição estrutural indicou elevado teor de lignina, associado à maior estabilidade térmica e formação de carvão residual. Os resultados obtidos demonstram que a biomassa de piaçava apresenta características promissoras para utilização em processos como combustão, pirólise e gaseificação, contribuindo para a valorização de resíduos florestais e para o desenvolvimento sustentável regional.

Introdução

O século XXI tem sido marcado por crescente preocupação global com a sustentabilidade energética e pela necessidade urgente de transição para fontes de energia renováveis e ambientalmente sustentáveis (HASSAN et al., 2024). O aumento das emissões de gases de efeito estufa, associado ao uso intensivo de combustíveis fósseis, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias baseadas em fontes renováveis, com destaque para o aproveitamento energético de biomassas lignocelulósicas. Essas biomassas representam recursos renováveis amplamente disponíveis e com balanço de carbono favorável, podendo contribuir significativamente para a redução da dependência energética e para o fortalecimento da economia circular (MUJTABA et al., 2023).

Entre os diferentes tipos de biomassa disponíveis, aquelas provenientes de resíduos agroindustriais e florestais têm recebido atenção especial devido ao seu potencial energético e ao baixo custo associado à sua obtenção. No Brasil, a diversidade de espécies vegetais e as condições climáticas favoráveis ao crescimento vegetal tornam o país particularmente apto ao desenvolvimento de tecnologias baseadas em biomassa. Nesse contexto, espécies nativas da flora brasileira apresentam elevado potencial para aplicações energéticas, especialmente quando associadas à valorização de resíduos gerados em cadeias produtivas já estabelecidas (ARAÚJO-SANTOS et al., 2025).

A piaçava (*Attalea funifera*), palmeira nativa da Mata Atlântica e amplamente explorada no sul da Bahia, constitui um importante recurso florestal não madeireiro utilizado principalmente na produção de fibras naturais (MONTEIRO et al., 2009). Entretanto, o processamento dessas fibras gera quantidades significativas de resíduos lignocelulósicos que, em muitos casos, são subutilizados ou descartados de forma inadequada. A valorização energética desses resíduos representa oportunidade relevante para geração de renda, redução de impactos ambientais e fortalecimento da bioeconomia regional (VOEKS et al., 2002; ORIOLI et al., 2025).

A caracterização físico-química e térmica de biomassa constitui etapa fundamental para avaliar sua viabilidade em processos de conversão energética. Parâmetros como teor de umidade, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo, composição elementar e poder calorífico influenciam diretamente o desempenho térmico e a eficiência dos processos termoquímicos (AVELAR, 2010; YANG et al., 2007). Além disso, a composição estrutural da biomassa, especialmente os teores de celulose, hemicelulose e lignina, desempenha papel determinante no comportamento térmico e na distribuição dos produtos obtidos durante processos como combustão, pirólise e gaseificação (WANG et al., 2022).

Apesar da relevância socioeconômica da piaçava, ainda são escassos estudos sistemáticos voltados à caracterização energética de seus resíduos lignocelulósicos (DOURADO et al., 2023). A ausência de dados técnicos consistentes limita a inserção dessa biomassa em aplicações industriais e tecnológicas, evidenciando a necessidade de investigações mais aprofundadas.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização físico-química e energética da biomassa residual de piaçava (*Attalea funifera*), visando avaliar seu potencial para aplicações energéticas sustentáveis e contribuir para o desenvolvimento de tecnologias baseadas em recursos naturais brasileiros.

Materiais e Métodos

A biomassa utilizada neste estudo foi proveniente de resíduos de piaçava (*Attalea funifera*) coletados no estado da Bahia, Brasil. Após a coleta, as amostras foram submetidas a processos de limpeza e secagem, visando remover impurezas e reduzir o teor de umidade inicial. Posteriormente, o material foi triturado e peneirado para obtenção de granulometria uniforme, garantindo maior reprodutibilidade dos resultados experimentais.

A caracterização físico-química da biomassa foi realizada por meio de análises imediata e elementar, além da determinação do poder calorífico superior e da composição estrutural. A análise imediata foi conduzida para determinar os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, utilizando procedimentos baseados em normas técnicas aplicáveis à caracterização de combustíveis sólidos como as normas ASTM E871 (umidade), ASTM E872 (materiais voláteis) e ASTM D1102 (cinzas). A análise elementar foi realizada conforme ASTM D5373, e o poder calorífico superior foi determinado segundo ASTM D5865. O carbono fixo foi determinado por diferença, considerando os teores previamente obtidos.

A análise elementar foi realizada para quantificar os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio presentes na biomassa. Esses parâmetros são fundamentais para a avaliação do potencial energético e para a estimativa do comportamento da biomassa durante processos termoquímicos.

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado utilizando calorímetro apropriado para combustíveis sólidos, sendo expresso em Joules por grama (J/g). Esse parâmetro representa a quantidade máxima de energia liberada durante a combustão completa da biomassa e constitui indicador essencial da qualidade energética do material.

A composição química estrutural foi determinada por meio da quantificação dos teores de celulose, hemicelulose e lignina. Esses parâmetros permitem avaliar a estrutura lignocelulósica da biomassa e compreender seu comportamento térmico durante processos de conversão energética.

Todos os ensaios experimentais foram realizados em triplicata, visando garantir a confiabilidade dos resultados e permitir a obtenção de valores médios representativos.

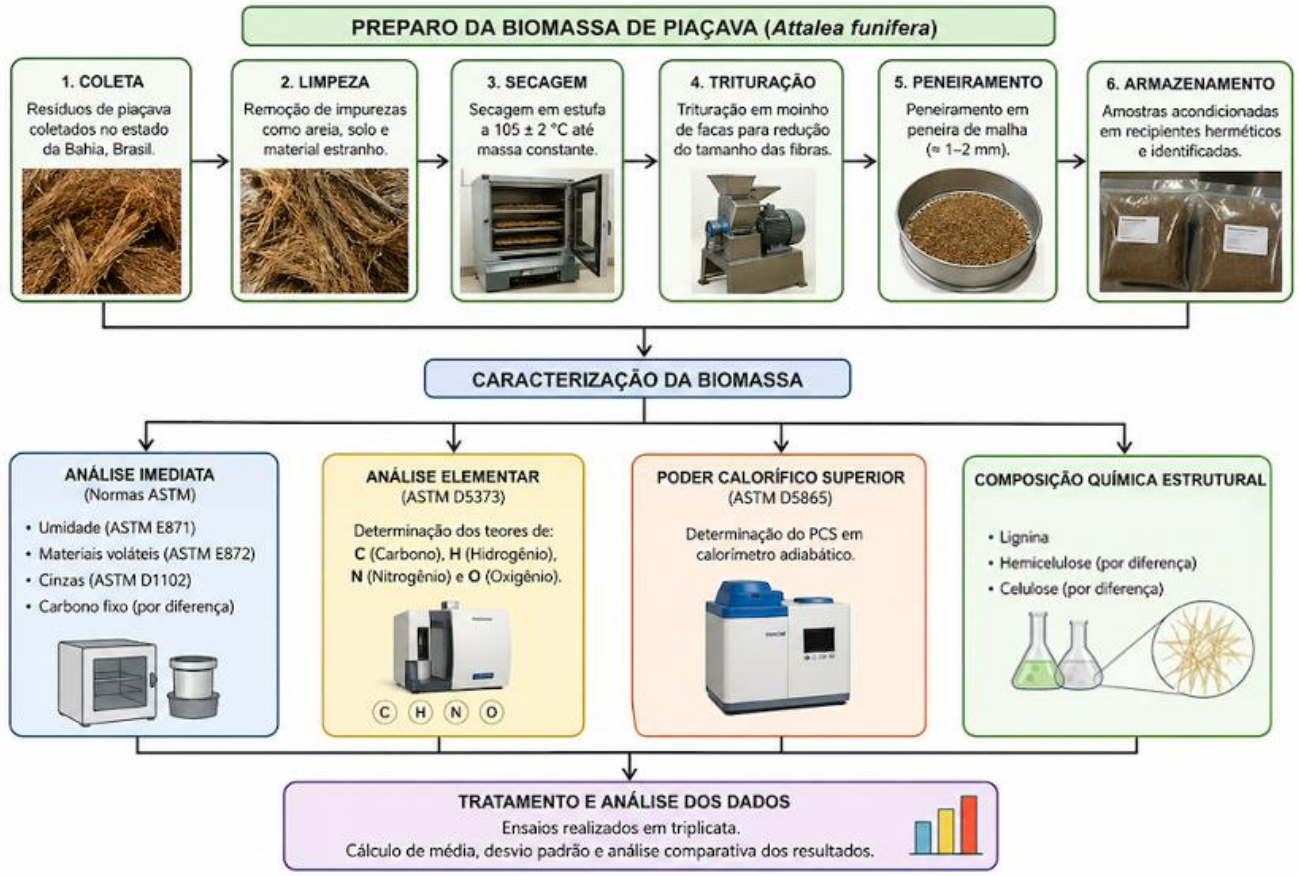


Figura 1 – Fluxo metodológico para preparo, caracterização físico-química e análise dos dados da biomassa de piaçava. Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

O procedimento experimental adotado neste estudo é apresentado de forma esquemática na Figura 1, na qual são ilustradas as principais etapas de preparo, caracterização e tratamento dos dados da biomassa de piaçava. O fluxo metodológico permite visualizar de maneira integrada as etapas experimentais realizadas, desde a coleta e preparo das amostras até a obtenção e análise dos parâmetros físico-químicos e energéticos. Todos os ensaios experimentais foram realizados em triplicata, visando garantir a confiabilidade dos resultados e permitir a obtenção de valores médios representativos.

Resultados e Discussão

Caracterização físico-química da biomassa

Os resultados da análise imediata da biomassa de piaçava são apresentados na Tabela 1.

Amostra	Umidade (%)	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
Piaçava (1)	1,67	71,77	9,65	16,91
Piaçava (2)	1,47	71,94	9,04	17,56
Piaçava (3)	1,54	71,81	9,16	17,49
Média	1,56	71,84	9,28	17,32
Desvio padrão	0,1	0,09	0,32	0,36

Tabela 1 – Resultados da análise imediata da biomassa de piaçava.
Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

Os resultados obtidos indicam baixos teores de umidade, com valores médios inferiores a 2%, o que representa característica altamente desejável para aplicações energéticas, uma vez que reduz perdas térmicas associadas à evaporação de água durante a combustão. O teor médio de materiais voláteis foi superior a 71%, valor típico de biomassas lignocelulósicas e associado à elevada reatividade térmica do material. Valores semelhantes de materiais voláteis são reportados para biomassas amplamente utilizadas em processos termoquímicos. O bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, apresenta teores de voláteis entre 70% e 80%, enquanto madeiras como eucalipto apresentam valores entre 75% e 85%. Dessa forma, o comportamento observado para a biomassa de piaçava indica elevada reatividade térmica e potencial adequado para processos de pirólise e gaseificação, nos quais a liberação de voláteis desempenha papel fundamental na formação de produtos gasosos e líquidos (WANG et al., 2022).

Adicionalmente, o baixo teor de umidade observado nas amostras representa vantagem significativa para aplicações energéticas, uma vez que reduz a necessidade de pré-secagem e minimiza perdas térmicas associadas à evaporação da água. Biomassas com teores de umidade inferiores a 10% são consideradas energeticamente favoráveis para combustão e gaseificação, indicando que a piaçava atende a critérios técnicos relevantes para uso como combustível sólido renovável.

Os teores de cinzas variaram entre aproximadamente 16% e 18%, valores considerados adequados para aplicações termoquímicas, não indicando limitações significativas para combustão ou gaseificação. O teor de cinzas constitui parâmetro relevante para avaliação do comportamento térmico da biomassa, pois influencia diretamente a formação de escórias, incrustações e depósitos em equipamentos térmicos. Biomassas com elevados teores minerais podem apresentar limitações operacionais em sistemas de combustão e gaseificação. Entretanto, os valores observados neste estudo permanecem dentro de faixas reportadas para resíduos agrícolas e florestais, indicando viabilidade técnica para aplicações energéticas, desde que sejam adotadas estratégias adequadas de controle operacional. O carbono fixo apresentou valores médios próximos a 9%, indicando potencial para formação de carvão residual durante processos termoquímicos.

Análise elementar

Os resultados da análise elementar são apresentados na Tabela 2.

Onde:

H/C = (H/1,008) / (C/12,011)

O/C = (O/15,999) / (C/12,011)

PCI estimado = PCS − 2,442 × [(9H/100) + (U/100)]

em que H é o teor de hidrogênio (%), U é a umidade (%) e PCS está em MJ/kg.

Amostra	PCS (MJ/kg)	PCI estimado (MJ/kg)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	H/C	O/C
Piaçava (1)	18,48	17,17	51,25	5,77	0,34	42,64	1,34	0,62
Piaçava (2)	18,23	16,9	51,86	5,91	0,35	41,88	1,36	0,61
Piaçava (3)	18,23	16,93	51,56	5,75	0,39	42,3	1,33	0,62
Média	18,31	17	51,56	5,81	0,36	42,27	1,34	0,62
Desvio padrão	0,14	0,15	0,31	0,09	0,03	0,38	0,01	0,01

Tabela 2 – Composição elementar, relações atômicas e valores estimados de PCI da biomassa de piaçava.
Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

Os elevados teores de carbono observados indicam elevada densidade energética da biomassa, enquanto os teores de hidrogênio contribuem para a liberação de energia durante processos de combustão. Os baixos teores de nitrogênio observados são particularmente relevantes, pois indicam menor potencial para formação de óxidos de nitrogênio durante a combustão,

contribuindo para menor impacto ambiental. Os baixos valores de desvio padrão observados indicam boa repetibilidade experimental e homogeneidade das amostras analisadas. As relações atômicas H/C e O/C representam parâmetros amplamente utilizados para avaliação do comportamento energético de biomassas lignocelulósicas. Valores reduzidos dessas relações estão associados a maior densidade energética e maior estabilidade térmica do material. No presente estudo, os valores médios obtidos de H/C (≈1,34) e O/C (≈0,62) são comparáveis aos reportados para biomassas florestais convencionais, indicando características adequadas para processos termoquímicos. O valor médio de PCI estimado próximo a 17 MJ/kg indica que a biomassa de piaçava apresenta densidade energética compatível com combustíveis sólidos tradicionais, reforçando sua viabilidade para utilização em sistemas de geração térmica e produção de energia renovável.

Segundo a literatura, biomassas com menores relações O/C apresentam maior poder calorífico e menor formação de produtos oxigenados durante a pirólise, favorecendo a produção de combustíveis com maior valor energético. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam o potencial da biomassa de piaçava como matéria-prima promissora para aplicações energéticas sustentáveis.

Composição estrutural

Os resultados da análise da composição estrutural são apresentados na Tabela 3.

Amostra	Matéria Seca (%)	Cinzas (%)	Lignina (%)	Hemicelulose (%)	Celulose (%)
Piaçava	93,1	1	43,1	3,4	52,2

Tabela 3 – Composição estrutural da biomassa de piaçava.
Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

Comparação com outras biomassas lignocelulósicas

A comparação das propriedades da biomassa de piaçava com outras biomassas lignocelulósicas amplamente estudadas permite avaliar sua competitividade energética e tecnológica. O elevado teor de lignina observado na biomassa de piaçava, superior a 40%, representa característica relevante para aplicações termoquímicas. A lignina apresenta maior resistência térmica quando comparada à celulose e hemicelulose, contribuindo para a formação de carvão sólido durante processos de pirólise. Esse comportamento favorece aplicações voltadas à produção de biochar, material amplamente utilizado como condicionador de solos e agente adsorvente.

Além disso, o elevado teor de celulose observado indica potencial para liberação significativa de energia durante processos de decomposição térmica, uma vez que essa fração é responsável por grande parte da formação de voláteis combustíveis. Dessa forma, a combinação entre elevados teores de lignina e celulose confere à biomassa de piaçava características estruturais favoráveis à conversão energética. Biomassas como bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e madeira apresentam, em geral, teores de materiais voláteis entre 65% e 80%, valores semelhantes aos observados neste estudo (DEMIRBAS et al., 2004). Dessa forma, os resultados obtidos para a piaçava indicam comportamento térmico compatível com materiais tradicionalmente utilizados em processos termoquímicos.

O teor de carbono médio superior a 51% observado na biomassa de piaçava é comparável aos valores reportados para biomassas florestais e agrícolas, indicando elevado potencial energético. Biomassas como madeira de eucalipto e pinus apresentam teores de carbono tipicamente entre 48% e 52%, reforçando a similaridade energética do material estudado.

Os valores médios de poder calorífico superior obtidos neste estudo, próximos a 18 MJ/kg, encontram-se dentro da faixa observada para biomassas lignocelulósicas tradicionais. O bagaço de cana-de-açúcar apresenta PCS entre 16 e 19 MJ/kg, enquanto madeiras duras podem atingir valores entre 18 e 21 MJ/kg. Dessa forma, a biomassa de piaçava demonstra potencial competitivo para utilização como combustível sólido renovável.

Outro aspecto relevante refere-se ao elevado teor de lignina observado na composição estrutural da biomassa, superior a 40%. Biomassas com elevados teores de lignina tendem a apresentar maior estabilidade térmica e maior formação de carvão residual, características desejáveis em processos como pirólise e carbonização. Assim, a piaçava apresenta características estruturais que favorecem sua utilização em aplicações energéticas avançadas.

De maneira geral, os resultados obtidos indicam que a biomassa de piaçava apresenta propriedades energéticas comparáveis às de biomassas amplamente utilizadas em sistemas industriais, como madeira e bagaço de cana-de-açúcar. Essa similaridade sugere que a piaçava pode ser integrada a sistemas energéticos existentes com adaptações mínimas, favorecendo sua inserção em cadeias produtivas voltadas à geração de energia renovável e ao aproveitamento sustentável de resíduos lignocelulósicos.

Avaliação do potencial energético da biomassa

A avaliação do potencial energético da biomassa baseia-se na análise integrada de suas propriedades físico-químicas e térmicas. O baixo teor de umidade observado nas amostras analisadas representa vantagem significativa, uma vez que reduz perdas energéticas associadas à evaporação da água durante processos de conversão térmica. Biomassas com baixos teores de umidade apresentam maior eficiência energética e menor custo operacional em sistemas de combustão e gaseificação.

Os elevados teores de materiais voláteis observados indicam boa reatividade térmica da biomassa, favorecendo sua ignição e a formação de gases combustíveis durante processos termoquímicos. Essa característica é particularmente importante em aplicações como pirólise e gaseificação, nas quais a liberação rápida de voláteis contribui para a formação de bio-óleo e gás de síntese.

O teor de cinzas observado, embora moderado, permanece dentro de limites aceitáveis para aplicações energéticas. A presença de cinzas está associada à fração mineral da biomassa e pode influenciar o comportamento térmico e a formação de depósitos em equipamentos. Entretanto, os valores obtidos neste estudo não indicam restrições significativas à utilização da piaçava em processos de conversão energética.

O poder calorífico superior representa um dos parâmetros mais relevantes na avaliação energética de biomassa. Os valores médios próximos a 18 MJ/kg indicam que a biomassa de piaçava possui densidade energética suficiente para aplicações em sistemas térmicos industriais e em unidades de geração distribuída.

Além disso, a composição estrutural da biomassa, caracterizada por elevado teor de lignina e celulose, reforça sua adequação para processos termoquímicos. A lignina contribui para a estabilidade térmica e para a formação de carbono sólido residual, enquanto a celulose favorece a liberação de energia durante a decomposição térmica.

Implicações para rotas tecnológicas de conversão energética

Os resultados obtidos indicam que a biomassa de piaçava apresenta características adequadas para utilização em diferentes rotas tecnológicas de conversão energética. Entre essas rotas destacam-se a combustão direta, a pirólise e a gaseificação, amplamente utilizadas na valorização energética de biomassas lignocelulósicas.

Na combustão direta, a biomassa pode ser utilizada como combustível sólido para geração de calor e eletricidade em sistemas industriais e comunitários. O baixo teor de umidade e o elevado teor de materiais voláteis observados favorecem a ignição rápida e a estabilidade da chama, contribuindo para maior eficiência térmica.

Na pirólise, processo realizado na ausência de oxigênio, a biomassa pode ser convertida em bio-óleo, biochar e gases combustíveis. O elevado teor de lignina observado na biomassa de piaçava indica potencial significativo para a produção de biochar, material com aplicações em fertilizantes, adsorventes e sistemas de sequestro de carbono.

Na gaseificação, a biomassa pode ser convertida em gás de síntese, composto principalmente por monóxido de carbono e hidrogênio, que pode ser utilizado como combustível gasoso ou como matéria-prima para a produção de combustíveis líquidos e produtos químicos. As características observadas neste estudo indicam que a piaçava apresenta propriedades adequadas para esse tipo de aplicação.

Dessa forma, a diversificação das rotas tecnológicas de aproveitamento da biomassa de piaçava amplia seu potencial de inserção em sistemas energéticos sustentáveis e fortalece estratégias de desenvolvimento tecnológico baseadas em recursos renováveis.

Sustentabilidade e impactos socioeconômicos

O aproveitamento energético da biomassa de piaçava apresenta implicações relevantes do ponto de vista ambiental e socioeconômico. A valorização de resíduos lignocelulósicos contribui para a redução do descarte inadequado de materiais e para a mitigação de impactos ambientais associados à decomposição natural desses resíduos.

Além disso, a utilização energética da biomassa pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que o carbono liberado durante a conversão térmica corresponde ao carbono previamente fixado durante o crescimento vegetal. Esse ciclo fechado de carbono representa uma das principais vantagens ambientais associadas ao uso de biomassa como fonte energética.

Do ponto de vista socioeconômico, o aproveitamento de resíduos da cadeia produtiva da piaçava pode promover geração de renda e fortalecimento de economias locais, especialmente em regiões do estado da Bahia onde essa atividade constitui importante fonte de sustento para comunidades tradicionais. A agregação de valor aos resíduos contribui para a diversificação das atividades produtivas e para o desenvolvimento sustentável regional.

Além disso, a utilização de biomassas residuais contribui para o fortalecimento da bioeconomia e para a transição energética, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade e redução das emissões de carbono.

De forma integrada, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a biomassa de piaçava apresenta características físico-químicas compatíveis com materiais amplamente utilizados em sistemas termoquímicos. A combinação entre baixos teores de umidade, elevado teor de materiais voláteis e composição estrutural favorável indica potencial significativo para aplicações energéticas diversificadas.

Além disso, a estabilidade observada nos resultados experimentais, evidenciada pelos baixos valores de desvio padrão, reforça a confiabilidade dos dados obtidos e indica boa homogeneidade da biomassa analisada. Esses aspectos são fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias baseadas em biomassa e para a viabilização de aplicações em escala industrial.

Considerações Finais

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a biomassa residual de piaçava apresenta características físico-químicas e energéticas compatíveis com aplicações em processos de conversão termoquímica. Os baixos teores de umidade observados contribuem para maior eficiência energética, enquanto os elevados teores de materiais voláteis indicam elevada reatividade térmica do material.

A análise elementar revelou elevados teores de carbono e hidrogênio, associados a boa densidade energética, enquanto os baixos teores de nitrogênio indicam menor potencial de formação de poluentes atmosféricos durante a combustão. O poder calorífico superior médio próximo a 18 MJ/kg evidencia que a biomassa de piaçava possui potencial competitivo quando comparada a outras biomassas lignocelulósicas amplamente utilizadas.

A composição estrutural revelou elevados teores de lignina e celulose, indicando estabilidade térmica e potencial para formação de carvão residual e gases combustíveis. Esses resultados demonstram que a biomassa de piaçava pode ser considerada matéria-prima promissora para processos como combustão direta, pirólise e gaseificação.

Dessa forma, o aproveitamento energético dessa biomassa representa alternativa viável para a valorização de resíduos florestais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável, para a redução de impactos ambientais e para o fortalecimento da bioeconomia regional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual Paulista (UNESP) pelo suporte acadêmico e infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho. Agradecem também às instituições parceiras envolvidas EEL-USP e UNIFEI nas análises laboratoriais e ao apoio técnico fornecido durante o desenvolvimento experimental.

Referências Bibliográficas

AVELAR, N. V. **Caracterização energética de biomassas lignocelulósicas.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2010.

ARAÚJO-SANTOS, J. M. et al. Biomass valorization and circular bioeconomy strategies in Brazil. **Renewable Energy**, v. 215, p. 118–132, 2025.

DEMIRBAS, A. Fuel characteristics of biomass materials. **Energy Sources**, v. 26, p. 133–146, 2004.

DOURADO, F. L. et al. Physicochemical characterization of lignocellulosic biomass residues from Brazilian palm species. **Biomass and Bioenergy**, v. 178, p. 106876, 2023.

HASSAN, M. M. et al. Recent advances in sustainable bioenergy production from lignocellulosic biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 312, p. 117862, 2024.

MONTEIRO, S. N. et al. Natural lignocellulosic fibers as engineering materials: an overview. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 40, p. 1219–1230, 2009.

MUJTABA, G. et al. Renewable biomass utilization and circular economy development. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, p. 136082, 2023.

ORIOLI, A. et al. Sustainable use of forest residues for energy generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 190, p. 113234, 2025.

VOEKS, R. A. The ethnobotany of piassava palm fibers in Bahia, Brazil. **Economic Botany**, v. 56, n. 1, p. 65–78, 2002.

WANG, S. et al. Thermal behavior and pyrolysis characteristics of lignocellulosic biomass. **Fuel**, v. 330, p. 125516, 2022.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, p. 1781–1788, 2007.

ROTAS TECNOLÓGICAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO: UMA REVISÃO DA APLICAÇÃO DE MÉTODOS QUANTITATIVOS NA BIOECONOMIA CIRCULAR

1 Thamires Costa de Lima, 2 Ingryd Yohane Bezerra Almeida Santos, 3 Luiz Moreira Coelho Junior
1 Universidade Federal da Paraíba, e-mail: thamires.lima@cear.ufpb.br; 2 Universidade Federal da Paraíba, e-mail: ingrydyohane@estudante.cear.ufpb.br; 3 Universidade Federal da Paraíba, e-mail: luiz@cear.ufpb.br.

Palavras-chave: bioenergia; aproveitamento de resíduos; planejamento energético

Resumo

O setor sucroenergético desempenha papel estratégico na produção de bioenergia e na valorização de resíduos agroindustriais no contexto da bioeconomia circular. Apesar dos avanços tecnológicos, a literatura apresenta uma abordagem fragmentada entre rotas produtivas, práticas circulares e aplicação de métodos quantitativos, o que limita a tomada de decisão. Este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de analisar a aplicação de métodos quantitativos nas rotas tecnológicas do setor sucroenergético. A pesquisa foi conduzida nas bases Scopus e Web of Science, considerando artigos e revisões publicados até 2025, com base em critérios de seleção e ranqueamento por indicadores bibliométricos. A amostra final compreendeu 50 estudos, analisados por meio de abordagem qualitativa e categorização temática. Os resultados indicam crescimento das publicações a partir de 2020, com foco em processos de conversão, aproveitamento de resíduos e eficiência produtiva. Observa-se que métodos de otimização e indicadores de sustentabilidade são aplicados de forma crescente, porém ainda de maneira pontual e não integrada às decisões tecnológicas. A principal contribuição do estudo reside na identificação de lacunas na integração entre rotas tecnológicas, economia circular e métodos quantitativos, oferecendo subsídios para o planejamento energético, a formulação de políticas públicas e o desenvolvimento de estratégias industriais mais eficientes e sustentáveis.

Introdução

O setor sucroenergético possui relevância estratégica na produção global de bioenergia e biocombustíveis, destacando-se a cana-de-açúcar como uma das matérias-primas mais promissoras para o aproveitamento de resíduos agroindustriais em diversas rotas produtivas (Akbarian *et al.,* 2022; Saravanan *et al.,* 2025). A bioeconomia circular potencializa ainda mais esses benefícios ao reutilizar subprodutos na cadeia produtiva, promovendo uma utilização mais eficiente dos recursos, diminuindo os impactos ambientais e incentivando a diversificação da matriz energética (Awasthi *et al.,* 2020; Sherwood, 2020).

A literatura aponta limitações significativas, destacando principalmente a análise isolada das rotas tecnológicas, nas quais as práticas de economia circular não são devidamente integradas e os métodos quantitativos são utilizados de forma pontual. Observa-se uma falta de articulação entre tecnologia, sustentabilidade e tomada de decisão quanto às rotas produtivas, o que reduz as alternativas no processo de escolha e alocação de recursos (Longo *et al.,* 2024; Velvizhi *et al*., 2022).

As pesquisas recentes mostram avanços nas rotas tecnológicas da cana-de-açúcar e a produção de biogás e biometano, a partir da vinhaça, como um produto promissor (Wang *et al.,* 2023; Carvalho *et al*., 2023). Observa-se a expansão do etanol de primeira e segunda gerações. Há melhorias nos processos produtivos com foco em eficiência energética e redução de emissões, conforme os ensaios de Akbarian *et al.* (2022), Saravanan *et al*. (2025); Mignogna *et al*. (2024), Latiza e Rubi (2025). Métodos quantitativos são utilizados em problemas de otimização e desempenho produtivo e esses avanços ampliam o potencial tecnológico, mas não garantem integração analítica entre rotas, práticas circulares e métodos quantitativos como observado em Ranjbari *et al.* (2022), Sun e Fan (2020), Hong (2025) e Casau *et al.* (2022).

A ausência de integração restringe o uso de ferramentas quantitativas no setor sucroenergético, impactando o planejamento energético e a definição de estratégias industriais. Essa restrição prejudica a avaliação de rotas tecnológicas e o desempenho ambiental, evidenciando a necessidade de uma sistematização do conhecimento capaz de subsidiar decisões mais eficientes e sustentáveis (Jesus *et al*., 2021). A revisão da literatura é imprescindível para organizar o conhecimento existente, identificar lacunas e direcionar o desenvolvimento de pesquisas e aplicações mais eficazes.

Este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura sobre rotas tecnológicas no setor sucroenergético, com base em métodos consolidados de revisão (Tranfield; Denyer; Smart, 2003; Khan *et al.,* 2003). O foco recai sobre a aplicação de métodos quantitativos na bioeconomia circular. O objetivo é identificar abordagens, padrões e lacunas. O estudo busca apoiar a tomada de decisão e orientar pesquisas futuras.

Material e Métodos

A revisão sistemática da literatura foi conduzida com o objetivo de garantir transparência na seleção e análise dos estudos, além de permitir a replicação do procedimento metodológico e reduzir vieses (Tranfield; Denyer; Smart, 2003). A pesquisa apresentou caráter exploratório e foi estruturada a partir de três grupos de palavras-chave. O Grupo 1 (G1) contemplou termos relacionados ao setor sucroenergético e seus produtos. O Grupo 2 (G2) incluiu termos associados à economia circular e sustentabilidade. O Grupo 3 (G3) reuniu modelos e métodos quantitativos aplicados.

Os dados foram coletados nas bases Scopus e Web of Science (WoS) e as combinações de busca foram estruturadas a partir da interação entre os grupos de palavras-chave, mantendo o Grupo 1 fixo e combinando-o com os Grupos 2 e 3. Foram utilizadas expressões como: (G1) cana-de-açúcar OR bioenergia OR biomassa OR rotas da cana; (G2) economia circular OR bioeconomia circular; (G3) OIA OR métodos de otimização OR pesquisa operacional OR DEA.

A busca exploratória foi realizada sob diferentes combinações entre campos de pesquisa: título e tópico (título × título; título × tópico; tópico × título; tópico × tópico). Para seleção da amostra, adotou-se a combinação título × título como critério principal, por reduzir o número de resultados e aumentar a aderência temática, buscando os artigos publicados até 2025. Foram considerados apenas artigos e revisões publicados em língua inglesa. Após a coleta inicial, foi realizada a leitura dos títulos para aplicação dos critérios de exclusão. Foram removidos os ensaios que não utilizavam biomassa oriunda da cana-de-açúcar ou que não apresentavam aplicação agroindustrial. Também foram excluídos trabalhos que não abordavam a utilização de resíduos para geração de bioenergia ou biocombustíveis.

Para a seleção final da amostra, foi aplicado o procedimento de ranqueamento baseado em indicadores bibliométricos, considerando o CiteScore das revistas, o número de citações e o período de publicação. Foram excluídos periódicos sem CiteScore 2024 e artigos com índice inferior a 100, com o objetivo de reduzir a amostra em aproximadamente 50%. Posteriormente, foi realizada a leitura dos resumos, com exclusão dos estudos não alinhados ao escopo da pesquisa.

Os dados foram organizados em planilha MS Excel para tratamento e análise. Foram elaborados gráficos de distribuição espacial e evolução temporal das publicações.

A análise qualitativa seguiu abordagem indutiva orientada por conteúdo textual e a amostra foi agrupada por similaridade temática (Graneheim; Lindgren; Lundman, 2017). As categorias definidas foram: (i) evolução das pesquisas sobre a aplicação da biomassa; (ii) desafios e avanços do setor sucroenergético; (iii) rotas tecnológicas da cana-de-açúcar; (iv) otimização e sustentabilidade aplicadas à economia circular.

Resultados e Discussão

O uso de biocombustíveis e açúcar é significativo em todo o mundo, mas as matérias-primas para essa produção variam conforme o país. O Brasil, por exemplo, destaca-se com a cana-de-açúcar, enquanto nos Estados Unidos o milho é o principal recurso. Essas diferenças influenciam a distribuição espacial da produção, como ilustrado na figura 1, que mostra a divulgação de trabalhos por país.

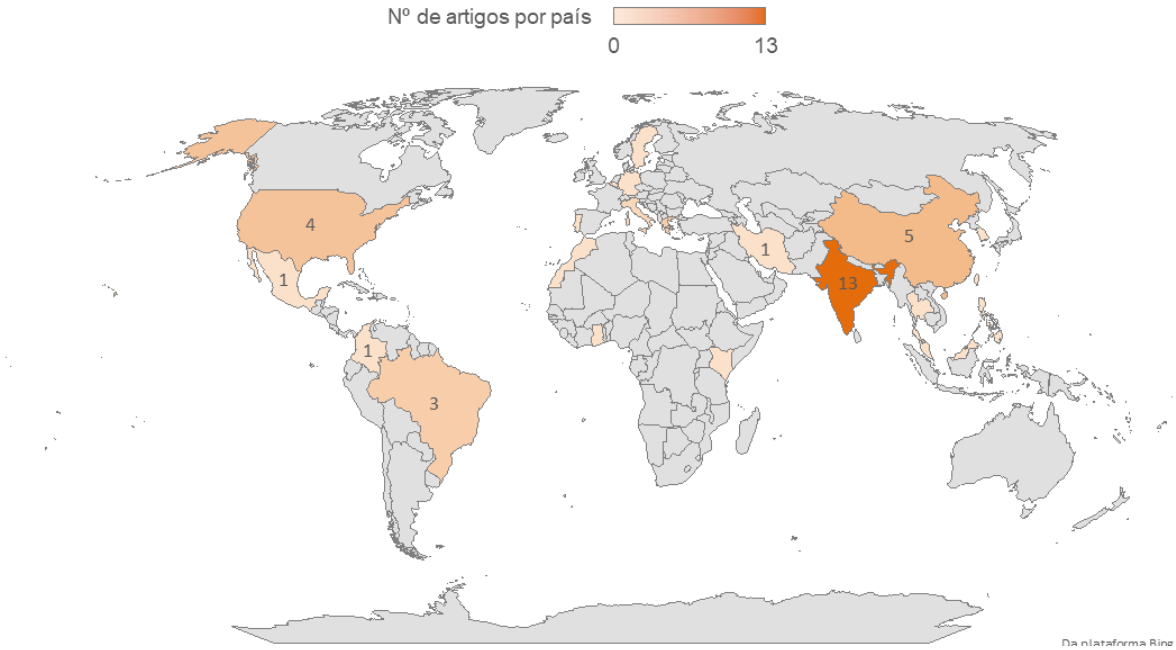
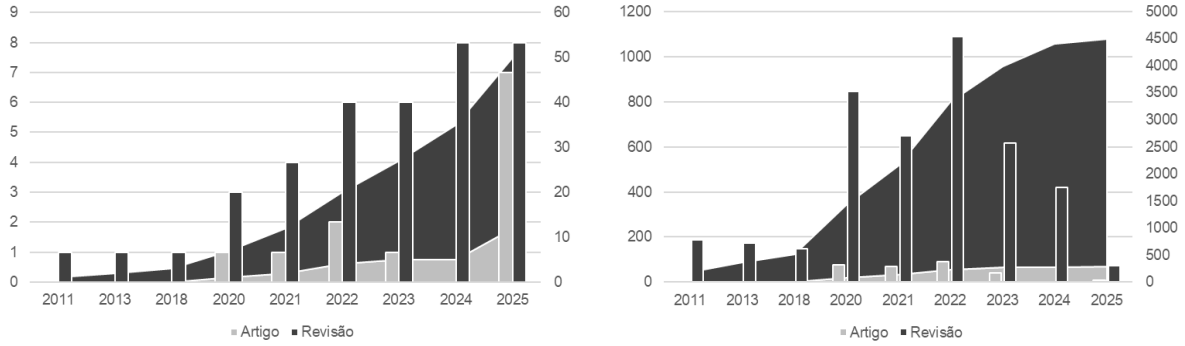


Figura 1: Distribuição espacial das publicações relacionadas ao setor sucroenergético.
Fonte: Autores (2026)

A Índia destaca-se no número de publicações devido à sua posição como produtora de etanol a partir da cana-de-açúcar, além do interesse em aprimorar a eficiência nos processos de pré-tratamento e conversão. Por sua vez, China, Estados Unidos da América e Brasil contabilizam, respectivamente, 5, 4 e 3 artigos, abordando diferentes elos da cadeia produtiva. A China demonstra avanços tecnológicos e aplicações voltadas à EC; os EUA concentram-se em indicadores de sustentabilidade e modelos de otimização; enquanto as pesquisas brasileiras enfatizam a aplicação da EC e o aproveitamento de resíduos para produção de etanol e biometano.

A Figura 2A ilustra a evolução das publicações ao longo do período analisado, enquanto a Figura 2B apresenta o número de citações nesse intervalo, evidenciando tanto os quantitativos anuais quanto acumulados de artigos e revisões.



A B

Figura 2: Evolução das publicações e citações nos trabalhos referente a circularidade nas indústrias sucroalcooleira. Fonte: Autores (2026)

Entre 2011 e 2018, houve uma quantidade reduzida de publicações sobre práticas de bioeconomia na agroindústria. A partir de 2020, verificou-se um aumento expressivo no número de artigos, especialmente revisões. Os anos de 2024 e 2025 apresentam destaque pelo crescimento tanto nas revisões quanto nos artigos publicados recentemente. Na revisão conduzida por Ranjbari *et al.* (2022), que realizou uma análise sistemática sobre economia circular e biomassa, ficou evidente que as publicações sobre esses temas começaram a se expandir em 2016, com um impulso significativo após 2020, como ilustrado no gráfico da figura 2A. Sobre a figura 2B, nota-se que os anos de 2020 e 2022 se destacam pelo volume de citações, indicando que os estudos mais recentes, focados em fundamentos novos e avanços tecnológicos ligados à economia circular, suplantam a influência dos trabalhos mais antigos. O número de citações diminui a partir de 2023, refletindo a natureza mais recente dessas publicações.

Os artigos analisados foram organizados conforme as categorias descritas na tabela 1. A distribuição detalhada da amostra, incluindo os grupos, número de artigos e respectivas referências, está apresentada na tabela 2.

Categoria principal	Nº de artigos	Referências
Evolução das pesquisas sobre a aplicação da biomassa	2	Ranjbari *et al.* (2022); Casau *et al.* (2022)
Desafios e avanços do setor sucroenergético	26	Akbarian *et al*. (2022); Awaafo *et al*. (2024); Awasthi *et al*. (2020); Bansod *et al*. (2024); Bhat *et al*. (2024); Carrillo-Rodríguez; Romero; Larrahondo (2025); Chaudhary *et al*. (2025); Devi *et al.* (2022); Hsiao; Hu (2024); Kaushik; Kataria (2024); Sarangi *et al*. (2023); Kumar; Verma, (2021); Mignogna *et al*. (2024); Banu *et al*. (2021); Sadh *et al*. (2023); Santhappan; Winsly; Mathimani (2025); Saravanan *et al*. (2023); Saravanan *et al*. (2025); Sherwood (2020); Singh *et al*. (2021); Thaha *et al*. (2025); Vasileiadou (2024); Velvizhi *et al*. (2022); Wagh *et al*. (2024); Yaashikaa; Kumar; Varjani (2022); Zabaniotou (2018)
Rotas tecnológicas da cana-de-açúcar	7	Subbrao *et al.* (2023); Carvalho *et al.* (2023); Latiza; Rubi (2024); Rodriguez *et al.* (2021); Wang *et al.* (2025); Wang *et al*. (2023); Koytsoumpa *et al*. (2021);
Otimizações e sustentabilidade aplicados a EC	15	Sun; Fan (2020); Hong (2025); Jesus *et al*. (2021); Longo *et al*. (2024); Virginio; Fontgalland; Barbosa (2025); Lin *et al*. (2025); Rosales *et al.* (2025); Dale *et al*. (2013); Mcbride *et al*. (2011); Kamau; Mwito (2025); Yang *et al*. (2022); Li; Zhang; MA (2025); Yatim *et al*. (2022); Dam *et al*. (2025); Mojaver; Khalilarya; Chitsaz (2020)

Tabela 2: Classificação sistemáticas dos trabalhos nas categorias de análise. Fonte: Autores (2026)

A biomassa constitui uma das fontes de energia mais antigas, embora sua aplicação tenha se restringido ao meio rural após a Revolução Industrial. Contudo, diante da necessidade de diversificar o fornecimento energético e priorizar fontes renováveis, a biomassa tornou-se um foco central nas pesquisas científicas. Casau *et al.* (2022) observaram que, na década de 1970, os estudos concentravam-se principalmente na otimização do processo de combustão, então predominante. A partir dos anos 2000, ocorreram avanços em novos processos, viabilizando a geração de diferentes produtos e ampliando o interesse por biocombustíveis entre pesquisadores. Nos últimos anos, as publicações têm enfatizado aspectos relacionados à sustentabilidade, especialmente no que tange à redução de emissões de gases de efeito estufa e aos impactos climáticos. As primeiras menções conjuntas aos termos "Economia Circular" e "Biomassa" datam de 2011; entretanto, após 2020, registrou-se um aumento expressivo no número de publicações, destacando-se a Itália pela contribuição à literatura (Ranjbari *et al.*, 2022). As principais lacunas identificadas nas revisões referem-se à viabilidade técnico-econômica para adoção de novas práticas na Economia Circular e ao desenvolvimento de rotas inovadoras de produção utilizando tais insumos (Casau *et al.*, 2022; Ranjbari *et al.*, 2022).

Desafios e avanços do setor sucroenergético

A produção de açúcar, etanol e bioenergia provenientes da cana-de-açúcar enfrenta diversos desafios produtivos, especialmente no que se refere à implementação da biocircularidade em seus processos. Desde a escolha da matéria-prima, que impacta os procedimentos de pré-tratamento e conversão, até a eficiência produtiva da primeira e segunda gerações, bem como dos coprodutos, todos esses fatores são determinantes. O contexto atual e as políticas públicas influenciam diretamente a demanda e promovem a integração da Economia Circular nos processos, cujos impactos são avaliados em diferentes cenários. A Figura 3 apresenta os desafios e avanços nos processos produtivos dos derivados da cana-de-açúcar, onde as 26 revisões desta seção foram classificadas nos seguintes grupos: processos; produtos; cenários; e medições/análises.

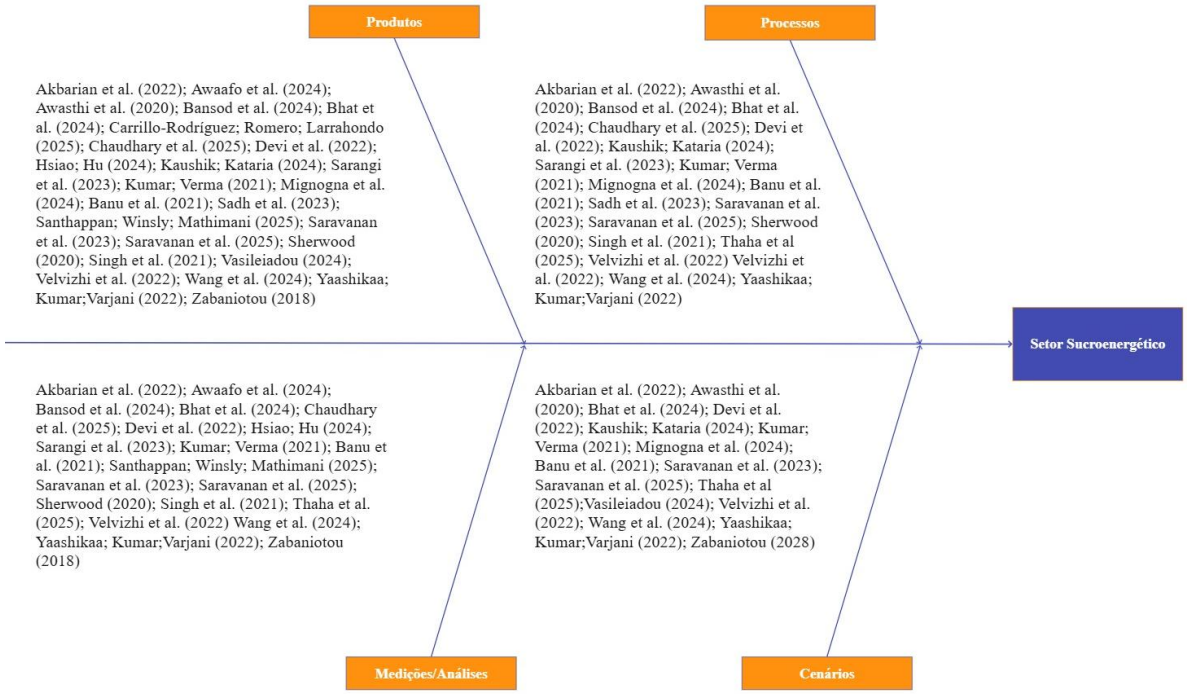


Figura 3: Desafios e avanços nos processos produtivos dos derivados da cana-de-açúcar.
Fonte: Autores (2026)

Processos: A eficiência dos pré-tratamentos e da conversão da biomassa é diretamente condicionada às características da matéria-prima, tais como umidade, composição lignocelulósica e teor de sacarose. Dessa forma, diferentes métodos físicos, químicos, biológicos e híbridos são analisados quanto aos parâmetros, vantagens e limitações, sendo a seleção determinada pelo tipo de biomassa e pelo produto final almejado. Entre os principais desafios destacam-se o elevado consumo energético e a dependência da eficácia do pré-tratamento, fatores que impulsionam ajustes operacionais, integração de processos e otimização de parâmetros. A logística representa outro aspecto relevante, visto que a biomassa apresenta baixa densidade e elevado volume, o que acarreta custos elevados de transporte; por isso, técnicas de secagem e densificação são investigadas. No contexto da economia circular, as biorrefinarias desempenham papel estratégico ao processar múltiplas entradas e gerar diversos produtos, promovendo o aproveitamento integral dos resíduos.

Produtos: O perfil dos resíduos e o processo de conversão adotado definem os coprodutos obtidos, como exemplificado pela gaseificação, que produz gás de síntese, biogás e biometano, ou pela pirólise, responsável pela obtenção de biochar, bio-óleo e biocarvão. Estes produtos apresentam aplicações abrangentes nos setores de energia, biocombustíveis, bioquímicos, bioplásticos e fármacos. Os desafios envolvem a integração de novas tecnologias, que demanda investimentos significativos, bem como a valorização de resíduos provenientes de diferentes gerações. As pesquisas otimizam custos e incrementam a sustentabilidade, favorecendo a transição de processos isolados para sistemas combinados, que potencializam a produtividade energética.

Cenários: A compreensão das demandas energéticas atuais é fundamental para embasar a migração para fontes renováveis, como a biomassa. Acordos climáticos impulsionam políticas nacionais, incluindo as NDCs, que estimulam o uso de biocombustíveis e o aumento da proporção de etanol na gasolina – prática implementada por países como Brasil e Índia. O setor enfrenta obstáculos para consolidar processos e ampliar a oferta de produtos, entretanto, as perspectivas são favoráveis diante das inovações tecnológicas e dos incentivos à economia circular.

Medições/Avaliações: A produção de biocombustíveis envolve uma cadeia complexa, abrangendo cultivo, transporte, processamento e gestão de resíduos, o que torna imprescindíveis avaliações ambientais, como a Análise de Ciclo de Vida (ACV) e indicadores de desempenho. Aspectos políticos também exercem influência no setor, incluindo legislações e programas de incentivo às energias renováveis e à biocircularidade. Ademais, os impactos socioeconômicos – geração de empregos, aumento de renda e desenvolvimento local – constituem fatores relevantes para a tomada de decisão. Relatórios e estudos fornecem informações essenciais para a orientação de stakeholders em um segmento que impacta diversas áreas da economia.

Rotas tecnológicas da cana-de-açúcar

As biomassas lignocelulósicas e as agroindústrias podem ser submetidas a diversos processos de pré-tratamento e conversão. No entanto, as empresas geralmente concentram seus esforços nas rotas tecnológicas que melhor se alinham ao seu planejamento estratégico, escopo de produtos, projetos de investimento e demandas do mercado ou dos clientes.

Os resíduos gerados permitem a obtenção de diferentes produtos por intermédio de variados processos. Por serem derivados de uma planta, o melhoramento genético pode ser direcionado para aumentar a resistência a agrotóxicos, dentre outros aprimoramentos (Wang *et al.*, 2025). A vinhaça apresenta elevado potencial para a produção de biogás, biometano, hidrogênio e energia elétrica (Carvalho *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023). A incorporação de novos sistemas intensifica o consumo energético e a emissão de CO_2, divergindo das metas de emissões negativas. Nesse contexto, os sistemas BECCS representam uma ferramenta relevante para a mitigação dos impactos ambientais e da liberação em grande escala de gases de efeito estufa.

Além das rotas mencionadas, existem alternativas que utilizam resíduos das indústrias sucroalcooleiras para geração de bioenergia, biocombustíveis e coprodutos de aplicações não energéticas, como fármacos e bioplásticos. Observa-se que o reaproveitamento, reutilização e reprocessamento desses rejeitos encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento. Abordagens como digestão anaeróbica e melhoramento genético estão mais consolidadas e vêm sendo adaptadas para aplicação no setor e para objetivos circulares. Ferramentas mais recentes, contudo, enfrentam desafios para sua implementação em escala industrial e para maior adoção pelas indústrias.

Otimização e sustentabilidade aplicadas à Economia Circular

No setor sucroenergético, ainda existem diversas limitações para a adoção eficaz de múltiplas práticas de economia circular, dificultando a obtenção de um segmento mais sustentável, produtivo e renovável. Para superar essas barreiras, métodos quantitativos e de otimização vêm sendo empregados.

O transporte da biomassa traz desafios técnicos, por isso, diferentes estratégias e modelos têm sido utilizados para otimizar rotas, reduzir o consumo de combustível e as emissões, diminuir o tempo de armazenamento e oferecer soluções alinhadas com a realidade de cada planta industrial. O uso de modelos matemáticos aliado à inteligência artificial permite identificar lacunas e reunir dados e parâmetros úteis para solucionar problemas práticos, como selecionar a melhor matéria-prima (Mojaver; Khalilary; Chitsaz, 2020) ou buscar maior eficiência por meio de modelos com redes neurais (Yatim *et al.*, 2022).

A transição do modelo econômico linear para o circular é motivada principalmente pela otimização dos processos e pelo aumento dos retornos financeiros, especialmente com a comercialização de coprodutos que trazem benefícios ambientais positivos (Virginio; Fontgalland; Barbosa, 2025). Contudo, as barreiras econômicas e financeiras, associadas à falta de incentivos públicos e ao alto custo das novas tecnologias, afetam especialmente empresas que recebem poucos estímulos de políticas públicas.

A circularidade busca ampliar a sustentabilidade, portanto, indicadores são fundamentais para medir e monitorar os impactos mais relevantes. A produção de bioenergia a partir da cana-de-açúcar envolve etapas e processos que exigem esse acompanhamento devido ao grande consumo de água, energia e uso do solo. A literatura propõe indicadores em categorias como qualidade do solo, qualidade e quantidade de água, gases de efeito estufa, biodiversidade, qualidade do ar e produtividade (Mcbride *et al.*, 2011), além de aplicações específicas (Rosales *et al.*, 2025) para a produção de bioenergia. Também é possível analisar outros aspectos além dos sustentáveis e físicos, utilizando indicadores sociais e econômicos que abordam bem-estar social, segurança energética, comércio externo, lucratividade, conservação dos recursos e aceitação social (Dale *et al.*, 2013). Assim, o uso de resíduos para gerar novos produtos contribui para a sustentabilidade empresarial, reforçando a importância da adoção de práticas circulares e do maior aproveitamento dos materiais e resíduos gerados pelo setor sucroenergético, que podem ser monitorados ao longo de toda a cadeia produtiva por meio de ferramentas de indicadores.

Conclusão

A literatura sobre economia circular e biomassa no setor sucroenergético apresenta crescimento significativo a partir de 2020, com foco nos avanços dos processos de pré-tratamento, conversão e aproveitamento de resíduos. Esses avanços reforçam o potencial do setor na produção de bioenergia e na redução de impactos ambientais. Observa-se, contudo, uma abordagem fragmentada entre rotas tecnológicas, práticas de economia circular e aplicação de métodos quantitativos. Essa limitação reduz a eficiência na tomada de decisão e dificulta a seleção de rotas produtivas mais sustentáveis e economicamente viáveis. A análise evidenciou que métodos de otimização, indicadores de sustentabilidade e modelos quantitativos vêm sendo aplicados de forma crescente, porém ainda de maneira pontual. A ausência de integração entre essas ferramentas e os processos produtivos representa uma lacuna relevante na literatura. Este estudo contribui ao sistematizar o conhecimento existente e identificar lacunas na aplicação de métodos quantitativos no contexto da bioeconomia circular. Os resultados oferecem subsídios para o planejamento energético, a definição de estratégias industriais e o desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao fortalecimento do setor sucroenergético. Como agenda futura, recomenda-se o desenvolvimento de modelos integrados que articulem rotas tecnológicas, desempenho ambiental e critérios econômicos, ampliando o suporte à tomada de decisão em sistemas de bioenergia.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2025/20210-7. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do PRH-ANP 35/UFPB – Transição

Energética (Processo nº 2025/03815-2), contribuindo à pesquisa, à formação de recursos humanos e ao desenvolvimento do setor energético no contexto da transformação ecológica. Os autores também expressam sua gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo nº 304407/2025-9) e o apoio financeiro ao projeto "Bioeconomia circular da indústria sucroenergética brasileira: Mensurando práticas sustentáveis e a descarbonização na geração de energia" (Processo nº 407357/2025-4).

Referências Bibliográficas

AKBARIAN, Atefeh *et al.* Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass gasification in the path of circular bioeconomy. **Bioresource Technology**, v. 362, n. 127774, p. 127774, 2022.

AWAAFO, Augustine *et al.* Crops production and the contribution of agricultural biomass power generation to Africa's clean energy transition: Analysis of trends from 1990 to 2021. **Biomass & Bioenergy**, v. 186, n. 107244, p. 107244, 2024.

AWASTHI, Mukesh Kumar *et al.* Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 127, n. 109876, p. 109876, 2020.

BANSOD, Shama P. *et al.* Advanced pretreatment processes for lignocellulosic biomass to biofuels production: Path towards circular bioeconomy. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 39, n. 101514, p. 101514, 2024.

BANU, J. Rajesh *et al.* Lignocellulosic biomass based biorefinery: A successful platform towards circular bioeconomy. **Fuel (London, England)**, v. 302, n. 121086, p. 121086, 2021.

BHAT, Mudasir Ahmad *et al.* Lignocellulosic biomass in circular economy: A techno-transition in carbon neutrality towards sustainable energy production. **Biomass & Bioenergy**, v. 189, n. 107349, p. 107349, 2024.

CARRILLO-RODRÍGUEZ, Lilian A.; ROMERO, Margot Cajigas; LARRAHONDO, Jose Antonio Galindo. The use of agro-industrial waste towards a sustainable circular economy: A systematic review. **Detritus**, n. 31, p. 45–61, 2025.

CARVALHO, Júlio Cesar de *et al.* Biomethane production from sugarcane vinasse in a circular economy: Developments and innovations. **Fermentation**, v. 9, n. 4, p. 349, 2023.

CASAU, Margarida *et al.* Residual biomass: A comprehensive review on the importance, uses and potential in a circular bioeconomy approach. **Resources**, v. 11, n. 4, p. 35, 2022.

CHAUDHARY, Anu *et al.* Recent technological advancements in biomass conversion to biofuels and bioenergy for circular economy roadmap. **Renewable Energy**, v. 244, n. 122714, p. 122714, 2025.

DALE, Virginia H. *et al.* Indicators for assessing socioeconomic sustainability of bioenergy systems: A short list of practical measures. **Ecological Indicators**, v. 26, p. 87–102, 2013.

DAM, Thi Huyen Trang *et al.* Stakeholder-driven circular economy on marginal lands: Governance and sustainability trade-offs in biomass value chains. **Sustainable Production and Consumption**, v. 59, p. 82–98, 2025.

DEVI, Arti *et al.* Lignocellulosic biomass valorization for bioethanol production: A circular bioeconomy approach. **Bioenergy Research**, v. 15, n. 4, p. 1820–1841, 2022.

GRANEHEIM, Ulla H.; LINDGREN, Britt-Marie; LUNDMAN, Berit. Methodological challenges in qualitative content analysis: A discussion paper. **Nurse Educ Today**, v. 56, p. 29–34, 2017.

HONG, Jae Dong. Application of the extended two-stage network DEA model for the biomass-biofuel logistics network design. **International Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 16, n. 1, p. 76–89, 2025.

HSIAO, Chen-Jie; HU, Jin-Li. Biomass and circular economy: Now and the future. **Biomass (Basel, Switzerland)**, v. 4, n. 3, p. 720–739, 2024.

JESUS, Gessica Mina Kim *et al.* Barriers to the adoption of the circular economy in the Brazilian sugarcane ethanol sector. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 2021.

KAMAU, Ezekiel Areri; MWITO, Moses Mutharime Mwito. Influence of selected institutional factors on adoption intensity of circular economy practices among sugarcane and rice processors in Western Kenya. **Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences**, p. 1473–1480, 2025.

KAUSHIK, Vishal; KATARIA, Rashmi. Non-conventional strategies for pretreatment of lignocellulosic biomass for production of value-added products: a sustainable and circular economy approach. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2024.

KHAN, K.S., *et al*. Five Steps to Conducting a Systematic Review. **J. R. Soc. Med**. 2003, v. 96, p. 118–121.

KOYTSOUMPA, E. I. *et al.* Bioenergy with carbon capture and utilization: A review on the potential deployment towards a European circular bioeconomy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 152, n. 111641, p. 111641, 2021.

KUMAR, Bikash; VERMA, Pradeep. Biomass-based biorefineries: An important architype towards a circular economy. **Fuel (London, England)**, v. 288, n. 119622, p. 119622, 2021.

LATIZA, Rich Jhon Paul; RUBI, Rugi Vicente. Circular economy integration in 1G+2G sugarcane bioethanol production: Application of carbon capture, Utilization and Storage, closed-loop systems, and waste valorization for sustainability. **Applied Science and Engineering Progress**, 2025.

LI, Chanyun; ZHANG, Yifei; MA, Chenshuo. Socioeconomic determinants of biomass energy transition in China: A multiregional spatial analysis for sustainable development. **Energies**, v. 18, n. 10, p. 2477, 2025.

LIN, Shwe Yie *et al.* Circular economy models of sugarcane biorefinery towards carbon neutrality and environmental sustainability. **Sustainable Production and Consumption**, v. 59, p. 305–324, 2025.

LONGO, Sonia *et al.* Circular economy and life cycle thinking applied to the biomass supply chain: A review. **Renewable Energy**, v. 220, n. 119598, p. 119598, 2024.

MCBRIDE, Allen C. *et al.* Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems. **Ecological Indicators**, v. 11, n. 5, p. 1277–1289, 2011.

MIGNOGNA, Debora *et al.* Biomass energy and biofuels: Perspective, potentials, and challenges in the energy transition. **Sustainability**, v. 16, n. 16, p. 7036, 2024.

MOJAVER, Parisa; KHALILARYA, Shahram; CHITSAZ, Ata. Multi-objective optimization and decision analysis of a system based on biomass fueled SOFC using couple method of entropy/VIKOR. **Energy Conversion and Management**, v. 203, n. 112260, p. 112260, 2020.

RANJBARI, Meisam *et al.* Biomass and organic waste potentials towards implementing circular bioeconomy platforms: A systematic bibliometric analysis. **Fuel (London, England)**, v. 318, n. 123585, p. 123585, 2022.

RODRIGUEZ, Emily *et al.* Tensions in the energy transition: Swedish and Finnish company perspectives on bioenergy with carbon capture and storage. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, n. 124527, p. 124527, 2021.

ROSALES, Lizbeth Lucia Candelario *et al.* Evaluation of sustainability indicators of the sugarcane agroecosystem in Sihochac, Champotón, Campeche, Mexico. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 28, n. 2, 2025.

SADH, Pardeep Kumar *et al.* Recovery of agricultural waste biomass: A path for circular bioeconomy. **The Science of the Total Environment**, v. 870, n. 161904, p. 161904, 2023.

SANTHAPPAN, Joseph Sekhar; WINSLY, Beno Wincy; MATHIMANI, Thangavel. Integration of bioenergy in industrial symbiosis and the assessment of its environmental and life cycle impact for circular energy transition. **Energy Conversion and Management**, v. 345, n. 120376, p. 120376, 2025.

SARANGI, Prakash Kumar *et al.* Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 30, n. 4, p. 8526–8539, 2023.

SARAVANAN, A. *et al.* A review on regeneration of biowaste into bio-products and bioenergy: Life cycle assessment and circular economy. **Fuel (London, England)**, v. 338, n. 127221, p. 127221, 2023.

SARAVANAN, A. *et al.* A review on advancing sustainable energy: The role of biomass and bioenergy in a circular economy. **Sustainable Futures (Amsterdam, Netherlands)**, v. 10, n. 100835, p. 100835, 2025.

SHERWOOD, James. The significance of biomass in a circular economy. **Bioresource Technology**, v. 300, n. 122755, p. 122755, 2020.

SINGH, Surendra Pratap *et al.* Sugarcane wastes into commercial products: Processing methods, production optimization and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 328, n. 129453, p. 129453, 2021.

SUBBARAO, Paruchuri M. V. *et al.* Anaerobic digestion as a sustainable technology for efficiently utilizing biomass in the context of carbon neutrality and circular economy. **Environmental Research**, v. 234, n. 116286, p. 116286, 2023.

SUN, Ou; FAN, Neng. A review on optimization methods for biomass supply chain: Models and algorithms, sustainable issues, and challenges and opportunities. **Process Integration and Optimization for Sustainability**, v. 4, n. 3, p. 203–226, 2020.

THAHA, Ayisha Naziba *et al.* High impact biomass valorization for second generation biorefineries in India: Recent developments and future strategies for sustainable circular economy. **Biomass (Basel, Switzerland)**, v. 5, n. 1, p. 16, 2025.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.

VASILEIADOU, Agapi. From organic wastes to bioenergy, biofuels, and value-added products for urban sustainability and circular economy: A review. **Urban Science**, v. 8, n. 3, p. 121, 2024.

VELVIZHI, G. *et al.* Integrated biorefinery processes for conversion of lignocellulosic biomass to value added materials: Paving a path towards circular economy. **Bioresource Technology**, v. 343, n. 126151, p. 126151, 2022.

VIRGINIO, Laryssa Kelly de almeida; FONTGALLAND, Isabel Lausanne; BARBOSA, Maria de Fátima Nóbrega. Circular economy in the contemporary panorama of the sugarcane energy industries of Brazil's northeast. **Circular Economy and Sustainability**, v. 5, n. 4, p. 3575–3591, 2025.

WAGH, Mrunal S. *et al.* Valorisation of agro-industrial wastes: Circular bioeconomy and biorefinery process – A sustainable symphony. **Process Safety and Environmental Protection : Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B**, v. 183, p. 708–725, 2024.

WANG, Dongdong *et al.* Unlocking the potential of sugarcane: Advances in genomic innovation, biorefinery technologies, and stress resilience, and circular bioeconomy. **Industrial Crops and Products**, v. 236, n. 122080, p. 122080, 2025.

WANG, Quanliang *et al.* Biogas generation from biomass as a cleaner alternative towards a circular bioeconomy: Artificial intelligence, challenges, and future insights. **Fuel (London, England)**, v. 333, n. 126456, p. 126456, 2023.

YAASHIKAA, P. R.; KUMAR, P. Senthil; VARJANI, Sunita. Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 343, n. 126126, p. 126126, 2022.

YANG, Linsheng *et al.* Reconciling productivity, profitability and sustainability of small-holder sugarcane farms: A combined life cycle and data envelopment analysis. **Agricultural Systems**, v. 199, n. 103392, p. 103392, 2022.

YATIM, Fatima Ezzahra *et al.* Waste-to-energy as a tool of circular economy: Prediction of higher heating value of biomass by artificial neural network (ANN) and multivariate linear regression (MLR). **Waste Management (New York, N.Y.)**, v. 153, p. 293–303, 2022.

ZABANIOTOU, A. Redesigning a bioenergy sector in EU in the transition to circular waste-based Bioeconomy-A multidisciplinary review. **Journal of Cleaner Production**, v. 177,

PERSPECTIVAS DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE FRUTAS E VEGETAIS: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

1 Welly Viviane da Silva Santos, 2 Daniela dos Santos Santana, 3 José Fernando Thomé Jucá, 4 Maria Odete Holanda Mariano

Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: welleviviane@icloud.com; Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: daniela.ssantana@ufpe.br; Universidade Federal de Pernambuco, e-mai: jucah@ufpe.br;Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: odete.mariano@ufpe.br

Palavras-chave: Co-digestão; metano; biomassa; resíduos orgânicos.

Resumo

A gestão dos resíduos de frutas e vegetais (RFV) gerados em centrais de abastecimento representa um desafio ambiental e logístico, mas também uma oportunidade estratégica para a produção de biogás por biodigestão anaeróbia. Este estudo teve como objetivo mapear, por meio de uma análise bibliométrica, a produção científica internacional sobre a geração de biogás a partir de RFV no período de 2003 a 2025. A busca foi realizada na base Scopus, utilizando combinações de descritores relacionados a "fruit waste", "vegetable waste", "anaerobic digestion", "biogas" e "methane production", resultando inicialmente em 221 registros. Após a aplicação de critérios de inclusão e exclusão quanto ao tipo de documento, duplicidade e aderência temática, foram selecionados 124 artigos científicos, cujos metadados foram analisados com o auxílio do *software* VOSviewer. Foram empregadas técnicas de co-ocorrência de palavras-chave, co-citação de autores e acoplamento bibliográfico para identificar tendências de pesquisa, redes de colaboração e lacunas tecnológicas. Os resultados indicam crescimento expressivo das publicações a partir de 2014, com consolidação de temas como co-digestão, controle de ácidos graxos voláteis e otimização da hidrólise para estabilização do processo. Observou-se a liderança de países com forte base agroalimentar, em especial China, Índia e Brasil, além da formação de redes de cooperação que conectam estudos em escala laboratorial a aplicações em mercados atacadistas. Conclui-se que a valorização energética de RFV por biodigestão anaeróbia vem se consolidando como componente central de estratégias de economia circular e descarbonização em centrais de abastecimento, embora persistam desafios relacionados à sazonalidade dos resíduos, ao desenho de reatores e ao controle de instabilidades operacionais.

Introdução

A gestão de resíduos sólidos orgânicos em centros de abastecimento e logística (CEASAs) ultrapassa a questão logística e se posiciona como um desafio crítico para a engenharia ambiental e a saúde pública. A dinâmica de comercialização de produtos hortifrutigranjeiros gera diariamente toneladas de resíduos de frutas e vegetais (RFV) que, devido à sua alta perecibilidade e teor de umidade, tornam-se focos de odores e proliferação de vetores quando mal geridos (SILVA-JÚNIOR *et al.,* 2022). Historicamente, a disposição em aterros tem sido a solução padrão, contudo, essa prática ignora o alto potencial energético desses materiais e contribui para a emissão de gases de efeito estufa, agravando o potencial de aquecimento global (WANG *et al.,* 2022).

A capacidade energética da biomassa oriunda de resíduos de frutas e vegetais é notável, com estudos indicando potenciais de biometano (BMP) que podem atingir cerca de 0,30 m^3 $CH4/kg_{VS}$, apresentando uma biodegradabilidade superior a 59% (LIN et al., 2011). Diante disso, a biodigestão anaeróbia surge como uma solução para a gestão de resíduos orgânicos, viabilizando a conversão desses materiais em biogás e consolidando a transição de um passivo ambiental para uma fonte de energia renovável.

O processo de biodigestão anaeróbia ocorre em quatro fases interdependentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHATTERJEE; MAZUMDER, 2024). Inicialmente, enzimas extracelulares convertem polímeros complexos em monômeros solúveis, os quais são metabolizados por bactérias acidogênicas em ácidos graxos voláteis (AGV), álcoois e gases CO_2 e H_2. Subsequentemente, bactérias acetogênicas transformam esses produtos em acetato e hidrogênio, atuando em sintropia com as arqueias metanogênicas (acetoclásticas ou hidrogenotróficas), que realizam a conversão final desses substratos em biogás (CHATTERJEE; MAZUMDER, 2024; DINH; FUJIWARA, 2023).

Entretanto, em Resíduos de Frutas e Vegetais (RFV), a abundância de açúcares solúveis acelera as fases de hidrólise e acidogênese, provocando a "acidificação por choque". Esse fenômeno ocorre quando a produção de AGV excede a capacidade de consumo das arqueias metanogênicas, que possuem crescimento mais lento e alta sensibilidade à queda do pH (DINH; FUJIWARA, 2023). Tal desequilíbrio cinético resulta no acúmulo de ácidos e na inibição do sistema, podendo levar à falha total do reator (MORALES-POLO et al., 2021; DINH; FUJIWARA, 2023).

Para contornar essas limitações tecnológicas, a ciência tem explorado estratégias como o uso de sistemas em dois ou três estágios (LIU; LIAO, 2019), a codigestão com resíduos lignocelulósicos ou lodos (ARHOUN et al., 2019) e a aplicação de pré-tratamentos químicos e biológicos para otimizar a quebra de fibras (SCHIRMER *et al.,* 2023; GULL *et al.,* 2023). Apesar do amadurecimento das tecnologias de biogás, a aplicação específica para resíduos de mercados atacadistas enfrenta desafios de sazonalidade e variabilidade na composição da biomassa (ARHOUN *et al*., 2019; MORALES-POLO *et al.,* 2021).

Portanto, o presente estudo tem como objetivo analisar por meio de uma abordagem bibliométrica, a produção científica relacionada à geração de biogás a partir de resíduos de frutas e vegetais, identificando tendências de pesquisa, principais autores, países

e lacunas existentes na literatura. Segundo Martí-Herrero *et al.* (2019), tal análise permite identificar as tendências globais de pesquisa, mapear as lacunas tecnológicas e validar soluções que aproximem a teoria laboratorial da realidade operacional de escala real.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar, por meio de uma abordagem bibliométrica, a produção científica internacional sobre a biodigestão anaeróbia de resíduos de frutas e vegetais voltada à geração de biogás, no período de 2003 a 2025. Especificamente, busca-se responder às seguintes questões: (i) como evoluiu, ao longo do tempo, o volume de publicações sobre o tema; (ii) quais são os principais autores, periódicos, países e redes de cooperação que estruturam esse campo de pesquisa; e (iii) quais tendências tecnológicas e lacunas ainda persistem na transição dos estudos em escala laboratorial para aplicações em escala real em centrais de abastecimento e mercados atacadistas.

Materiais e Métodos

Para a realização da análise bibliométrica, adotaram-se as etapas propostas por Costa e Zoltowsky (2014) e Costa *et al.,* (2021), que compreendem: definição e delimitação da questão de pesquisa; seleção das bases de dados; escolha das palavras-chave e elaboração da string de busca, estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão, realização da busca e aplicação dos filtros; organização dos registros em gerenciadores bibliográficos e ferramentas de tabulação; e, por fim, caracterização dos artigos selecionados.

A coleta de dados foi realizada em outubro de 2025 na base de dados Scopus *(Elsevier),* escolhida por sua ampla cobertura em periódicos de alto impacto nas áreas de Engenharia e Ciências Ambientais. A estratégia de busca foi estruturada por meio da combinação de descritores em língua inglesa, utilizando os operadores booleanos *AND* e *OR*: *TITLE-ABS-KEY ("fruit waste" OR "vegetable waste") AND ("anaerobic digestion" OR "biogas" OR "methane production").* O recorte temporal foi definido entre os anos de 2003 e 2025, visando capturar a evolução tecnológica da última década.

A busca inicial retornou um total de 221 registros. Para o refinamento da amostra, foram aplicados critérios de inclusão e exclusão de forma criteriosa. Foram incluídos apenas artigos científicos originais e artigos de revisão (*Review*), garantindo a qualidade e o rigor da produção acadêmica analisada.

Como critério de exclusão, foram removidos documentos duplicados, capítulos de livros, notas editoriais e trabalhos que após a leitura técnica do título, palavras chaves e resumo, não apresentavam aderência direta ao tema de biodigestão anaeróbia voltada especificamente para o reaproveitamento de frutas e vegetais. Vale ressaltar que não foram aplicados filtros de idioma ou de área temática, de modo a preservar a abrangência global do estudo.

Após a aplicação dos filtros, a amostra final foi consolidada em 124 documentos. Os metadados foram exportados em formato CSV e organizados com o auxílio do Microsoft Excel para tabulação quantitativa. A análise qualitativa e a visualização das redes bibliométricas foram realizadas através do *software* VOSviewer (versão 1.6.20). Os indicadores analisados compreenderam a evolução anual das publicações, a identificação dos países e periódicos mais produtivos, além da análise de co-ocorrência de palavras-chave, permitindo a identificação dos principais nichos e tendências de pesquisa sobre a produção de biogás a partir de resíduos hortifrutigranjeiros.

Resultados Discussão

O interesse acadêmico pelo tema iniciou-se de forma incipiente em 2004, mantendo uma produção estável e reduzida até meados de 2012, conforme observado na Figura 01. A partir de 2014, nota-se um crescimento consistente no volume de publicações, com um salto produtivo acentuado a partir de 2018. Este fenômeno pode ser atribuído ao endurecimento de políticas ambientais internacionais e ao avanço de tecnologias de co-digestão, que tornaram o processo mais estável e atrativo (DINH; FUJIWARA, 2023). O pico de produção observado nos anos mais recentes corrobora a tese de que o reaproveitamento energético de resíduos hortifrutigranjeiros deixou de ser uma alternativa teórica para se tornar uma prioridade na agenda de descarbonização global (WANG *et al.,* 2022).

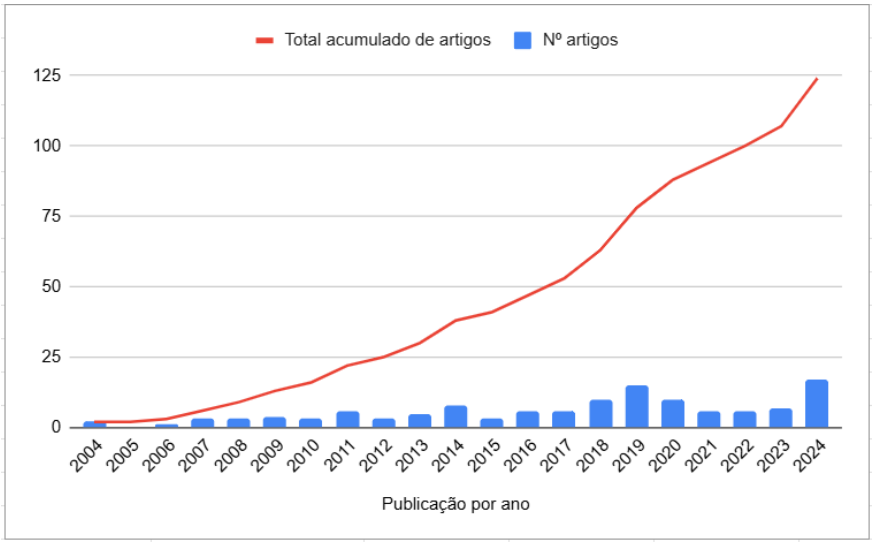


Figura 01: Produção cientifica internacional ao longo do ano.
Fonte: Autor (2026)

A rede de co-citações de autores revela a formação de clusters distintos, onde a proximidade entre os nós indica à frequência com que dois autores são citados simultaneamente nos 124 artigos analisados, conforme a figura 02, que mostra o protagonismo de pesquisadores que estabeleceram os fundamentos operacionais da digestão anaeróbia para biomassas sólidas.

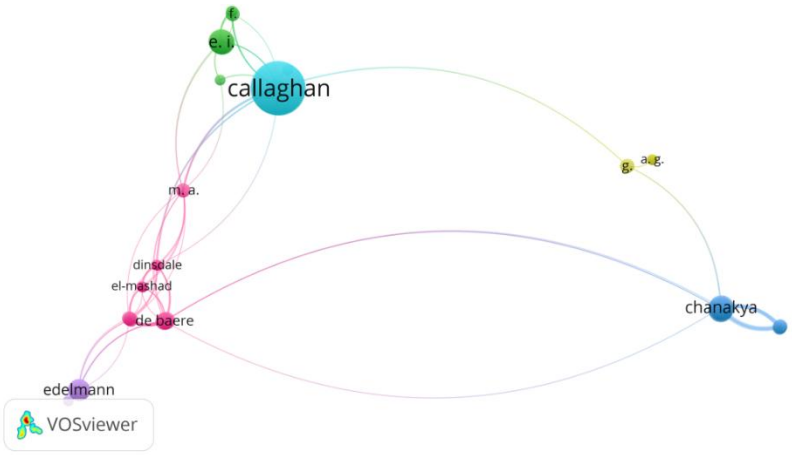


Figura 02: Rede de co-citações de autores.
Fonte: Autor (2026)

O destaque visual de Callaghan, C. fundamenta a importância da co-digestão como estratégia de estabilização. Em suas pesquisas, Callaghan demonstrou que a mistura de resíduos de frutas e verduras com outros substratos é essencial para equilibrar a relação carbono/nitrogênio, evitando a inibição do processo por excesso de acidez, um dos principais gargalos técnicos citados por Dinh e Fujiwara (2023). Assim, Callaghan atua como a base teórica para estudos que buscam maximizar o potencial de biometano através da sinergia entre diferentes resíduos orgânicos.

Simultaneamente, a presença relevante de Chanakya, H. N. no mapeamento ancora as discussões sobre o design de reatores específicos para resíduos sólidos "in natura". Chanakya é referência no desenvolvimento de reatores de leito de lixiviação (*Leach Bed Reactors* - LBR), tecnologia que permite a hidrólise de frutas e vegetais sem a necessidade de pré-tratamentos mecânicos complexos. Essa abordagem é particularmente relevante para centros de abastecimento em países em desenvolvimento, onde a simplicidade operacional e o baixo custo são determinantes para a viabilidade do sistema (SANTOS; QUADROS, 2024). A convergência entre a visão de co-digestão de Callaghan e a engenharia de processos de Chanakya sustenta a tendência atual de busca por sistemas que unam alta recuperação energética com resiliência operacional frente à sazonalidade dos resíduos de mercados atacadistas.

A análise de co-ocorrência de palavras, configurada com um nível de correlação de 9, revelou os domínios temáticos consolidados e as fronteiras do conhecimento na valorização de resíduos de frutas e vegetais (RFV). Conforme observado na Figura 03, A topologia do mapa revela a formação de clusters distintos que representam as diferentes abordagens da valorização de resíduos de frutas e vegetais (RFV). No cluster central, destacam-se os termos de maior densidade: "*Anaerobic Digestion*", "*Biogas*", "*Methane*" e "*Fruit and Vegetable*". A forte conexão entre esses descritores confirma que o foco central da comunidade científica é a conversão da fração orgânica em energia renovável, tratando o resíduo não apenas como um passivo ambiental, mas como um substrato estratégico para a produção de biometano (WANG et al., 2022).

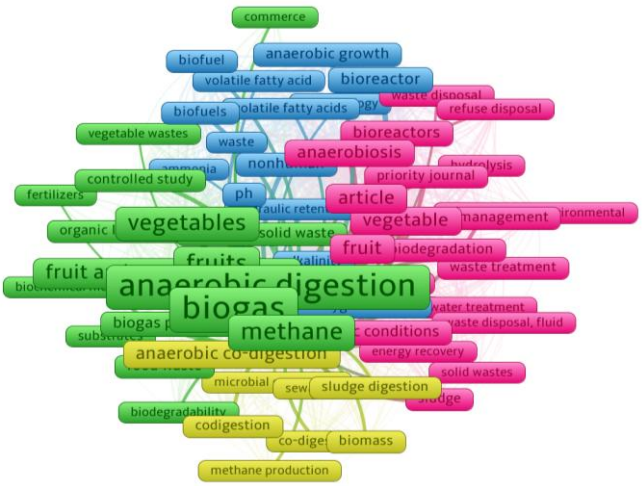


Figura 03: Nuvens de palavras.
Fonte: Autor (2026)

Os termos "Co-digestion", "Sewage Sludge" e "Microbial community" ganham evidência. A localização e o agrupamento desses termos indicam que a co-digestão anaeróbia é a solução técnica mais explorada para superar a instabilidade dos resíduos de frutas e vegetais. Ao misturar o resíduo hortifrutigranjeiro com lodo de esgoto ou dejetos animais, busca-se o equilíbrio da relação carbono/nitrogênio e o aporte de nutrientes necessários para a biomassa microbiana. Como observado por Arhoun *et al.,* (2019), essa integração reflete a transição para modelos de tratamento onde diferentes fluxos de resíduos orgânicos são combinados para maximizar o rendimento energético e garantir a estabilidade do pH no sistema.

Destacam-se os termos técnicos "Hydrolysis", "Volatile Fatty Acids" e "Biodegradability". A presença dessas palavras-chave revela que a fronteira do conhecimento atual está voltada para a compreensão das etapas iniciais e limitantes do processo biológico. O termo "Volatile Fatty Acids" (ácidos graxos voláteis) aparece com destaque para alertar sobre o desafio do acúmulo de acidez, que pode paralisar a produção de biogás, enquanto o termo "Hydrolysis" foca na etapa de quebra da matéria orgânica sólida. Este agrupamento demonstra que a pesquisa científica foca no controle rigoroso desses parâmetros para garantir a viabilidade operacional da tecnologia em centros de abastecimento (SANTOS; QUADROS, 2024).

No que tange à distribuição geográfica da produção científica, a análise dos metadados revela uma liderança acentuada de nações em desenvolvimento e grandes produtores agrícolas. A China figura como o país com maior volume de publicações, o que se justifica pela imensa geração de resíduos alimentares e pelo forte investimento estatal em biotecnologia anaeróbia (LIN *et al.,* 2011). Na sequência, destacam-se a Índia e o Brasil, onde a relevância das pesquisas é impulsionada pela capilaridade das CEASAs e pela necessidade de reduzir os custos logísticos e ambientais associados ao descarte em aterros (SILVA-JÚNIOR *et al.,* 2022). A presença de países europeus, como Itália e Espanha, também é significativa, refletindo o amadurecimento técnico de sistemas de escala real operando em mercados grossistas (ARHOUN *et al.,* 2019; MARTÍ-HERRERO *et al.,* 2019).

Essa dinâmica de cooperação é aprofundada pela análise de acoplamento bibliográfico (Figura 04), que identifica a formação de parcerias estratégicas baseadas na similaridade de referências teóricas. Neste contexto, foi estabelecida uma conexão de 14 países que contribuem com a pesquisa, utilizando como critério um número mínimo de 3 documentos de cada país e 2 citações mínimas. O mapeamento destaca o protagonismo da Índia e da China como os nós de maior densidade, servindo de base teórica para os demais países da rede. Observa-se um cluster robusto conectando o Brasil a nações como Espanha e México, sugerindo uma convergência de interesses voltada para a realidade de grandes centros produtores. As linhas espessas demonstram que o conhecimento é gerado de forma integrada, validando a posição estratégica brasileira em redes internacionais de aprimoramento da recuperação energética de resíduos de frutas e vegetais.

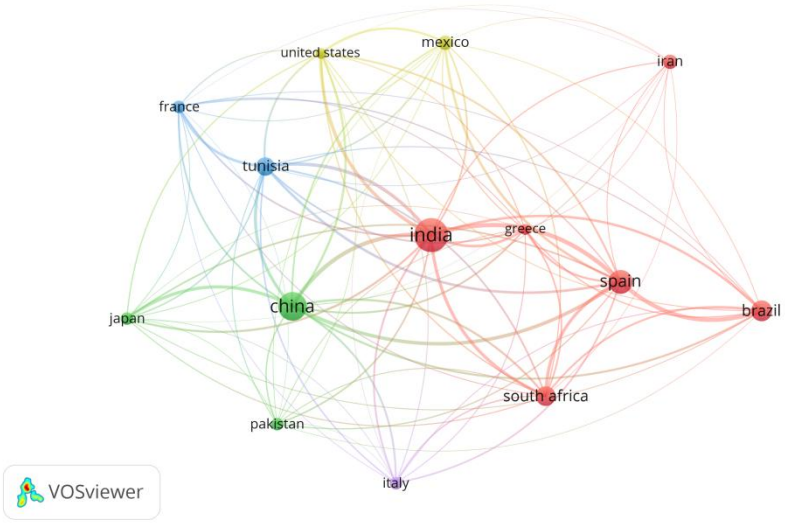


Figura 04: Resultados da aplicação da técnica Bibliographic coupling – Countries
Fonte: Autor (2026)

Considerações Finais

Portanto, o mapeamento bibliométrico realizado permitiu compreender que a produção de biogás a partir de resíduos de frutas e vegetais (RFV) amadureceu de uma promessa teórica para uma necessidade estratégica global entre 2003 e 2025. A análise evidenciou que, embora o potencial energético desses materiais seja elevado, o sucesso da operação em escala real depende diretamente do controle de gargalos cinéticos, como a acidificação precoce, e da adoção de estratégias como a co-digestão.

Observou-se que países com grande base agrícola, como China, Índia e Brasil, lideram não apenas o volume de publicações, mas também as redes de cooperação internacional, focando em soluções de baixo custo e alta eficiência para centros de abastecimento. Desta forma, conclui-se que o futuro da área reside na otimização da hidrólise e na estabilização do pH através da integração de diferentes fluxos de resíduos orgânicos. Este estudo reforça que a biodigestão de RFV é um pilar essencial para a economia circular, transformando passivos ambientais críticos em ativos energéticos fundamentais para a descarbonização da matriz global.

Agradecimentos

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq: Chamada 59/2022 - Linha 2 - "Desenvolvimento em Tecnologias Inovadoras para Redução de Emissões de GEE nos setores Agrícola, Florestal e Energético e para Adaptação às Mudanças Climáticas em Setores Prioritários da NDC Brasileira".

Referências Bibliográficas

ARHOUN, B. et al. Anaerobic co-digestion of mixed sewage sludge and fruits and vegetable wholesale market waste: Composition and seasonality effect. **Journal of Water Process Engineering**, v. 31, p. 100848, 2019.

Costa, C., Almeida, M. A. S. O., Ecard, W. C., Cesarino, E. J., Elchin, C. B., Moreira, L. M., ... & Munhoz, L. (2021). Ebook interativo guia prático Revisão Sistemática da Ideia a Publicação.

Costa, A. B., & Zoltowski, A. P. C. (2014). Como escrever um artigo de revisão sistemática. Manual de produção científica, 1, (pp. 55-70)

CHATTERJEE, B.; MAZUMDER, D. Valorization of fruit and vegetable waste in a novel three-stage hybrid anaerobic digester for enhanced biogas production: Performance study and microbial community analysis. **Biochemical Engineering Journal**, v. 209, p. 109403, 2024.

DINH, P. V.; FUJIWARA, T. Biogas Production and Energy Balance in a Two-Stage Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste: Thermophilic versus Mesophilic. **Fermentation**, v. 9, n. 7, p. 601, 2023.

GULL, M. et al. Enzymatic Pretreatment of Sugarcane Bagasse and Fruit-Vegetable Waste for Energy Conversion by Co-digestion. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, p. 1143-1155, 2023.

LIU, W. Y.; LIAO, B. Anaerobic Co-Digestion of Vegetable and Fruit Market Waste in LBR + CSTR Two-Stage Process for Waste Reduction and Biogas Production. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 188, p. 185-193, 2019.

LIN, J. et al. Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 8, p. 1403-1408, 2011.

MARTÍ-HERRERO, J. et al. Biogas from a full scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste. **Renewable Energy**, v. 133, p. 676-684, 2019.

MORALES-POLO, C. et al. Enhancing Energy Recovery in Form of Biogas, from Vegetable and Fruit Wholesale Markets By-Products and Wastes, with Pretreatments. **Plants**, v. 10, n. 7, p. 1298, 2021.

SCHIRMER, W. N. et al. The effect of alkaline pretreatment on the anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes from a central food distribution market. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 25, p. 2887-2899, 2023.

SILVA-JÚNIOR, F. C. G. et al. Characterization of Fruits and Vegetables Waste Generated at a Central Horticultural Wholesaler: A Case Study for Energy Production Via Biogas. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 2022.

SANTOS, G. V.; QUADROS, R. Capacidades dinâmicas para a transformação digital: uma análise bibliométrica exploratória com VOSviewer. **Revista de Gestão e Secretariado (GeSec)**, v. 15, n. 7, p. e3970, 2024.

WANG, Y. et al. Resource potential and global warming potential of fruit and vegetable waste in China based on different treatment strategies. **Waste Management**, v. 140, p. 225-232, 2022.

INFLUENCE OF FEEDSTOCK THERMAL DEGRADATION ON THE PERFORMANCE OF DIESEL-BIODIESEL BLENDS

1 Carmem Cícera Maria da Silva, 2 Gustavo Graciano Fonseca

1Faculty of Biological and Environmental Sciences, Federal University of Grande Dourados, Brazil, carmemcenos@gmail.com; 2Faculty of Natural Resource Sciences, School of Health, Business and Science, University of Akureyri, Iceland, gustavo@unak.is

Keywords: Engine performance; Thermal degradation; Specific fuel consumption

Abstract

The use of biodiesel to mitigate emissions from diesel cycle engines demands continuous optimization of both blend composition and feedstock quality. This study investigates engine performance, calorific value, and acidity index of mineral diesel (B0) blended with biodiesels derived from two sources: thermally degraded soybean oil (simulating frying conditions) and recycled oil (BRO). Tests were conducted on a diesel engine–generator set under increasing loads. In Experiment 1, blends containing 8% biodiesel produced from soybean oil degraded for 0, 1, 3, and 5 h (BSO-X) were compared with pure diesel. Acidity index increased proportionally with degradation time, confirming oxidation. Unexpectedly, the non-degraded blend (B0-BSO-0) exhibited the highest fuel consumption, while the 1-hour degraded blend (B0-BSO-1) achieved the lowest consumption and highest efficiency (19.31%) at maximum load (12.9 kW), closely matching pure diesel (20.18%). This performance paradox suggests that limited thermal exposure may generate oxygenated species that enhance fuel reactivity and combustion efficiency. In Experiment 2, increasing biodiesel concentration from recycled oil (up to 75%) led to the expected rise in fuel consumption with load, reflecting biodiesel's lower calorific value. The largest increases occurred at higher concentrations, especially B50 and B100. Overall, results highlight the strong influence of feedstock degradation on blend performance. Mild thermal degradation produced a more reactive and efficient fuel than both non-degraded and severely degraded samples, indicating an optimum degradation window for biodiesel production that can enhance engine efficiency.

Introduction

The combustion of fossil fuels, such as mineral diesel, is a major contributor to atmospheric pollution through the emission of noxious gases like CO, CO_2, NO_x. Biodiesel, an alternative biofuel derived from renewable sources, offers a compelling strategy to mitigate these emissions. Unlike mineral diesel, biodiesel is typically produced via the transesterification of oils of animal, vegetal, or microbial origin, making it technically compatible with existing diesel engine infrastructure (Landmann, 2019).

A critical environmental concern associated with mineral diesel is its high sulfur content. Sulfur is detrimental both to the environment and to the engine itself. During combustion, sulfur trioxide (SO_3) reacts with water to form sulfuric acid, leading to the corrosion of metal engine components like bearings and valve guides. High sulfur concentrations also correlate with elevated emissions of particulate matter and primary pollutants, such as SO_2 and SO_3, which negatively impact human health (Agency, 2018). In contrast, biodiesel is generally sulfur-free. Current regulatory standards (ANP resolutions) set a maximum sulfur limit of 10 mg/kg for both mineral diesel and biodiesel (Gebremariam and Marchetti, 2018).

The properties of the alkyl esters resulting from the transesterification reaction are comparable to those of mineral diesel, allowing biodiesel to be used in conventional diesel engines without substantial modification (Borugadda et al., 2012). Furthermore, certain intrinsic properties of biodiesel can enhance combustion efficiency and improve the emission profile. Blending alkyl esters with conventional diesel is a common practice used to effectively reduce the emissions of sulfur compounds, aromatics, and particulate matter produced by diesel cycle engines (Lima et al, 2008). In Brazil, the current strategy involves blending 12% biodiesel into commercially available diesel (ANP, 2020), with ongoing strategic interest to further increase this percentage.

Thus, the aim of this work was to evaluate the effect of mixtures of mineral diesel and biodiesels obtained from thermally degraded oils (simulating different stages of oil degradation, such as during frying) and recycled oils at different concentrations on the combustion of diesel cycle engines.

Material and Methods

Raw material

Refined soybean oil (SO) (48 L) (Soya, traceability code 0415 B 12: 499 RND 244728) was purchased locally. The characterization, degradation, and subsequent biodiesel production were completed within 50 days of the oil's production date. Recycled oil (RO) (50 L) was sourced from a local biodiesel producer (Dourados, MS, Brazil). This oil was collected by a cooperative and stored in a carbon steel tank prior to treatment; however, its original storage conditions are unknown. Pure mineral diesel oil (B0), containing a maximum of 10 ppm sulfur and free from any initial biodiesel addition, was supplied by a local distributor (Dourados, MS, Brazil).

Thermal degradation of soybean oil

Four treatments were generated from the commercial soybean oil (SO): SO-0 (undegraded SO, control), SO-1 (thermally degraded for 1 h), SO-3 (thermally degraded for 3 h), and SO-5 (thermally degraded for 5 h). The degradation process involved placing the oil in a 2 L beaker on a heating plate, where it was mixed using a magnetic stirrer for the designated time intervals (1, 3, or 5 h) at a controlled temperature of 175 ± 2 ˚C. This temperature range (175–185 ˚C) was selected as it is reported to be the maximum temperature typically reached in frying media and should not exceed (Asokapandian et al., 2020).

Biodiesel production from thermally degraded soybean oil

Biodiesels were synthesized using a two-step transesterification reaction. Methanol (Vetec, 99.5% purity, specific mass of 0.79 g cm^{-3}) was used as the transesterification agent, and a solution of sodium methylate in 70% methanol (Evonik, 30% purity, specific mass of 0.90 g cm^{-3}) was the catalyst. The absolute methanol consumption was 108.33% of the stoichiometric requirement (50% in the first step and 58.33% in the second). The catalyst ratio (0.11%) was determined based on the acidity of the non-degraded soybean oil (SO-0) and was applied uniformly across both reaction stages for all samples. The proportional amounts of methanol and sodium methylate were calculated based on the initial mass of the raw oil material.

For all syntheses (BSO-0, BSO-1, BSO-3, and BSO-5), the oil, methanol, and catalyst were simultaneously placed in a 2 L beaker, heated on a magnetic stirring plate at 60 ˚C, and stirred for 60 minutes in both reaction steps. This temperature was chosen as it falls within the optimum transesterification range (55–60 ˚C) while remaining safely below the boiling point of methanol (65 ˚C).

Preparation of diesel/biodiesel blends

The experimental evaluation was conducted in two distinct series (Table 01). Experiment 1 (Thermal Degradation): Biodiesels obtained from refined soybean oil (BSO-0) and the thermally treated oils (BSO-1, BSO-3, BSO-5) were blended with pure mineral diesel (B0) at a proportion of 8% biodiesel and 92% diesel (v v^{-1}), resulting in the mixtures B0-BSO-0, B0-BSO-1, B0-BSO-3, and B0-BSO-5. Experiment 2 (Recycled Oil): Blends were prepared using biodiesel from recycled oil (BRO) and mineral diesel (B0) at various concentrations: 0, 5, 15, 25, 35, 50, and 75% BRO (v v^{-1}), resulting in treatments B0, B5, B15, B25, B35, B50, and B75, respectively. Following preparation, the fuel blends were immediately stored in amber bottles and used for the combustion assay.

Table 01. Description and composition of biodiesel samples and mineral diesel blends

	Samples	Description
	BSO-0	Biodiesel obtained from soybean oil (SO) without any thermal treatment
	BSO-1	Biodiesel obtained from SO degraded thermally for 1 h
	BSO-3	Biodiesel obtained from SO degraded thermally for 3 h
	BSO-5	Biodiesel obtained from SO degraded thermally for 5 h
	BRO	Biodiesel obtained from recycled oil
Exp. 1	B0	Mineral diesel oil (100%)
	B0-BSO-0	Mixture of 92% B0 and 8% BSO-0
	B0-BSO-1	Mixture of 92% B0 and 8% BSO-1
	B0-BSO-3	Mixture of 92% B0 and 8% BSO-3
	B0-BSO-5	Mixture of 92% B0 and 8% BSO-0
Exp. 2	B0	Mineral diesel oil (100%)
	B5	Mixture of 95% B0 and 5% BRO
	B15	Mixture of 85% B0 and 15% BRO
	B25	Mixture of 75% B0 and 25% BRO
	B35	Mixture of 65% B0 and 35% BRO
	B50	Mixture of 50% B0 and 50% BRO
	B75	Mixture of 25% B0 and 75% BRO

Combustion assay in a diesel cycle engine

Fuel consumption and performance were evaluated using a diesel engine/generator set (Gera Power Brasil GB3500, model ATIMA 178F). The system featured a four-stroke, single-cylinder engine with direct injection and air cooling, a cylinder capacity, a maximum output power of 7.0 HP at 3600 rpm, and a maximum electrical capacity of 3.5 kVA (60 Hz, 220/127 V).

The load was simulated using three resistive resistors, each rated at approximately 4.3 kW. Electrical voltage, current, and power were monitored using a digital multimeter connected in parallel to the resistive loads. Engine rotation speed (rpm) was measured using a digital tachometer (model DT6236B). The fuel consumption was determined by placing a barrel of fuel on a semi-analytical balance (model BK8000) and measuring the mass variation over a recorded time interval, allowing for the calculation of the hourly fuel consumption (mass flow).

The experimental setup involved positioning the tachometer and connecting the multimeter to monitor engine rotation and electrical parameters, respectively. The fuel barrel was placed on the balance to measure mass consumption by difference.

Load simulation was performed in three stages: three successive loads of 4.3 kW were applied at 10-min intervals (after 10, 20, and 30 min of operation), representing total loads of 4.3, 8.6, and 12.9 kW, respectively. A 10-min interval was maintained between fuel exchanges.

Fuel Consumption ($\dot{m}$), Specific Fuel Consumption (SFC), and Conversion Efficiency (η) were calculated according to Equations 1, 2, and 3, respectively (Bellé et al., 2014):

$$\dot{m} = \left(\frac{\Delta m}{\Delta t}\right) \quad (1)$$

Where: $\dot{m}$: fuel consumption (g min^{-1}); ΔM: mass variation (g); Δt: time variation (min).

$$SFC = \left(\frac{60 \times \dot{m}}{P}\right) \quad (2)$$

Where: SFC: specific fuel consumption (g kW^{-1} h^{-1}); $\dot{m}$: fuel consumption (g min^{-1}); P: electrical power (kW).

$$\eta = \left(\frac{3600}{SFC \times LHV}\right) x\ 100 \quad (3)$$

Where: η: Efficiency of the set (%); SFC: specific fuel consumption (g kW^{-1} h^{-1}; LHV: lower heating value (kJ kg^{-1}).

Acidity index measurement

Biodiesel samples from a single batch were stored in amber flasks at to minimize oxidative reactions. The acidity index of the samples was determined following the standard method AOCS - Ca 5a 40.

Results and Discussion

Fuel consumption and thermal degradation

Experiment 1 compared the combustion performance of blends containing mineral diesel (92%) and biodiesels (BSO-X) derived from soybean oil subjected to varying degrees of thermal degradation (0, 1, 3, and 5 h).

As expected, pure mineral diesel (B0) consistently exhibited the lowest fuel consumption across all load conditions, significantly lower than any blend containing 8% biodiesel (Table 02).

Among the biodiesel blends, the mixture B0-BSO-0 (derived from non-thermally treated oil) showed the highest consumption, statistically distinct from the other degraded oil blends (Table 02). The B0-BSO-0 mixture, being less oxidized, maintained a chemical composition typical of standard soy biodiesel, which, due to its inherent oxygen content, requires a higher mass flow to release the same energy, thus increasing consumption (Meher et al., 2006).

While all BSO-X biodiesels originated from the same refined soybean oil, BSO-0 represented the control, showing the lowest initial oxidation state. The mixture that presented the highest consumption was B0-BSO-0, followed by B0-BSO-5, B0-BSO-3, and B0-BSO-1 (Figure 01B). The highest consumption observed for B0-BSO-0 is attributed to its typical composition of non-degraded soybean biodiesel (lower energy density and high oxygen content). The intermediate consumption observed for B0-BSO-3 and B0-BSO-5 suggests that while the initial oxidation (BSO-1) is beneficial, excessive thermal degradation can lead to increased acidity and potentially the formation of minor insoluble compounds or polymers, which may slightly impair fuel atomization and combustion efficiency compared to the optimally degraded B0-BSO-1.

The calorific value (LHV) was similar across all biodiesel blends (ranging from 42.753±0.043 to 42.882±0.132 MJ/g) and slightly lower than that of B0 (43.000 MJ/g) (Table 02). Given the high proportion of mineral diesel (92%) in the mixtures, the thermal degradation of the oil source did not cause a major variation in the LHV of the final blend.

Acidity index and engine performance

The acidity index increased consistently with the thermal degradation time of the source oil. B0-BSO-5 presented the highest acidity index (0.64±0.02 mg KOH/g), and the values decreased in the order B0-BSO-5 > B0-BSO-3 > B0-BSO-1 > B0-BSO-0 (0.38±0.09 mg KOH/g) (Table 02). This relationship confirms that increased thermal exposure and oxidation of the raw material translates into a higher acidity index in the resulting blend (Menegazzo et al., 2015).

It should be noted that the acidity indices reported in Table 02 are the measured values for the final blends. However, given the high concentration of mineral diesel (92%) and its low index (0.30 mg KOH/g), the resulting blend value is highly sensitive to the acidity contribution from the 8% biodiesel component, which reflects the degree of thermal degradation of its source oil.

It should be noted that the acidity indices reported in Table 02 are the measured values for the final blends. However, given the high concentration of mineral diesel (92%) and its low index (0.30 mg KOH/g), the resulting blend value is highly sensitive to the acidity contribution from the biodiesel component, which clearly reflects the degree of thermal degradation of its source oil. Given the blend ratio of diesel to biodiesel, the absolute acidity values remain low due to the strong diluting effect of the mineral diesel (0.30 mg KOH/g). However, the systematic increase in the blend's acidity from B0-BSO-0 (0.38 mg KOH/g) to B0-BSO-5 (0.64 mg KOH/g) proves that the pure biodiesel must possess an extremely high acidity (estimated at via weighted average calculation) as a direct result of the severe thermal degradation of its source oil. Thus, even with high dilution, the increase in the blend's successfully serves as an indicator of the degradation level of the raw material.

The most significant finding is a paradox in the engine performance. It was anticipated that B0-BSO-0 (lowest acidity) would exhibit the best performance. However, it showed the highest consumption among the blends. Conversely, B0-BSO-1 (from the 1h-degraded oil) registered the lowest consumption and the highest efficiency among the blends at maximum load (Table 03, Figure 02B). This unexpected result strongly suggests that minimal thermal degradation, as simulated by the one-hour heating condition, resulted in an optimal chemical composition, leading to a more reactive and efficient fuel mixture that provides higher energy output with lower fuel consumption.

Table 02. Engine and fuel characteristics of mineral diesel and thermally degraded biodiesel blends (Experiment 1)

Fuel	Loads (g/min)				Calorific Value	Acidity Index
	0	1	2	3	(MJ/g)	(mg KOH/g)
B0	6.765±0.227^{A}	7.808±0.266^{A}	8.687±0.322^{A}	9.755±0.343^{A}	43.000*	0.30**
B0-BSO-0	7.520 ±0.256^{B}	8.434±0.292^{B}	9.850±0.307^{B}	11.434±0.357^{B}	42.764±0.010^{A}	0.38 ± 0.09^{D}
B0-BSO-1	7.100 ± 0.234^{AB}	7.900± 0.262^{AB}	9.017±0.289 ^{AB}	10.400±0.340^{B}	42.882±0.132^{A}	0.55± 0.02^{CD}
B0-BSO-3	7.200±0.231^{AB}	8.100±0.260^{AB}	9.467±0.305^{B}	10.750±0.358^{B}	42.753±0.043^{A}	0.63± 0.06^{BC}
B0-BSO-5	7.360 ±0.242^{B}	8.175±0.267^{AB}	9.567±0.309^{B}	10.967±0.35 ^{B}	42.868±0.087^{A}	0.64 ± 0.02^{BC}

B0 Mineral diesel oil (100%); B0-BSO-0: Mixture of 92% BO and 8% BSO-0; B0-BSO-1: Mixture of 92% BO and 8% BSO-1; B0-BSO-3: Mixture of 92%; BO and 8% BSO-3; B0-BSO-5: Mixture of 92% BO and 8% BSO-0. *ANP data. **Petrobras data (PETROBRAS, 2018).

Table 03. Comparison of engine performance parameters for diesel and B0-BSO-1 blend after three loads

Parameters	Hourly Consumption (g min^{-1})	SFC (g kW^{-1}h^{-1})	Efficiency (%)
Diesel	9.75±0.32^{B}	414.83±12.90^{A}	20.18±0.08^{B}
B0-BSO-1	10.30±0.18^{A}	434.79±16.68^{AB}	19.31±0.06^{A}

SFC: specific fuel consumption

This beneficial effect on fuel reactivity is likely due to the controlled formation of specific oxygenated species, such as hydroperoxides or shorter-chain fatty acid esters, which act as combustion promoters. These compounds can facilitate ignition (lowering the ignition delay) and lead to a more complete combustion cycle in the engine chamber, thereby maximizing energy yield and reducing the required mass flow (consumption).

Specific fuel consumption (SFC) and efficiency

The specific fuel consumption (SFC) of the engine as a function of the applied load demonstrated that the SFC is higher when the loads are relatively low (4.3 kW), as shown in Figure 02A. Using mineral diesel, the SFC of the engine-generator set was slightly lower compared to all biodiesel blends. The difference in viscosity between diesel and biodiesel is also an important factor in SFC, causing poor atomization and incomplete combustion of the fuel at low and medium speeds (Castellanelli et al., 2008).

Among the mixtures studied, B0-BSO-1 obtained the lowest SFC (Figure 02A). This mixture most closely approximated the performance characteristics of pure mineral diesel (B0) after three loads, with percentage differences of approximately 5.64% in fuel consumption (10.30 g min^{-1} vs. 9.75 g min^{-1}), 4.81% in Specific Fuel Consumption (434.79 g kW^{-1} h^{-1} vs. 414.83 g kW^{-1} h^{-1}), and a 4.31% decrease in efficiency (19.31% vs. 20.18%) (Table 03). This value of SFC for B0-BSO-1 (434.79±16.68 g/kWh) is close to that reported in the literature for pure soybean biodiesel under similar conditions (Puhan et al., 2005).

This behavior directly impacted on the efficiency performances (Figure 02B). The maximum efficiency for the set was obtained using the mineral diesel fuel (B0) (20.18%) operating at 12.9 kW. Among all blends, the B0-BSO-1 fuel achieved the highest efficiency at the maximum load (19.31%), confirming its superior performance compared to the other thermally degraded blends.

Combustion of blends with biodiesels from recycled oils

Experiment 2 evaluated the combustion of blends of mineral diesel and biodiesel from recycled oils (BRO) at increasing concentrations (B5 to B75).

The fuel consumption (Figures 03A-D) showed that, as expected, consumption increased with the successive addition of loads in practically all tested fuel mixtures. This increase is a natural consequence of adding a load, which demands greater energy output and consequently higher fuel consumption to maintain the power.

The increase in consumption was most significant at higher biodiesel concentrations due to the lower calorific value of biodiesel compared to pure diesel. The two most pronounced increases occurred for the blend B50 (5.04% increase) and the pure biodiesel, B100 (11.45% increase, assuming B100 refers to 100% BRO). To release the same amount of energy as diesel, biodiesel requires a greater mass flow, increasing the specific consumption of the fuel. Similar results were reported for various soybean biodiesel blends (Castellanelli et al., 2008).

It is noteworthy that the B75 mixture did not follow this extreme consumption surge trend. This suggests that the remaining 25% of mineral diesel in the B75 blend may be sufficient to keep the fuel properties (e.g., viscosity or atomization quality) above a critical operational threshold, thereby preventing the severe consumption proportional increase observed in the B50 and B100 fuels.

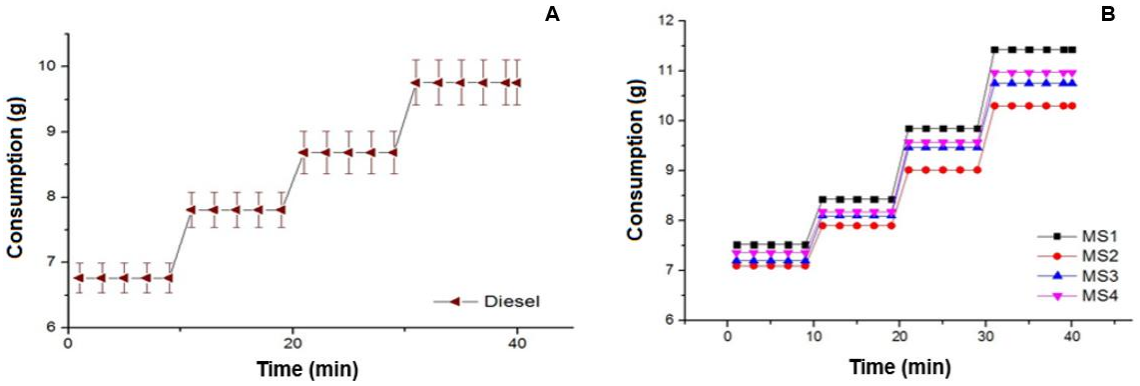


Figure 01. Diesel fuel consumption (A) and comparative consumption of mixtures (B).

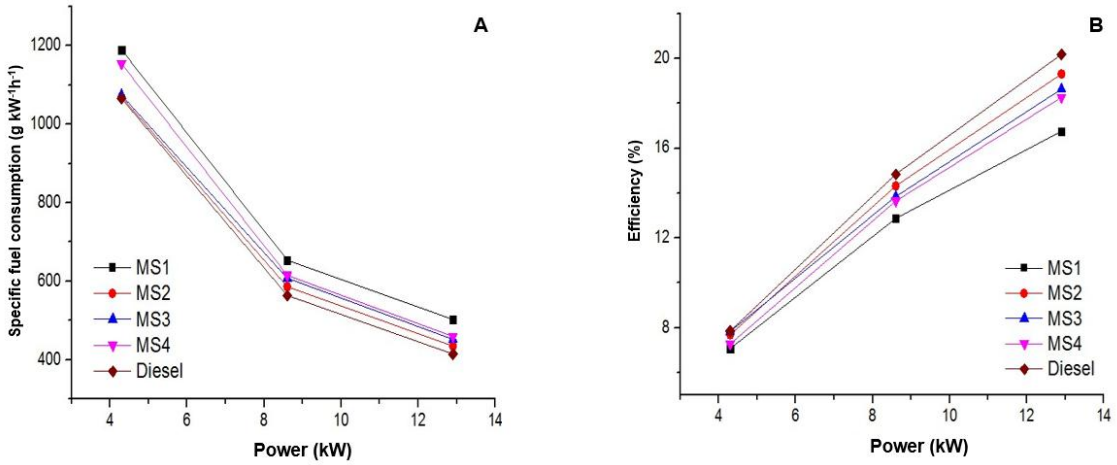


Figure 02. Specific fuel consumption (A) and mixture efficiency (B).

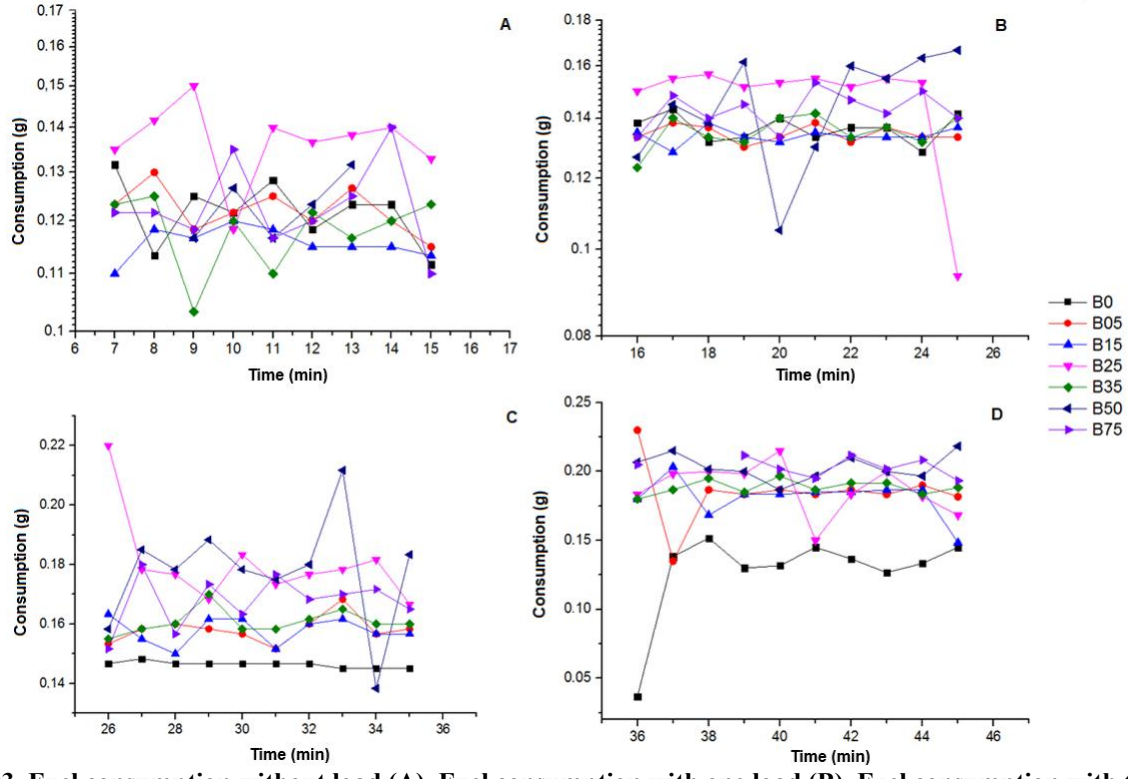


Figure 03. Fuel consumption without load (A), Fuel consumption with one load (B), Fuel consumption with two loads (C) and Fuel consumption with three loads (D).

Final Considerations

Pure diesel (B0) presented the lowest consumption relative to all tested biodiesel mixtures.

For the blends derived from thermally degraded oils (Experiment 1), the fuel consumption did not present significant variation among the mixtures, except for B0-BSO-0, which presented the highest consumption. The calorific value of these mixtures was similar, but the acidity index increased with the thermal degradation time of the raw material, presenting a strong correlation with the degree of oil oxidation.

The unexpected result (higher fuel consumption and lower efficiency despite the lower acidity) obtained with B0-BSO-0 fuel compared to the other fuel mixtures suggests that minimal thermal degradation, as simulated by the one-hour heating condition achieved with B0-BSO-1, resulted in an optimal chemical composition. This leads to a more reactive and efficient fuel mixture (higher energy production with a lower fuel consumption).

For the mixtures of diesel and biodiesel obtained from recycled oil (B5, B15, B25, B35, B50, and B75), the fuel consumption was increased with the successive additions of loads. The two most significant increases in consumption occurred in the mixture B50 and the pure biodiesel B100, primarily due to the lower calorific value of the biodiesel when compared to pure diesel.

References

AGENCY, I. E. *World Energy Outlook 2018*. Paris: [s.n.], 2018.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). Disponível em: http://www.anp.gov.br/biocombustíveis

ASOKAPANDIAN, S.; SWAMY, G. J.; HAJJUL, H. Deep fat frying of foods: a critical review on process and product parameters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 60, n. 20, p. 3400–3413, 2020.

BELLÉ, M. P.; ALONÇO, A. S.; FRANCETTO, T. R.; ROSSATO, F. P.; FRANCK, C. J.; CARPES, D. P. Demanda energética e mobilização do solo com o uso de escarificadores em sistemas de semeadura direta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 5, p. 551–558, 2014.

BORUGADDA, V. B.; GOUD, V. V. Biodiesel production from renewable feedstocks: status and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 4763–4784, 2012.

CASTELLANELLI, M.; SOUZA, S. N. M.; SILVA, S. L.; KAILER, E. K. Desempenho de motor ciclo Diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. *Engenharia Agrícola*, v. 28, p. 145–153, 2008.

GEBREMARIAM, S.; MARCHETTI, J. Economics of biodiesel production: review. *Energy Conversion and Management*, v. 168, p. 74–84, 2018.

LANDMANN, M. C. *Estimativa das emissões de poluentes dos automóveis na RMSP considerando as rotas de tráfego*. 2019. Programa de Ciência Ambiental (PROCAM), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

LIMA, J. R. O.; SILVA, R. B.; SILVA, C. C. M.; SANTOS, L. S. S.; SANTOS JUNIOR, J. Biodiesel of tucum oil synthesized by methanolic and ethanolic routes. *Fuel*, v. 87, p. 1718–1723, 2008.

MEHER, L. C.; VIDYA SAGAR, D.; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 10, p. 248–268, 2006.

MENEGAZZO, M. L.; LUCAS, B. F.; ALCALDE, L. B.; PETENUCI, M. E.; FONSECA, G. G. Production of biodiesel via methyl and ethyl routes from Nile tilapia and hybrid Sorubim crude oils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 3, p. 150-154, 2015.

PETROBRAS. *Óleo diesel: informações técnicas*. Gerência de Desenvolvimento de Produtos, v. 1.3, p. 20, 2018.

PUHAN, S. N.; VEDARAMAN, B.; RAMA, G.; SANKARNARAYANAN, K.; JEYCHANDRAN, K. Mahua oil (*Madhuca indica* seed oil) methyl ester as biodiesel: preparation and emission characteristics. *Biomass and Bioenergy*, v. 28, p. 87–93, 2005.

INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS NO PROCESSAMENTO DE AÇAÍ: ENERGIA FOTOVOLTAICA E CAPTAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL

1 Maria Nayara Holanda de Oliveira, 2 Isabella Gurgel Pinheiro, 3 Fabrício Henrique Romão Martins, 4 Ricardo da Silva Pereira, 5 Otávio André Chase

1 Universidade Federal Rural da Amazônia, e-mail: hollanda.oliveira.maria@gmail.com; 2 Universidade Federal Rural da Amazônia, e-mail: Isabellagurgelp@gmail.com; 3 Universidade Federal Rural da Amazônia, e-mail: fabmartins456@gmail.com ; 4 Universidade Federal Rural da Amazônia, e-mail: rspereiraufpa.mec@gmail.com; 5 Universidade Federal Rural da Amazônia, e-mail: otavio.chase@hotmail.com

Palavras-chave: Açaí; Sistemas on-grid; produção sustentável.

Resumo

A produção do açaí apresenta alta demanda por recursos hídricos e energéticos, tornando-se essencial a adoção de práticas sustentáveis no seu processamento. Além disso, o Brasil possui grande potencial para uso de energia solar e disponibilidade de água pluvial, o que favorece a adoção de soluções sustentáveis. Nesse contexto, é necessário aprimorar a gestão de uso desses recursos, a partir do uso de tecnologias ambientalmente sustentáveis dentro da cadeia produtiva do açaí. Logo, o objetivo do trabalho foi elaborar um projeto ecologicamente sustentável para um empreendimento de açaí, em Belém do Pará, visando a gestão dos recursos hídricos e o aproveitamento energético na região. Para isso, foi desenvolvido um sistema fotovoltaico, utilizando dados de irradiação solar, consumo energético do estabelecimento e dimensionamento de painéis, inversor e viabilidade econômica do sistema (payback), o planejamento de um sistema de captação de água pluvial a partir de dados pluviométricos, normas técnicas e dimensionamento do reservatório pelo software Netuno 4.0, além de soluções tecnológicas para o aproveitamento de resíduos do processamento do açaí. Os resultados permitiram a projeção de um sistema fotovoltaico capaz de produzir 6,6 kWp, composto por 12 módulos voltaicos de 550 W e um inversor de 8kW, capaz de suprir a demanda energética do estabelecimento e com um retorno de investimento de cerca de 4 anos; para o reservatório de água, foi projetado um reservatório de 350 L, capaz de garantir uma economia de 60,82% de água de uso não potável e, para o reaproveitamento dos resíduos, afirma-se o alto potencial da utilização desse resíduo como combustṕivel, carvão ativado e biomassa na recuperação de áreas degradadas. Portanto, a integração de tecnologias sustentáveis mostraram viabilidade técnica e ambiental, eficientes na redução de impactos ambientais relacionados ao consumo de recursos e viabilidade econômica para o empreendimento de açaí na região amazônica.

Introdução

O açaí (*Euterpe oleracea*) é um fruto de origem amazônica de grande popularidade no mercado nacional e internacional devido às suas características alimentares e funcionais, como propriedades antiinflamatórias e antioxidantes. A produção do açaí foi de cerca de 1.696.485 mil toneladas no Brasil, sendo a região norte responsável por 99,5% da produção total. (IBGE, 2023; Lutosa, 2022).

O processo de beneficiamento do açaí demanda grande volume de água e de energia para a lavagem da fruta, extração da polpa, mistura e homogeneização, branqueamento, conservação e higienização dos equipamentos e do ambiente. Nesse contexto, é importante promover a gestão do recurso hídrico e energético para o funcionamento comercial desses estabelecimentos.

O Brasil possui grande potencial para geração de energia solar, pois recebe grandes índices de irradiação. Atualmente, as energias renováveis representam cerca de 88% da oferta de eletricidade, com destaque para a hidráulica. Apesar da energia solar representar apenas 4,4% na matriz energética, esta vem crescendo devido ao seu grande potencial de geração e por ser tratar de uma forma de energia limpa (BEN, 2023).

Portanto, esse trabalho tem como objetivo elaborar um projeto ecologicamente sustentável para garantir a gestão dos recursos utilizados na cadeia produtiva do açaí, por meio de uma perspectiva ambiental, apresentando soluções responsáveis para o uso de energia, recursos hídricos e destinação de resíduos.

Material e Métodos

O projeto foi planejado para um estabelecimento de processamento e venda de açaí no município de Belém, no Estado do Pará, sob coordenada geográfica 1,401° S e 48,449° O . O local possui uma área aproximada de 62,5 m^2, para a qual serão dimensionados o sistema de energia fotovoltaica ligada à rede e o sistema de captação e armazenamento de água. Para isso, foram realizadas pesquisas teóricas, utilizando dados de irradiação solar e de precipitação para a cidade.

Para o dimensionamento fotovoltaico *On-Grid* (ligado à rede), os fatores analisados foram: avaliação do recurso solar local, estimativa média de consumo de energia, cálculo quantitativo de painéis, cálculo do inversor e avaliação do *Payback*. As propriedades de um painel solar são distintas e dependem diretamente da irradiação incidente e da temperatura. Para a avaliação do recurso solar disponível na região de instalação, foram consultados os dados da base “Sundata” do Centro de Referência para Energia Solar Eólica Sérgio Brito (CRESESB), por meio da inserção das coordenadas da área de estudo. Sendo assim, utilizou-se o valor de menor irradiação solar diária média disponível, ou seja, Horas de Sol Pleno (HSP), que significa o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer igual a 1kW/m^2.

O sistema deve gerar uma quantidade de energia superior ao consumo e algumas empresas recomendam adicionar 20% a esse valor para projetar o sistema. Para determinar esse valor, é consultada a fatura do consumidor, de janeiro a dezembro, e é realizada a média desses valores, ou seja, o consumo médio mensal. Outro método de determinação é fazer o levantamento dos equipamentos utilizados no estabelecimento, com seus respectivos valores de potência e tempo de uso e, assim, obter a média mensal consumida em kWh/mês. A partir disso, dimensiona-se a potência de geração do sistema pela relação entre consumo diário médio, taxa de desempenho do sistema e Horas de Sol Pleno. Assim, o cálculo de energia gerado diariamente pelo sistema é delimitado pela multiplicação da potência de geração e das Horas de Sol Pleno (PINHO, GALDINO 2014).

Para calcular a quantidade de painéis solares necessários para esse sistema, fatores como energia gerada diariamente, radiação solar média no local, eficiência dos painéis, tensão de operação dos componentes (carga e inversor) de potência total são imprescindíveis. Sendo assim, para obter o número de módulos necessários, é realizada a divisão da potência total do gerador fotovoltaico pela potência do módulo, encontrada no *datasheet* do fabricante. Já para o cálculo de dimensionamento do inversor, leva-se em consideração a potência nominal do gerador fotovoltaico e a capacidade do inversor, sendo que a potência do inversor deve ser igual ou maior à potência máxima de caga do painel (PINHO, GALDINO 2014; LINS, 2018).

O cálculo de *payback* visa avaliar em quanto tempo o investimento do sistema fotovoltaico será financeiramente recuperado, portanto, o principal benefício do sistema é a economia gerada nos custos de energia. Além do investimento realizado e dos benefícios gerados, os cálculos também levam em consideração a taxa de depreciação dos módulos instalados de acordo com os anos de utilização e a inflação energética.

Para dimensionar o reservatório de coleta de água da chuva é necessário seguir regulamentações e diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especificamente a NBR 15527/2019, a qual define os critérios para sistemas de aproveitamento de água pluvial em áreas urbanas para finalidades não potáveis, como limpeza de superfícies, descarga de vasos sanitários, entre outros. A norma define critérios de materiais e especificações dos componentes do sistema, como calhas, condutores, filtros, reservatórios e bombas, a fim de garantir a eficiência do sistema. O funcionamento do sistema está ligado diretamente aos índices de precipitação pluviométrica. Os registros de precipitação da área foram consultados no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), especificamente pelos registros da estação 82191 (Estação Pluviométrica da Ceasa), localizada nas coordenadas geográficas 1º 24’40,4’’ S e 48º 26’ 22,2’’W, em Belém, no período de 2013 a 2023.

Inicialmente, foi determinada a demanda do estabelecimento de mensal de água não potável. Com base na metodologia adotada por Fasola et al. (2011), o cálculo da média de consumo está associado ao número de baldes utilizados e seu respectivo volume.

Para o cálculo da área de contribuição, foi realizada a análise da estrutura de cobertura do edifício, a exemplo da Figura 01, segundo a Equação 1, onde: “A” representa a área de contribuição da superfície inclinada; “a” o comprimento; “b” largura e “h” a altura.

$$A = (a + h/2).b \quad (1)$$

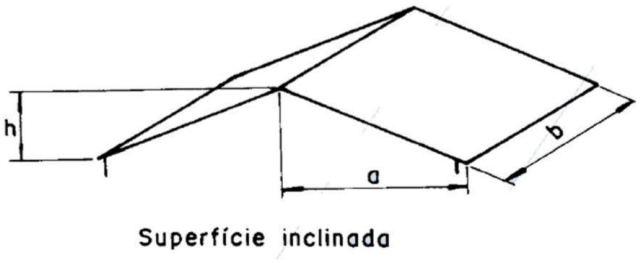


Figura 01: Representação da área de contribuição de captação de água
Fonte: NBR 10844 (1989).

Como o aproveitamento de água pluvial sofre perdas por evaporação ou outras formas, utiliza-se o coeficiente de Runoff, de escoamento superficial, de acordo com a metodologia proposta por Tomaz (2011).

O dimensionamento do reservatório foi realizado pelo Software Netuno 4.0, desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), devido a sua capacidade de simplificar a simulação do sistema de captação de águas pluviais por meio de análises econômicas, permitindo estimar os custos de implementação do sistema. Para isso, são necessárias as seguintes informações: precipitação pluviométrica diária, área de captação, coeficiente de aproveitamento, demanda diária per capita, número de usuários e porcentagem de água que pode ser substituída pela pluvial e foi utilizada a simulação do tipo reservatórios com múltiplos volumes. O dimensionamento do sistema de aproveitamento de águas pluviais foi realizado conforme as diretrizes da NBR 12217/1994 e NBR 10844/89.

A intensidade pluviométrica foi determinada pela equação proposta por Souza et al. (2012), considerando período de retorno de 5 anos e duração da chuva de 5 minutos, com parâmetros regionais específicos. Já a vazão de projeto foi calculada a partir da intensidade pluviométrica e da área de contribuição, conforme a NBR 10844/89.

O dimensionamento das calhas foi realizado utilizando a equação de Manning-Strickler, adotando coeficiente de rugosidade conforme o material. As dimensões foram definidas com base em tabelas normativas para diferentes declividades. Para a projeção dos condutores verticais foram considerados a vazão de projeto, a altura da lâmina d’água e o comprimento do

condutor, conforme recomendações da NBR 10844/89. Os condutores horizontais foram projetados com declividade mínima de 0,5%, sendo suas dimensões definidas com base em tabelas normativas que relacionam diâmetro, declividade e vazão admissível.

Por fim, para a destinação dos resíduos de açaí, foi realizado o levantamento das tecnologias existentes na literatura. Com isso, foram identificadas quais propostas seriam viáveis para o empreendimento.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a viabilidade técnica, econômica e ambiental da aplicação integrada de tecnologias sustentáveis em um empreendimento de pequeno porte voltado ao processamento de açaí. A análise contemplou três eixos principais: geração de energia por meio de sistema fotovoltaico, aproveitamento de água pluvial e destinação adequada dos resíduos sólidos gerados, especificamente os caroços de açaí. A discussão dos resultados é apresentada de forma integrada, buscando correlacionar os achados com a literatura e com a realidade regional amazônica.

No que se refere ao dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR), foram empregados dois métodos distintos para estimativa do consumo energético: o método baseado nas faturas de energia elétrica e o método empírico, fundamentado no levantamento detalhado dos equipamentos utilizados no estabelecimento. O primeiro método apresentou um consumo médio mensal de 570,00 kWh, que, após a aplicação de uma margem de segurança de 20%, resultou em 684,00 kWh/mês. Já o segundo método indicou um consumo de 623,63 kWh/mês que, com o mesmo acréscimo percentual, atingiu 748,35 kWh/mês.

A diferença observada entre os métodos está associada ao nível de detalhamento adotado em cada abordagem. O método baseado em faturas tende a representar melhor o consumo real histórico, incluindo perdas e variações operacionais, enquanto o levantamento empírico pode superestimar o consumo ao considerar o funcionamento simultâneo de todos os equipamentos em condições ideais. Essa divergência é amplamente discutida na literatura, sendo recomendada a utilização combinada dos métodos para maior confiabilidade nos resultados.

Apesar das diferenças, ambos os métodos convergiram para uma solução técnica semelhante, indicando a necessidade de um sistema com potência instalada de aproximadamente 6,6 kWp, composto por 12 módulos fotovoltaicos de 550 W e um inversor de 8 kW. Esse resultado demonstra consistência no dimensionamento e reforça a robustez da solução proposta. A escolha pelo método baseado no consumo da fatura para as análises subsequentes mostrou-se adequada, uma vez que o sistema é conectado à rede e depende diretamente do histórico de consumo da unidade consumidora.

Do ponto de vista energético, o sistema dimensionado apresenta capacidade de geração anual de aproximadamente 10.391,55 kWh, valor suficiente para suprir integralmente a demanda do estabelecimento. Esse resultado está alinhado com estudos que indicam o elevado potencial de geração de energia solar na região Norte do Brasil, caracterizada por altos índices de irradiação solar ao longo do ano.

A análise econômica do sistema fotovoltaico revelou um investimento inicial de R$20.859,62, incluindo custos com equipamentos e mão de obra, está estimada em 30% do valor dos componentes, conforme indicado por c). A avaliação do tempo de retorno do investimento (*payback*) considerou variáveis relevantes, como a tarifa de energia elétrica da classe comercial, a taxa de depreciação dos módulos fotovoltaicos (1% ao ano, conforme Batista, 2020) e a inflação energética, composta pelo IPCA e pelo reajuste tarifário anual (ANEEL, 2023; IBGE, 2022).

Os resultados indicaram que o retorno do investimento ocorre no 4º ano de operação do sistema, o que pode ser considerado um prazo relativamente curto, especialmente quando comparado à vida útil dos módulos, estimada em 25 anos. Ao longo de 20 anos, o sistema pode gerar uma economia acumulada superior a R$582.000,00, evidenciando elevada viabilidade econômica. A Figura 02 apresenta o comportamento do fluxo de caixa ao longo do período analisado, evidenciando o ponto de retorno do investimento e o crescimento progressivo da economia gerada, o que reforça o papel da energia solar como alternativa estratégica para redução de custos operacionais em pequenos empreendimentos, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental.



Figura 02: Fluxo de caixa acumulado do sistema ao longo de 20 anos.
Fonte: OLIVEIRA *et al* (2026)

No que diz respeito ao aproveitamento de água pluvial, os dados de precipitação da região de Belém demonstraram um elevado potencial hídrico, com média mensal de 305,99 mm e picos superiores a 580 mm no período chuvoso. Esse regime pluviométrico favorece significativamente a adoção de sistemas de captação e armazenamento de água da chuva, especialmente em atividades que não exijam potabilidade.

A demanda de água não potável do estabelecimento foi estimada em 2.100 litros por mês, sendo destinada principalmente à limpeza das instalações, vidros e calçadas. Essa demanda está diretamente relacionada às exigências sanitárias estabelecidas pela RDC nº 216/2004, que preconiza a higienização rigorosa de ambientes destinados à manipulação de alimentos.

O dimensionamento do reservatório, realizado com auxílio do software Netuno, indicou um volume ideal de 350 litros, capaz de proporcionar uma economia média de 60,82% no consumo de água potável. Esse resultado demonstra a eficiência do sistema proposto, especialmente considerando o baixo custo de implantação. A Figura 03 apresenta a relação entre o volume do reservatório e o potencial de economia de água, evidenciando o ponto de otimização adotado no projeto, no qual se observa o melhor equilíbrio entre capacidade de armazenamento e eficiência do sistema.

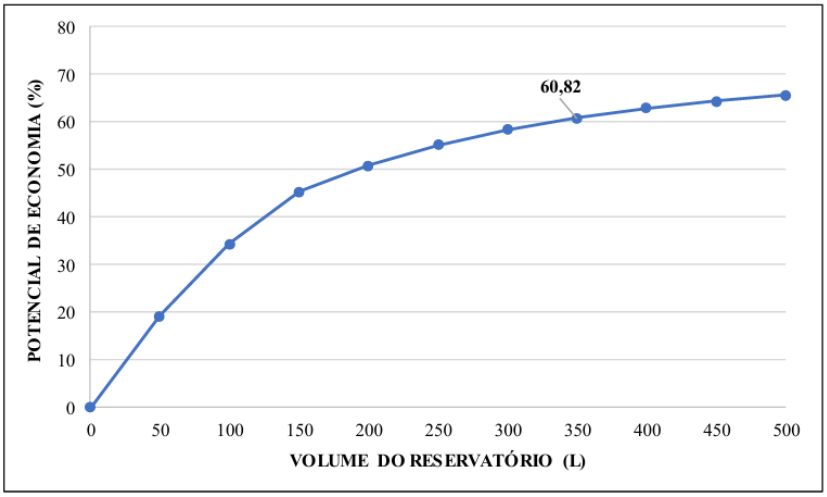


Figura 03: Potencial de economia da água em função do volume do reservatório
Fonte: OLIVEIRA et al (2026)

Além disso, o sistema apresentou capacidade de atendimento completo em aproximadamente 48,92% do tempo, com atendimento parcial em 22,63% dos dias e ausência de atendimento em cerca de 28,45%, o que está diretamente relacionado à variabilidade das chuvas.

A análise do consumo diário indicou que o sistema é capaz de fornecer até 85,15 L/dia, valor superior à demanda estimada de 70 L/dia, evidenciando uma margem de segurança operacional. Esse resultado é coerente com estudos de Nunes (2011), Silva (2018) e Lacerda Filho (2020), que destacam a importância de dimensionar reservatórios com base em critérios que considerem tanto a demanda quanto a disponibilidade hídrica local.

O sistema hidráulico projetado, incluindo calhas e condutores, foi dimensionado com base em parâmetros técnicos consolidados, como a intensidade pluviométrica e a vazão de projeto. A utilização da equação de Manning-Strickler e das diretrizes da NBR 10844/1989 garantiu a adequação dos componentes, evitando problemas como transbordamento e subdimensionamento. O custo total estimado para implantação do sistema foi de R$ 864,19, incluindo mão de obra, o que reforça sua viabilidade econômica.

No que se refere à destinação dos resíduos de caroço de açaí, os resultados evidenciam um amplo potencial de reaproveitamento, alinhado com princípios de economia circular e sustentabilidade. A produção de briquetes energéticos destaca-se como uma alternativa viável, conforme descrito por Quirino e Brito (1991), permitindo a transformação de resíduos em fonte de energia renovável. Estudos de Prado (2001) reforçam que resíduos lignocelulósicos possuem elevado potencial energético, especialmente quando submetidos a processos de densificação.

A composição química do caroço de açaí, rica em celulose e lignina e com baixo teor de cinzas, favorece sua utilização como biomassa energética, conforme apontado por Reis et al. (2002) e Bufalino et al. (2018). Além disso, seu uso como combustível em olarias, substituindo a lenha, apresenta vantagens ambientais significativas, reduzindo o desmatamento e as emissões de gases poluentes.

Outra aplicação relevante é a produção de carvão ativado, com potencial uso em sistemas de filtragem de água, conforme demonstrado por Rocha (2020). Os resultados indicam elevada eficiência na remoção de turbidez e melhoria da qualidade da água, o que amplia as possibilidades de uso desse resíduo em diferentes setores.

O uso do caroço de açaí como substrato agrícola também se mostra promissor, contribuindo para o desenvolvimento de mudas e recuperação de áreas degradadas, conforme indicado por Erlacher et al. (2016) e Alves (2022). Além disso, sua aplicação em processos de fermentação para produção de enzimas industriais reforça seu valor agregado, conforme estudos de Rodrigues et al. (2017) e Cordeiro et al. (2020).

De forma geral, os resultados deste estudo demonstram que a integração de soluções sustentáveis como energia solar, aproveitamento de água pluvial e valorização de resíduos, é capaz de promover ganhos significativos em termos econômicos, ambientais e operacionais. Essa abordagem integrada se mostra especialmente relevante para a realidade amazônica, onde há abundância de recursos naturais, mas também desafios relacionados à gestão sustentável.

Portanto, a adoção dessas tecnologias em pequenos empreendimentos não apenas contribui para a redução de impactos ambientais, mas também fortalece a economia local, promovendo inovação e eficiência no uso de recursos. Esses resultados reforçam a importância de políticas públicas e incentivos que estimulem a implementação de práticas sustentáveis no setor produtivo regional.

Comentários finais

Os resultados deste estudo demonstraram que a aplicação integrada de tecnologias sustentáveis em um empreendimento de pequeno porte voltado ao processamento de açaí é tecnicamente viável, economicamente atrativa e ambientalmente relevante. A adoção conjunta de um sistema fotovoltaico conectado à rede, de um sistema de aproveitamento de água pluvial e de alternativas para a destinação dos resíduos sólidos permitiu avaliar, de forma abrangente, soluções que contribuem para a eficiência no uso de recursos naturais.

No que se refere à geração de energia, o sistema fotovoltaico dimensionado mostrou-se capaz de atender integralmente à demanda energética do estabelecimento, com retorno do investimento estimado no quarto ano de operação. Esse resultado evidencia o potencial da energia solar como ferramenta estratégica para redução de custos operacionais e aumento da autonomia energética, especialmente em regiões com elevada disponibilidade de radiação solar, como a região Norte do Brasil.

Em relação ao aproveitamento de água pluvial, os resultados indicaram que o sistema proposto apresenta desempenho satisfatório, sendo capaz de reduzir significativamente o consumo de água potável, com economia média superior a 60%. O dimensionamento adequado do reservatório e dos componentes hidráulicos garantiu eficiência operacional, demonstrando que soluções de baixo custo podem gerar benefícios expressivos quando aplicadas de forma planejada.

No tocante à destinação dos caroços de açaí, verificou-se que o resíduo apresenta elevado potencial de reaproveitamento em diferentes aplicações, como produção de briquetes energéticos, uso como biomassa, fabricação de carvão ativado e utilização como substrato agrícola. Essas alternativas contribuem para a redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado e promovem a valorização de resíduos, alinhando-se aos princípios da economia circular.

De forma integrada, as soluções analisadas evidenciam que é possível promover a sustentabilidade em pequenos empreendimentos por meio da combinação de tecnologias acessíveis e adaptadas à realidade local. Além dos ganhos ambientais, destacam-se os benefícios econômicos e operacionais, que podem incentivar a adoção dessas práticas por outros estabelecimentos da região.

Por fim, ressalta-se a importância de políticas públicas, incentivos governamentais e ações de disseminação tecnológica que estimulem a implementação dessas soluções sustentáveis, contribuindo para o desenvolvimento regional e para a conservação dos recursos naturais na Amazônia.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao Laboratório de Ensaios de Energias Renováveis da Universidade Federal Rural da Amazônia pelo suporte técnico e estrutura disponibilizada para a realização deste trabalho. Agradecemos, de forma especial, ao professor Ricardo Pereira, pela orientação, incentivo e contribuições fundamentais ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Por fim, agradecemos a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, tornando possível sua execução e conclusão.

Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10844: instalações prediais de água pluvial**. Rio de Janeiro, 1989.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Bandeiras Tarifárias**, 2023. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/faq-tire-suasduvidas-a-sobre-bandeira-escassezhidrica/656877?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de-imprensaexibicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_XGPXSqdMFHrE%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn2%26p_p_col_count%3D3.

ALVES, Aline Chaves. Caroço de acaí como substrato e rizobactérias no desenvolvimento de mudas de Paricá (Schizolobium parahyba var. **Amazonicum** (Huber ex Ducke) Barneby). 2022.

BUFALINO, L. et al. Local variability of yield and physical properties of açaí waste and improvement of its energetic attributes by separation of lignocellulosic fibers and seeds. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – Séries Históricas**. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-aoconsumidor-amplo.html?=&t=series-historicas.

BEN 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2023>.
CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. **Potencial Solar**. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php#localidade_63959.

CORDEIRO, N. K.; CARDOSO, K. P. S.; MATA, T. C.; BARBOSA, J. A.; GONÇALVES JR, A. C. Gestão de resíduos agrícolas como forma de redução dos impactos ambientais.**REVISTA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS-RCA** (ISSN 1981-8858), http://dx.doi.org/10.18316/rca.v14i.5593, Canoas, v. 14, n. 2, 2020.

ERLACHER, W. A OLIVEIRA, F. L. DE; SILVA, D. M. N. DA; QUARESMA, M. A. L. MENDES, T. P. **Estratégias de uso de caroço de açaí para formulação de substratos na produção de mudas de hortaliças Magistra**, Cruz das Almas – BA, V. 28, N.1, p.119-130, Jan./Mar.2016.

FASOLA, G. B. et al. **Potencial de economia de água em duas escolas em Florianópolis, SC. Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 65-78, 2011.

GONÇALVES, F. A. V. S. **Avaliação técnica e econômica da implantação de sistemas fotovoltaicos no Aeroporto Internacional de Belém**. Dissertação de mestrado (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém (PA), 118 p. 2013.Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/6728.

IBGE -**Produção Agropecuária**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/acai-cultivo/br>.

LACERDA FILHO, P.S.G.L. **Avaliação de cisternas na Região Paraibana da Bacia do Piancó Piranhas-Açu**. Trabalho de Conclusão de Curso (obtenção de título em engenheiro civil). UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. João Pessoa/PE. 70p. 2020.

LINS, L. R. P.. **Dimensionamento de sistema fotovoltaico off grid para escritório móvel**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

LUSTOSA, T. N. M. et al. Açai seed as an additive in Panicum maximum cv. Mombasa ensiling for ruminant nutrition: An alternative to reduce environmental pollutants. **Cleaner Waste Systems**, v. 3, p. 100035, dez. 2022.

NUNES, M. B. **Planejamento e construção de cisternas para captação e armazenamento de água da chuva Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro** - REDETEC. Rio de Janeiro/RJ. 28p. 2011.

PINHO, J. T.; GALDINO, M.A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014.

PRADO, G., **Em busca da energia ecológica**. Correio Braziliense Economia/Relacionamento. 05/08/2001.

QUIRINO, W. F.;BRITO, J. O.**Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**.Brasília,DF: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1991.16 p.(IBAMA-LPF. Série técnica, n. 13).
REIS, Bruno de Oliveira et al. **Produção de briquetes energéticos a partir de caroços de açaí**. Procedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

ROCHA, Luciane Marçal Oliveira. **Eficiência do carvão ativado do caroço do açaí (Euterpe oleracea) como mídia filtrante em Sistema de Recirculação para Aquicultura (SRA).** 2020.

RODRIGUES, J. C. W.; SILVA, J. A. F.; TOSCANO, J. D.; NOGUEIRA, A. C. F.; BORDINHON, A. M. Tese de Doutorado. UFRA/Campus Belém. **Formação de Composto no PA São Francisco - Canutama a Partir de Resíduos Agrícolas Oriundos na Comunidade. Cadernos de Agroecologia**, [S.l.], v. 11, n. 2, podemos
jan. 2017. ISSN 2236-7934.

SILVA, M.M.M.A. **avaliação do comportamento de cisternas dimensionadas pelo método de Andrade Neto em regiões de diferentes regimes pluviais no Rio Grande do Norte**. Dissertação (obtenção de mestre em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN. 54p. 2018.

Souza, R. O. R. de M., Scaramussa, P. H. M., do Amaral, M. A. C. M., Pereira Neto, J. A., Pantoja, A. V., & Sadeck, L. W. R. (2012). Equações de chuvas intensas para o estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16(9), 999-1005.

VIABILIDADE DE ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO: UMA ANÁLISE ENTRE SMR, ELETRÓLISE E FOTOCATÁLISE

1 Ana Beatriz Alves Hasegawa, 2 Arthur Gabriel de Oliveira Gil, 3 Beatriz Pedrosa Santos, 4 Antônio Otávio de Toledo Patrocínio

1Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: ana.hasegawa@ufu.br; 2Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: arthur.gil@ufu.br; 3Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: beatriz.pedrosa@ufu.br; 4Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: otaviopatrocinio@ufu.br

Palavras-chave: Hidrogênio de Baixo Carbono; Eletrólise; Fotocatálise.

Resumo

O processo de transição energética global busca alternativas para mitigar as mudanças climáticas, posicionando o hidrogênio verde como um vetor energético estratégico. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre a produção convencional de hidrogênio via Reforma a Vapor do Metano (SMR) e a produção sustentável por meio da eletrólise e fotocatálise. A metodologia consistiu em uma revisão bibliográfica sistemática fundamentada no método PRISMA, selecionando estudos publicados entre 2020 e 2025 nas bases Capes, Scopus e Google Acadêmico.

Os resultados demonstram que, embora a SMR possua elevada maturidade tecnológica e menor custo (US$ 1,5–2,5/kg H_2), com um TRL (do inglês *Technology Readiness Leve*l) avaliado em 9,, e eficiência térmica próxima a 80%, seu impacto ambiental é crítico, gerando de 9 a 12 kg de CO_2 por kg de H_2 produzido. Em contrapartida, as tecnologias de eletrólise permitem a obtenção de hidrogênio com emissões nulas quando integradas a fontes renováveis. A Eletrólise Alcalina (AWE) destaca-se pela robustez e menor custo de materiais, operando com eficiência entre 50% e 60% e com custo de US$ 3–6/kg H_2. Já a Eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEMWE), apesar do alto custo devido ao uso de metais nobres como catalisadores apresenta algumas vantagens operacionais e de eficiência. A fotocatálise, embora ainda em estágio inicial e com altos custos devido à baixa eficiência e maturidade (TRL 3-4), demonstra potencial de competitividade futura, especialmente em rotas como a fotorreforma de resíduos.

Conclui-se que a superação da dependência fóssil do hidrogênio cinza depende do avanço na durabilidade dos materiais e da redução dos sobrepotenciais eletroquímicos nas células AWE e PEMWE, consolidando-as como pilares viáveis para a descarbonização da matriz energética mundial, além da continuidade nas pesquisas de desenvolvimento de materiais mais baratos e otimização das células de fotocatálise.

Introdução

Em meio ao crescimento das pesquisas relacionadas à viabilização de um mercado energético livre de combustíveis fósseis em busca da mitigação dos efeitos agravadores das mudanças climáticas, a produção e armazenamento de energia a partir de hidrogênio de baixo carbono, ou hidrogênio verde, é uma alternativa promissora para potencializar os resultados oriundos das fontes renováveis (DASH *et al*, 2024).

Reconhece-se uma grande variedade de mecanismos e procedências associadas à produção de hidrogênio e a principal deriva do processo de reforma a vapor do metano (*Steam Methane Reform* - SMR), o qual tem grandes impactos ambientais (CAMPOS; LEÃO; AMORIM, 2021). Dessa forma, a busca pelo desenvolvimento do hidrogênio verde surge como a grande promessa para o contexto global de transição energética, e para tornar eficaz a sua viabilização é essencial o desenvolvimento de estratégias capazes de atenuar os desafios relacionados à sua geração (DE LARA; RICHTER, 2023).

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver o conhecimento sobre a viabilização e expansão do hidrogênio verde no mercado de energia em detrimento do hidrogênio derivado de combustíveis fósseis, especialmente por SMR. O estudo propõe ainda o aprofundamento em relação ao funcionamento e desafios técnicos, econômicos e ambientais da eletrólise, sobretudo dos tipos Alcalina (*Alkaline Water Electrolysis* - AWE) e de Membrana de Troca de Prótons (*Proton Exchange Membrane* - PEM), e da fotocatálise como rota emergente.

Material e Métodos

A pesquisa foi fundamentada em uma abrangente revisão bibliográfica de caráter qualitativo, voltada para a identificação e análise das principais contribuições científicas acerca do hidrogênio verde, sobretudo, nos processos de eletrólise alcalina e PEM e a fotocatálise, investigando sua viabilidade técnica e ambiental.

O levantamento de informações foi realizado através de bases de dados científicos. Foram selecionados artigos de revisão, da plataforma de busca Periódicos Capes, Scopus e Google Acadêmico, utilizando os termos de busca, "G*reen Hydrogen*", "S*team Methane Rreform*", "*Alkaline Water Electrolysis*", *"PEM Water Electrolysis", "Photocatalysis"* e *"Feasibility*", no período de 2020 a 2025, na língua inglesa. Os principais artigos retornados foram "*Advances in green hydrogen production through alkaline water electrolysis: A comprehensive review*" (DASH *et al*., 2024), "*A Comparative Science-Based Viability Assessment Among Current and Emerging Hydrogen-Production Technologies"* (KHALIL, 2025), *" Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production*." (KOWALIK, P. *et al*., 2025), *"Parametric study of PEM water*

electrolyzer performance." (ALKHALDI, S., *et al*, 2024) e "*Materials advances in photocatalytic solar hydrogen production: integrating systems and economics for a sustainable future.*" (GUNAWAN, D., 2024).

A seleção do material teórico seguiu a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Ela estrutura revisões sistemáticas por meio da identificação, triagem, avaliação de elegibilidade e inclusão de estudos, o que assegura que o processo de seleção seja transparente, confiável e rastreável. Inicialmente, foram identificados 75 artigos relacionados ao tema; após a remoção de duplicatas, foram aplicados critérios de inclusão como a data de publicação e o foco em temas necessários para a compreensão da viabilidade técnica e ambiental do hidrogênio verde, e critérios de exclusão como a identificação de publicações que abrangem temas que não se relacionam diretamente com o tema, estudos de casos muito específicos e materiais aos quais não foi possível ter acesso completo. Ao final restaram 52 estudos elegíveis, e para este artigo, foram utilizados 34.

Resultados e Discussão

O hidrogênio cinza, ou hidrogênio fóssil, é atualmente a forma mais utilizada de hidrogênio no mundo, sendo amplamente obtido a partir de combustíveis fósseis, como gás natural e carvão, o que resulta em elevadas emissões de dióxido de carbono (CO_2) e significativo impacto ambiental (IEA, 2023). Os Estados Unidos, por exemplo, obtêm 95% do hidrogênio a partir da reforma catalítica a vapor de metano (US DOE, 2020).

A reforma catalítica a vapor de metano (SMR) é a tecnologia mais avançada e eficaz entre as alternativas existentes para a produção de hidrogênio em grande escala industrial, apresentando elevado nível de maturidade tecnológica, situando-se em TRL 9, por ser uma tecnologia amplamente consolidada e empregada industrialmente (BAYKARA, 2018; IRENA,2020). A reforma catalítica de vapor de metano consiste em um processo termoquímico no qual o metano (CH_4), principal componente do gás natural, reage com vapor d'água em condições elevadas de temperatura, geralmente na presença de catalisadores, resultando na formação de uma mistura gasosa composta predominantemente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2), conhecida como gás de síntese (*syngas*) (KOWALIK *et al.*, 2025). Alternativamente ao metano, outros hidrocarbonetos podem ser utilizados, como nafta, gás liquefeito de petróleo, óleo combustível e diesel (GARCÍA, 2015).

O processo de reforma a vapor do metano é de natureza endotérmica, exigindo o fornecimento contínuo de energia térmica. Essa etapa é conduzida em temperaturas elevadas, variando entre 700 e 1100 °C, e sob pressões de 3 a 25 bar, na presença de catalisadores à base de níquel (Ni) suportados em alumina (Al_2O_3) (RSC, 2025). O monóxido de carbono (CO) gerado na etapa inicial é subsequentemente convertido em dióxido de carbono (CO_2) por meio da reação com vapor d'água, aumentando a produção de hidrogênio (H_2) em um processo conhecido como reação de deslocamento gás-água (*water-gas shift reaction* – WGS). Posteriormente, o CO_2 e outras impurezas são removidos da corrente gasosa por meio da técnica de adsorção por oscilação de pressão (*pressure swing adsorption* – PSA), resultando na obtenção de hidrogênio de elevada pureza (MONIR *et al*., 2022). A reforma a vapor do metano associado à WGS tem uma elevada eficiência térmica, cerca de 80%, calculada em relação às energias equivalentes do gás natural consumido e do H_2 produzido, além de um alto rendimento na produção de H_2, cerca de 74% (EPE, 2022). As reações associadas ao SMR estão demonstradas nas equações 01 e 02, e a equação 03 demonstra a equação global.

$$CH_4 + H_2O \rightleftarrows CO + 3H_2 \quad (1)$$

$$CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2 \quad (2)$$

$$CH_4 + 2\,H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2 \quad (3)$$

Em 2023, a demanda global de hidrogênio atingiu cerca de 97 milhões de toneladas, sendo majoritariamente suprida por combustíveis fósseis. Dentre essas fontes, aproximadamente dois terços da produção mundial são provenientes do gás natural, principalmente por meio da reforma a vapor do metano (IEA, 2024). Para cada quilo de H_2 produzido, são gerados aproximadamente 9 a 12 kg de dióxido de carbono (CO_2), provenientes tanto das reações químicas quanto da queima de gás natural necessária para fornecer energia ao processo endotérmico, evidenciando seu elevado impacto ambiental (UNIVERSITY OF MICHIGAN, 2024).

A extração de gás natural, principal matéria-prima do hidrogênio cinza, utiliza técnicas como perfuração direcional e horizontal, que permitem alcançar reservatórios profundos e aumentar a eficiência da recuperação, além de métodos de estimulação como a acidificação para aumentar a produtividade (EL SABEH *et al*., 2023; ENVIRONMENT AGENCY, 2018; JIMÉNEZ; KHAN; AZLAAN, 2024). Destaca-se o fraturamento hidráulico (*fracking*), que injeta água, areia e aditivos sob alta pressão para liberar o gás. Embora aumentem a eficiência e permitam acessar novas reservas, essas técnicas estão associadas a impactos ambientais relevantes, como alto consumo de água, contaminação de aquíferos, emissões de metano e sismicidade induzida, evidenciando os desafios ambientais vinculados à cadeia de produção do hidrogênio fóssil (MEHANY; GUGGEMOS, 2015; MOUALLEM *et al*., 2014; U.S. EPA, 2023).

O hidrogênio verde ou hidrogênio de baixo carbono apresenta vantagens significativas em relação à produção convencional via SMR, especialmente no que se refere às emissões de gases de efeito estufa e à sustentabilidade energética. Enquanto o SMR é responsável por emissões elevadas, o hidrogênio verde, obtido por eletrólise da água com uso de fontes renováveis, além de fotocatálise da água ou fotorreforma de compostos orgânicos, apresenta emissões praticamente nulas durante sua produção, contribuindo diretamente para a mitigação das mudanças climáticas (IEA, 2023).

Entre as principais tecnologias de produção de hidrogênio verde via hidrólise existentes, a Eletrólise Alcalina da Água ganha destaque devido sua maturidade e eficiência de produção, podendo ser produzidas até 3000 Nm^3/h (N indica medida do

gás em condições normais: 1 atm e 273,15K) por eletrolisador. A AWE é uma técnica que envolve a separação da água em hidrogênio e oxigênio por meio de eletricidade, com uso de um eletrólito alcalino, o qual deve possuir menor capacidade de sofrer descarga elétrica do que a água. A AWE é uma tecnologia madura, de Nível de Maturidade Tecnológica ou TRL 9 (KHALIL, 2025), e pode ser utilizada em larga escala.

A estrutura básica exigida para uma unidade de eletrólise alcalina de água consiste em um ânodo, um cátodo, uma fonte de alimentação e um eletrólito (DASH *et al*., 2024). A AWE baseia-se na condução de ânions hidróxido através de um eletrólito líquido entre dois eletrodos separados por um diafragma permeável, que serve para evitar curtos-circuitos e a mistura dos gases (H_2 e O_2) produzidos. As reações que ocorrem no cátodo, Reação de Evolução do Hidrogênio (HER), e ânodo, Reação de Evolução do Oxigênio (OER) ocorrem conforme as equações 04 e 05, além da equação global demonstrada na equação 06:

$$2H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow 2OH^-_{(aq)} + H_{2(g)} \quad (04)$$

$$2OH^-_{(aq)} \rightarrow 12O_{2(g)} + H_2O_{(l)} + 2e^- \quad (05)$$

$$H_2O_{(l)} \rightarrow H_{2\,(g)} + 12O_{2(g)} \quad (06)$$

O sistema é composto por um cátodo, onde ocorre a HER, e um ânodo, onde ocorre a OER, comumente fabricados a partir de Níquel ou ligas de aço inoxidável revestidas, materiais que oferecem estabilidade química em meio básico a custos reduzidos. É utilizada uma solução eletrolítica, geralmente com adição de KOH ou NaOH concentrado, que facilita a condução iônica entre os eletrodos (DASH *et al*., 2024). A separação física dos eletrodos é feita por um diafragma poroso, feito de materiais cerâmicos ou poliméricos como o Zirfon, que permite o transporte de íons OH^- enquanto minimiza a passagem indesejada de gases (LI *et al*., 2024). Além disso, a AWE é sustentada por seus sistemas auxiliares, que incluem as placas de extremidade da célula e separadores gás-líquido, essenciais para o isolamento e coleta dos produtos gasosos. O gerenciamento térmico e químico é realizado por um sistema de circulação de eletrólito, que mantém a concentração e a temperatura ideais para a condução iônica. Para atingir os requisitos de pureza comercial, o hidrogênio bruto passa por unidades de purificação e desidratação, e o fornecimento de energia é modulado por sistemas de controle de potência que estabilizam a densidade de corrente, a temperatura e a tensão da célula (LI *et al*., 2024).

A integração da AWE com fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, impõe desafios significativos de engenharia. Sob baixas densidades de corrente (inferiores a 200 mA/cm²), a eficiência na separação dos produtos diminui, podendo gerar misturas inflamáveis de H_2 e O_2 sistema pode demandar até uma hora de inicialização (LI *et al*., 2024). Diferente da limitação cinética observada em outras rotas, as restrições da AWE para operar sob carga dinâmica residem majoritariamente no design do equipamento, na eletrônica de potência e no controle de fluxo de fluidos, e não na química da reação em si (DASH *et al*., 2024).

Termodinamicamente, embora o potencial teórico para a quebra da água seja de 1,23 V, a tensão real aplicada é substancialmente superior devido à resistência ôhmica do eletrólito, às energias de ativação e à formação de bolhas nos eletrodos que obstruem o transporte de massa (TÜYSÜZ, 2024). A temperatura de operação é mantida entre 70°C e 100°C, faixa limitada pela estabilidade estrutural do diafragma. Atualmente, a eficiência energética total do sistema varia entre 50% e 60%. Essa diferença em relação à eficiência intrínseca da eletrólise (que pode atingir 70%) é atribuída às perdas nos processos auxiliares de retificação, purificação e compressão do hidrogênio produzido (LI *et al*., 2024).

A eletrólise da água por membrana trocadora de prótons (PEMWE) consolidou-se como a segunda rota mais utilizada para a eletrólise da água, com crescimento anual de 80%. Atualmente, os sistemas tradicionais já apresentam alto nível de maturidade (TRL 9), com pelo menos 11 fornecedores globais e eficiências entre 50% e 83% (QURESHI et al., 2025; COZZOLINO; BELLA, 2024). Em contrapartida, designs avançados e tecnologias alternativas permanecem em desenvolvimento (TRL 3 a 7) (KRISHNAN et al., 2023). O principal desafio está na avaliação do desempenho a longo prazo sob condições dinâmicas, agravado pela escassez de modelos computacionais completos, dificuldades em testes experimentais prolongados e baixa disponibilidade de dados industriais, o que limita previsões sobre durabilidade e ciclo de vida (QURESHI et al., 2025).

A tecnologia PEMWE, embora tenha menor eficiência que a AWE, cerca de 250 Nm³/h por eletrolisador, apresenta vantagens como operação em altas densidades de corrente e baixas temperaturas, permitindo células mais compactas e melhor resposta a variações de energia. Isso facilita sua integração com fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica (WANG *et al*., 2023). Além disso, a baixa permeabilidade da membrana garante hidrogênio de alta pureza (AYERS et al., 2021). O processo inicia com a entrada de água deionizada no ânodo, onde ocorre a OER, gerando $½O_2$ e $2H^+$. O oxigênio é liberado, e os prótons atravessam a membrana até o cátodo, onde, ao se unir com elétrons do circuito externo, formam H_2 na HER (ALKHAID *et al*., 2024). As equações das reações do ânodo, cátodo e global estão descritas nas equações 07, 08 e 09, respectivamente.

$$H_2O \rightarrow ½O_2 + 2H^+ + 2e- \quad (07)$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad (08)$$

$$H_2O \rightarrow ½O_2 + H_2 \quad (09)$$

A membrana polimérica trocadora de prótons facilita a passagem de prótons do ânodo para o cátodo e impede a passagem de elétrons e água. O principal material utilizado na composição das membranas atualmente é o ácido

perfluorossulfônico (PFSA), especialmente o Nafion (BAROUTAJI *et a*l., 2023). Os sítios ativos para ocorrência das reações se encontram nas camadas catalisadoras (*Catalyst Layers* – CLs), feitas principalmente de Irídio ou Rutênio no ânodo e Platina no cátodo. De acordo com Bayat *et a*l. (2025), o aumento da eficiência das células PEM depende da otimização de catalisadores, membranas, estrutura de eletrodos e design de canais de fluxo, mudanças estruturais que influenciam parâmetros importantes para a avaliação da performance como transporte de massa, perdas ôhmicas e geração de sobrepotencial. Assim, é necessário balancear os efeitos causados por cada mudança estrutural com as condições operacionais ótimas de cada célula para atingir melhor eficiência.

A performance da PEMWE é regida por fundamentos termodinâmicos, sendo a eletrólise uma reação endotérmica que requer energia externa. O potencial reversível da célula $Vrev$, calculado via energia livre de Gibbs ΔG, é de 1,229V. Contudo, em condições reais, a entropia ΔS eleva o potencial, e ele supera o teórico devido aos sobrepotenciais ôhmicos, de ativação e de concentração (KUMAR; HIMABINDU, 2019). A eficiência da célula é inversamente proporcional à geração desses sobrepotenciais. Além disso, o desempenho operacional é avaliado pela relação entre a tensão da célula e a densidade de corrente: densidades maiores aumentam a produtividade de H_2, mas exigem tensões elevadas, o que reduz a eficiência global, tornando ideais células operam em maiores densidades de corrente com o menor aumento de tensão. (MAKHSOOS *et al*., 2024; SEZER *et al*., 2024).

A configuração estrutural e a seleção de materiais também são determinantes para a eficiência e longevidade das células. Membranas mais espessas mitigam o crossover de H_2 e garantem maior segurança operacional, mas elevam a resistência ôhmica e reduzem a eficiência voltaica (AYERS *et al*., 2022). Estratégias para otimizar membranas mais finas incluem o uso de catalisadores de recombinação de gases (*Gas Recombination Catalysts* - GRCs), e de materiais alternativos ao PFSA, como a polissulfona. Entretanto, a aplicação comercial dessas tecnologias ainda enfrenta barreiras devido aos elevados índices de degradação sob condições operacionais (PARK *et al*., 2022; BAROUTAJI *et al*., 2023).

No que diz respeito às camadas catalisadoras, o principal desafio reside na dependência de metais nobres. A carga de Irídio no ânodo e de Platina no cátodo dita a taxa de geração de H_2, mas os altos custos e a escassez das reservas de Irídio exigem reduções drásticas para viabilizar a expansão industrial (KRISHNAN *et al*., 2023). Alternativas em desenvolvimento incluem ligas metálicas, integração com óxidos de suporte e estruturas *core-shell*, além do uso de metais de transição como molibdênio e níquel para a HER. A otimização da porosidade das CLs também é crucial, pois deve equilibrar a difusão de reagentes e a condutividade elétrica. Entretanto, a durabilidade a longo prazo desses novos catalisadores ainda carece de estudos que levem em consideração o seu desgaste em condições reais (BAYAT *et al.*, 2025).

As condições operacionais são determinantes para a eficiência da PEMWE. A temperatura (60–80°C) melhora a cinética e a condutividade da membrana, reduzindo perdas ôhmicas, mas exige materiais mais resistentes e de alto custo (AZAM *et al*., 2023). O ânodo opera à pressão atmosférica, enquanto o cátodo varia entre 1 e 10 bar, sendo que pressões elevadas podem reduzir a produção e aumentar o desgaste, mas facilitam o armazenamento e diminuem custos de compressão (ZHU *et al*., 2024). Maiores fluxos de água aumentam a produtividade, porém elevam o consumo auxiliar. Assim, a eficiência depende da otimização conjunta de temperatura, pressão e vazão conforme a aplicação (AZAM *et al*., 2023; ZHU *et al*., 2024).

Além das rotas de eletrólise, a fotocatálise solar surge como via emergente de produção de H_2 verde, convertendo fótons diretamente em energia química sem o intermediário elétrico; embora ainda em estágio inicial de maturidade tecnológica (TRL 3 a 4), seu potencial de menor custo de capital em relação à eletrólise justifica atenção crescente da literatura (ISAACS *et al*., 2023; GUNAWAN *et al*., 2024).

A fotocatálise heterogênea para produção de hidrogênio baseia-se na absorção de fótons solares por um semicondutor, processo que promove elétrons da Banda de Valência (BV) para a Banda de Condução (BC), gerando pares elétron-buraco (e^-/h^+). Para que a excitação ocorra, a energia do fóton incidente deve ser igual ou superior à largura do *bandgap* (diferença de energia entre BV e BC) do material, parâmetro que determina a faixa do espectro solar aproveitada pelo fotocatalisador. O elétron excitado na BC atua como agente redutor, migrando até sítios ativos na superfície do semicondutor, geralmente mediados por um co-catalisador, onde reduz prótons disponíveis em solução segundo a Reação de Evolução do Hidrogênio (HER), conforme equação 10:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad (10)$$

Simultaneamente, o buraco remanescente na BV atua como agente oxidante, consumindo a molécula doadora de elétrons na Reação de Evolução do Oxigênio (OER), conforme equação 11:

$$2H_2O + 4h^+ \rightarrow O_2 + 4H^+ \qquad (11)$$

No caso da divisão total da água (*overall water splitting*), ou oxidando substratos orgânicos em rotas alternativas denominadas fotorreforma, nas quais resíduos como álcoois, plásticos ou efluentes substituem a água como agente sacrificial (GUNAWAN et al., 2024; ISAACS et al., 2023). Entre as principais vantagens da fotocatálise solar, destaca-se sua simplicidade de processo: ao converter fótons diretamente em energia química, a tecnologia dispensa os componentes auxiliares necessários nas rotas de eletrólise, como células fotovoltaicas e eletrolisadores separados, resultando em menor custo de capital estimado (CAPEX) com limite operacional de US$ 102/m² apontado por Hisatomi e Domen (2019, apud GUNAWAN et al., 2024). Adicionalmente, na rota de fotorreforma, o processo integra simultaneamente a produção de H_2 e o tratamento de resíduos

orgânicos, conferindo duplo benefício ambiental e potencial de geração de coprodutos de valor agregado, como o ácido tereftálico na fotorreforma de PET (LU *et al*., 2024). Do ponto de vista das desvantagens, o principal obstáculo é a recombinação dos portadores de carga: o par e^-/h^+ gerado pode se reunir em escala de picossegundos a nanossegundos, dissipando a energia absorvida como calor ou luminescência antes de qualquer reação útil, o que mantém a eficiência solar-para-hidrogênio (*Solar to Hydrogen* - STH) predominantemente entre 1% e 2% na maioria dos sistemas reportados, bem abaixo do limiar mínimo de viabilidade comercial de 5% a 10% (GUNAWAN et al., 2024). Acrescenta-se ainda a dependência de metais nobres como platina (Pt) e ródio (Rh) como co-catalisadores, cujo custo elevado e vulnerabilidade a restrições de cadeia de suprimentos representam barreiras relevantes para o escalonamento industrial (ZHANG *et al*., 2025).

A viabilidade do hidrogênio verde depende não apenas de fatores técnicos de eficiência e maturidade tecnológica, mas também econômicos. O principal indicador é o custo nivelado de produção (*Levelized Cost of Hydrogen* - LCOH), cuja meta para competitividade frente ao hidrogênio cinza varia entre US$ 2 e 4 por kg de H_2 na produção em escala comercial (IEA, 2024). As tecnologias de eletrólise AWE e PEMWE, quando integradas a fontes renováveis, apresentam LCOH entre US$ 3 e 6/kg H_2, com projeções de queda para US$ 1,5 a 2/kg até 2030, devido a redução dos custos dos eletrolisadores e da eletricidade renovável (KRISHNAN et al., 2023). Já a fotocatálise solar possui LCOH atuais superiores a US$ 14/kg devido à baixa eficiência (1–2%), mas pode atingir US$ 1,60 a 3,12/kg ao alcançar STH de 5–10%, tornando a tecnologia competitiva. A fotorreforma de resíduos como o poli(tereftalato de etileno) (PET),com recuperação de coprodutos de valor agregado, destaca-se como a rota mais promissora, podendo reduzir o LCOH para até US$ 0,27/kg em cenários otimizados (GUNAWAN *et al.,* 2024).A Tabela 01 apresenta uma análise comparativa das rotas de produção de hidrogênio cinza e verde, considerando aspectos de viabilidade, como maturidade tecnológica, custo e impacto ambiental.

Tabela 01 - Comparação entre rotas de produção de H_2 verde: maturidade, custo e impacto ambiental

Tecnologia	TRL	LCOH atual (US$/kg H_2)	Emissões ($kgCO_2eq/kgH_2$)
SMR (H_2 cinza)	9	~ US$ 1,5–2,5	9 a 12 $kgCO_2eq/kgH_2$
AWE (eletrólise alcalina)	9	US$ 3–6	< 1* $kgCO_2eq/kgH_2$
PEMWE	9	US$ 3–6	< 1* $kgCO_2eq/kgH_2$
Fotocatálise solar	3–4	US$ 14–150 (meta: US$ 1,6–3,1)	< 1* $kgCO_2eq/kgH_2$

Fonte: Elaborado pelos autores com base em KRISHNAN *et al.* (2023); GUNAWAN *et al*. (2024); OSMAN *et al*. (2024); IEA (2024).

Do ponto de vista ambiental, a AWE, PEMWE e fotocatálise solar convergem para emissões de ciclo de vida próximas de zero quando alimentadas por energia renovável, apresentando desempenho radicalmente superior ao da SMR, que emite de 9 a 12 $kgCO_2eq$ por kg de H_2 produzido (OSMAN *et al*., 2024; WU *et al*., 2024). A principal diferença ambiental entre as rotas eletrolíticas e a fotocatálise reside na etapa de fabricação dos fotocatalisadores, que pode envolver solventes e processos energo-intensivos; no entanto, os créditos de emissão associados à substituição do hidrogênio cinza reduzem significativamente o impacto líquido do processo (WU *et al*., 2024). Destaca-se ainda que a fotorreformação de efluentes industriais e municipais agrega duplo benefício ambiental, a produção de H_2 e tratamento simultâneo de resíduos, aspecto relevante para economias em desenvolvimento com elevada geração de resíduos agroindustriais, como o Brasil (LU *et al*., 2024).

Considerações Finais

O estudo mostrou que a reforma a vapor do metano (SMR) permanece como a principal rota de produção de hidrogênio em escala industrial, devido à sua alta maturidade tecnológica e eficiência. Contudo, seu elevado impacto ambiental, associado às emissões de CO_2 e à dependência de combustíveis fósseis, muitas vezes obtidos por meio de *fracking,* limita sua viabilidade ambiental a longo prazo.

Nesse cenário, as rotas alternativas de produção de hidrogênio de baixo carbono ganham destaque. A eletrólise alcalina (AWE), por sua maturidade tecnológica, apresenta viabilidade para aplicação em larga escala, embora ainda enfrente limitações relacionadas à eficiência do sistema e à operação sob regimes dinâmicos. Por sua vez, a eletrólise por membrana trocadora de prótons (PEMWE) oferece vantagens como maior flexibilidade operacional, alta pureza do hidrogênio produzido e melhor adaptação a fontes renováveis intermitentes. Contudo, sua viabilidade econômica ainda é impactada pelo alto custo e pela limitada durabilidade de materiais críticos, especialmente catalisadores baseados em metais nobres. Adicionalmente, apresentou-se a fotocatálise para quebra da água ou a fotorreforma de compostos orgânicos como via alternativa de baixo impacto ambiental, entretanto esta encontra-se em estágio de desenvolvimento laboratorial e requer mais esforços até a possibilidade de aplicação comercial.

Dessa forma, embora a SMR ainda predomine no cenário atual, a transição para rotas sustentáveis de produção de hidrogênio é promissora e depende diretamente da superação de desafios tecnológicos, operacionais e econômicos associados às alternativas de baixo carbono.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Empreendedorismo Ambiental, ao Laboratório de Fotoquímica e Ciência dos Materiais (LAFOT-CM) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte institucional e pelo fomento à pesquisa que possibilitaram a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas.

ALKHALDI, S., *et al.* **Parametric study of PEM water electrolyzer performance**. Journal of Applied Electrochemistry. V. 55, p. 327-343, agosto de 2024.

AYERS, K., *et al*. **PEM Electrolysis, a Forerunner for Clean Hydrogen**. The Electrochemical Society. 2021.

AZAM, A., *et al*. **Parametric Study and Electrocatalyst of Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Electrolysis Performance. Polymers.** V. 15, janeiro de 2023.

BAROUTAJI, A, *et al.* **Additive manufacturing for Proton Exchange Membrane (PEM) hydrogen technologies: merits, challenges, and prospects**. International Journal of Hydrogen Energy. V. 52, p. 561-584, julho de 2023.

BAYAT, A., *et al*. **Proton Exchange Membrane Electrolysis Revisited: Advancements, Challenges, and Two-Phase Transport Insights in Materials and Modellin**g. Eng. Abril de 2025.

BAYKARA, S. Z. **Hydrogen: a brief overview on its sources, production and environmental impact.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 43, n. 23, p. 10605–10614, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.022. Acesso em: 12 fev. 2026.

CAMPOS, M.; LEÃO, C.; AMORIM, L. **O hidrogênio como fonte de energia: uma visão regulatória.** Rio de Janeiro: GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br. Acesso em: 17 set. 2025.

DASH, S. *et al*. **Advances in green hydrogen production through alkaline water electrolysis: A comprehensive review**. *International Journal of Hydrogen Energy:* Elsevier, v. 83, p. 614–629, 2024.

EL SABEH, K. *et al*. **Extended-reach drilling (ERD): the main problems and current achievements**. Applied Sciences, v. 13, n. 7, art. 4112, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app13074112. Acesso em: 12 fev. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Hidrogênio cinza: produção a partir da reforma a vapor do gás natural.** Rio de Janeiro: EPE, 2022a. Disponível em: https://www.epe.gov.br. Acesso em: 1 set. 2025.

ENVIRONMENT AGENCY. **Use of acid at oil and gas exploration and production sites.** Bristol: Environment Agency, 2018. Disponível em: https://consult.environment-agency.gov.uk/onshore-oil-and-gas/onshore-oil-and-gas-regulation-information-page/supporting_documents/Acidisation%20FAQs%20January%202018.pdf. Acesso em: 1 set. 2025.

GUNAWAN, D. *et al*. Materials advances in photocatalytic solar hydrogen production: integrating systems and economics for a sustainable future. **Advanced Materials**, v. 36, p. e2404618, 2024.

GARCÍA, L. **Hydrogen production by steam reforming of natural gas and other nonrenewable feedstocks**. In: SUBRAMANI, V.; BASILE, A.; VEZIROĞLU, T. N. (org.). Compendium of hydrogen energy. Oxford: Woodhead Publishing, 2015. p. 83–107. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-361-4.00004-2. Acesso em: 12 fev. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Methane Tracker 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024. Acesso em: 8 abr. 2026.

IRENA – International Renewable Energy Agency. *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*. 2020.

ISAACS, M. et al. Is photocatalysis the next technology to produce green hydrogen to enable the net zero emissions goal? **Global Challenges**, v. 7, p. 2200165, 2023.

JIMÉNEZ, C.; KHAN, F.; AZLAAN, M. **Directional drilling techniques: advances in directional drilling technology**. [S. l.], 2024.

KHALIL, Y. **A Comparative Science-Based Viability Assessment Among Current and Emerging Hydrogen-Production Technologies**. Applied Science: MDPI, 2025.

KOWALIK, P. *et al.* **Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production.** Energy, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134540. Acesso em: 12 fev. 2026.

KRISHNAN, S., *et a*l. **Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks**. International Journal of Hydrogen Energy. V. 48, p. 32313-32330, maio de 2023.

LARA, D. M.; RICHTER, M F. **Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro**. Novos Cadernos NAEA, Belém, v. 26, n. 1, p. 1–20, jan./abr. 2023. ISSN 1516-6481.

LI, YUNFEI *et al*. **A perspective on three sustainable hydrogen production technologies with a focus on technology readiness level, cost of production and life cycle environmental impacts**. Heliyon Elsevier Ltd, v.10, 15 mar. 2024.

LU, X. *et al*. Simultaneous hydrogen production and photocatalytic pollutant removal: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 22, 2024.

MEHANY, M. S. H. M., GUGGEMOS, A. **A Literature Survey of the Fracking Economic and Environmental Implications in the United States**. Procedia Engineering: Elsevier, V. 118, p. 169 – 176, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.415

MONIR, M. U.; AZIZ, A. A.; AHMED, M. T.; HASAN, Y. **Hydrogen energy – potential in developing countries**. In: KHAN, I. (org.). Renewable energy and sustainability: prospects in the developing economies. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 299–325. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88668-0.00013-9. Acesso em: 12 fev. 2026.

MOUALLEM, C.; DE SOUSA, W. T.; CABRAL, I. E.; *et al*. **Perspectivas da produção de óleo e gás pelo método de fraturamento hidráulico**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto: 2014.

OSMAN, A. I. et al. Life cycle assessment of hydrogen production, storage, and utilization toward sustainability. **WIREs Energy and Environment**, v. 13, n. 3, p. e526, 2024.

QURESHI *et al.* **Sustainable energy prospects: Advancements in green hydrogen production through proton exchange membrane water electrolysis**. International Journal of Hydrogen Energy. Março de 2025.

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY (RSC). **Steam reforming of methane: state of the art and novel technologies**. Reaction Chemistry & Engineering, 2025. Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/re/d5re00001g. Acesso em: 12 fev. 2026.

TÜYSÜZ, Harun. **Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production.** Accounts of Chemical Research, v. 57, p. 558–567, 18 nov. 2023.

UNITED STATES. Department of Energy. **U.S. Department of Energy Hydrogen Program Plan**. [S. l.]: U.S. Department of Energy, 2020. Disponível em: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency (EPA). **Hydraulic fracturing and its potential impact on drinking water resources**. 2023. Disponível em: https://www.epa.gov/hfstudy. Acesso em: 8 abr. 2026.

UNIVERSITY OF MICHIGAN. **Hydrogen factsheet.** 2024. Disponível em: https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/hydrogen-factsheet. Acesso em: 8 abr. 2026.

WANG, X., *et al.* **Performance of Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis Systems: Configuration, Stack Materials, Turndown and Efficiency. Energies.** V. 16, junho de 2023.

WU, Z. *et al*. Environmental impact of waste treatment and synchronous hydrogen production: based on life cycle assessment method. **Energies**, v. 17, p. 4875, 2024.

ZHU, Y., *et al*. **Effects of key design and operating parameters on the performance of the PEM water electrolysis for hydrogen production**. Renewable Energy. V. 235, setembro de 2024.

CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DO VENTO E SEU POTENCIAL EÓLICO EM ITAJAÍ/SC UTILIZANDO A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

1 Jhonatan Acacio Silva, 2 Felipe Brum Rossato, 3 Lucas Carneiro Baptista, 4 Raimundo Celeste Ghizoni Teive, 5 Jose Angel Alvarez Perez

1 Universidade do Vale do Itajaí (Univali), e-mail: jhonatanacacio@univali.br; 2 Univali, e-mail: felipe.rossato@univali.br; 3 Univali, e-mail: Lucascarneirobjj@hotmail.com; 4 Univali, e-mail: rteive@univali.br; 5 Univali, e-mail: angel.perez@univali.br

Palavras-chave: Energia eólica, Distribuição de Weibull, potencial eólico.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial técnico da geração de energia eólica por meio de uma metodologia computacional generalista, baseada na análise direcional e estatística dos ventos em 360°. A pesquisa utiliza dados da bacia hidrográfica do rio Itajaí, em Santa Catarina, Brasil, considerando um conjunto sólido de aproximadamente 15 anos de registros meteorológicos com dados horários. O tratamento dos dados permitiu a construção de três rosas dos ventos: uma voltada à recorrência dos ventos médios, outra à direção principal da potência disponível, estimada por meio da velocidade elevada ao cubo, e uma terceira associada às rajadas de vento. Além disso, foi aplicada a distribuição de Weibull, permitindo modelar o regime dos ventos e sua densidade de probabilidade. Os resultados indicam que, embora a ocorrência dos ventos varie conforme a direção, o maior potencial energético está associado a direções específicas e a velocidades mais elevadas. A análise da faixa operacional considerada indica que os ventos aproveitáveis ocorrem em 43,42% dos registros, enquanto 92,54% da energia eólica disponível está concentrada dentro dessa faixa. Conclui-se que a metodologia proposta permite identificar o potencial eólico da região, demonstrando viabilidade técnica e fornecendo subsídios para a escolha e implantação de turbinas eólicas de pequeno porte em diferentes contextos geográficos.

Introdução

Crises climáticas, tensões políticas, altos custos de fabricação e manutenção de matrizes energéticas, pontos que acompanham o desenvolvimento transversal da sociedade. Abrangência desses pontos críticos traz à tona a complexidade do tema abordado pela Levin *et al*. (2009), as consequências impactam todas as camadas da sociedade.

A recorrência de fenômenos naturais descontrolados em grande escala, conforme a ideia de Liu *et al*. (2025), são atribuídos ao desgaste acumulativo de atividades geradas pelo ser humano, gases de efeito estufa são majoritariamente conhecidos pelo potencial destrutivo do ambiente físico da terra, predominantemente refletido nos eventos meteorológicos. Segundo Santos *et al*. (2022) aumento de temperatura global, perturbação nos padrões de precipitação, derretimento das calotas polares, aumento do nível do mar, acidificações dos oceanos e maior frequência de eventos extremos como secas, tempestades de vento, caracterizam a crise climática. A exposição direta afeta exponencialmente, sistemas energéticos e infraestruturas críticas da sociedade.

A resiliência por pesquisa e desenvolvimento de energias renováveis, como a energia eólica, ganham relevância e se tornam pauta não só científica/ambiental, mas política. Para Santos *et al*. (2022), análises históricas dos impactos climáticos juntos com estudos de previsões é o que possibilita o desenvolvimento de novas tecnologias para o crescimento sustentável da sociedade de forma segura nesses cenários de alto risco climático.

Neste contexto a viabilidade geográfica, como explica Brito *et al*. (2008), na escala de fatores que ditam a influência dos ventos possuem três como maior grau de impacto, a variação da velocidade com a altura, a rugosidade do terreno e a presença de obstáculos nas redondezas. O baixo custo de desenvolvimento comparado com outras fontes de energia, possibilita análise para aplicações futuras de estruturas de energia eólica, sendo a base desse estudo análise do vento para geração de energia. Diante disso, este trabalho visa contribuir com uma proposta de um modelo computacional para análise e determinação do ganho energético em potencial do vento, por meio de base de dados meteorológicos do INMET, sendo a na região do interior de Itajaí/SC como local deste estudo.

Material e Métodos

Este estudo utiliza um conjunto de dados de vento para Itajaí, Santa Catarina, obtido do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2026). Os dados provêm de uma estação meteorológica automática (A868) localizada a 26,9508° S e 48,7619° O, com medições realizadas a aproximadamente 10 metros acima do nível do solo. O conjunto de dados abrange o período de 24 de junho de 2010 a 31 de dezembro de 2025, com registros horários. De modo geral, a série temporal é robusta, apresentando lacunas significativas apenas em dois anos: 2020, com 82,7% de cobertura de dados, e 2021, sem registros disponíveis. Apesar de se basear em um conjunto de dados regional da bacia do rio Itajaí-Açu, o estudo foi concebido com uma perspectiva mais ampla. Seu principal objetivo é desenvolver uma abordagem computacional generalizada que possa ser adaptada e aplicada a diferentes regiões e contextos de pesquisa em todo o mundo.

Os dados foram exportados para uma planilha para processamento com base em quatro critérios principais: direção do vento, vento médio horário, intensidade e rajada de vento. Os dados inválidos, incluindo valores nulos e erros de medição, foram

excluídas da análise. Após a estruturação do conjunto de dados, a próxima etapa concentrou-se na avaliação da velocidade e da potência do vento em todos os setores direcionais. Todos os registros válidos foram consolidados em uma única planilha contendo informações horárias sobre direção, intensidade e valores filtrados. Com os dados devidamente organizados, a análise prosseguiu para avaliar a velocidade do vento e a distribuição da potência eólica correspondente em todas as direções. De acordo com Gu *et al*. (2023) e Huang *et al*. (2024), a Equação (01) expressa a potência eólica como uma função da velocidade do vento, da eficiência do sistema e da densidade do ar. Não faz parte do estudo a área varrida pelas pás.

$$P_{vento} = \frac{1}{2}\,\rho\,A\,v^3 \qquad (\rho = 1{,}225, kg/m^3) \qquad (01)$$

Onde:
P_{vento} = Potência disponível no vento [W]
ρ = Densidade do ar [kg/m³]
A = Area [m^2]
v = Velocidade do vento [m/s]

Com os dados organizados a pesquisa se inicia com o desenvolvimento de uma rosa dos ventos a fim de identificar direções predominantes para o local de estudo, também é realizado uma remodelagem dos dados de entrada onde a velocidade do vento é elevada ao cubo, para expressar graficamente a direção que possui um maior potencial energético. Após essas etapas será desenvolvido um histograma, em que este será associado/ajustado a uma curva de Weibull, que serão aplicados nos dados para auxiliar o cálculo numérico futuramente. A curva de Weibull é uma função de distribuição de probabilidade PDF (probability density function) que nesse momento é aplicado para representar oscilações da velocidade do vento em uma faixa de dados, os resultados são estimativas para futuras ocorrências de N velocidades, assim, rotular o regime de vento na região. Logo com a curva é possível a partir de dados discretizados gerar uma curva contínua. A equação que rege esta PDF é a Equação (02).

$$F(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \qquad (02)$$

Onde:
F(v) = Função densidade de probabilidade da velocidade do vento
v = Velocidade do vento [m/s]
k = Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
c = Parâmetro de escala da distribuição de Weibull [m/s]
e = Base do logaritmo natural (≈ 2,718)

Alinhando a Equação (01) e Equação (02) podemos descrever a potência em função da probabilidade da velocidade resultando na Equação (03).

$$\frac{1}{2}\,\rho\,A\,v^3 \cdot F(v) \qquad (03)$$

É válido ressaltar que o desenvolvimento do histograma é construído a partir da consideração de ventos em todas as direções com a exceção de ventos abaixo de 0,25m/s. Sendo assim, existe uma probabilidade de um certo vento estar neste escopo. Portanto, para o desenvolvimento posterior de produção é necessário que esta probabilidade seja levada em conta. Com a fundamentação estatística pronta é necessário embasar-se no estado da arte para definir velocidades de *Cut-In*: velocidade mínima de operação da turbina, *Cut-Out*: velocidade máxima de operação da turbina e eficiência total, deste modo segundo Serban, Paraschiv e Paraschiv *et al*. (2020) e Mohamed *et al*. (2012), temos o *Cut-in* médio aproximado de 2m/s *Cut-Out* de 20m/s.

Resultados e Discussão

Com os dados da série histórica para Itajaí/SC, da direção e intensidade foram elaboradas duas rosas dos ventos. Na Figura (01) demonstra as classes de vento médios históricos por velocidade, direção e intensidade, já a Figura (02) apresentamos a rosa dos ventos da potência disponível, onde a velocidade do vento foi elevada ao cubo.

A rosa dos ventos da Figura (01) revela um padrão direcional claro para região de estudo, com predominância de ventos provenientes dos quadrantes sul (S, SSW e SW). Em contraste, os ventos dos quadrantes nordeste (NE, NNE e ENE) apresentam maior intensidade, embora ocorram com menor frequência. Uma análise mais detalhada do setor nordeste (NE e ENE) mostra uma frequência relativamente significativa combinada com velocidades de vento moderadas, sugerindo um possível vantagem para a geração de energia eólica local. Enquanto isso, os demais quadrantes (norte, noroeste e sudeste) contribuem menos em termos de frequência e intensidade, tornando-os menos favoráveis para a exploração de energia eólica.

A Figura 2 representa a contribuição energética dos ventos por direção e velocidade média em Itajaí/SC, revelando um padrão distinto daquele observado na Figura 1. da rosa dos ventos da Figura (01). Embora os ventos provenientes dos quadrantes sul (S, SSW e SW) sejam os mais frequentes, aqueles originários do setor nordeste (NE e ENE) fornecem a maior contribuição energética. Apesar da menor frequência relativa, os ventos de nordeste estão mais frequentemente associados a velocidades mais

elevadas (6–10 m/s), o que resulta em uma contribuição energética significativamente maior em comparação com os ventos do sul, mais frequentes. Observa-se também que os ventos do setor sudoeste (WSW e SW) contribuem significativamente para o potencial energético total, embora sua contribuição total permaneça inferior à do setor nordeste. Em contrapartida, os demais quadrantes apresentam relevância limitada, tanto em termos de frequência quanto de contribuição energética. Contudo como esse estudo busca utilizar uma turbina eólica que possa utilizar ventos de todas as direções estas serão todas consideradas nas análises subsequentes.

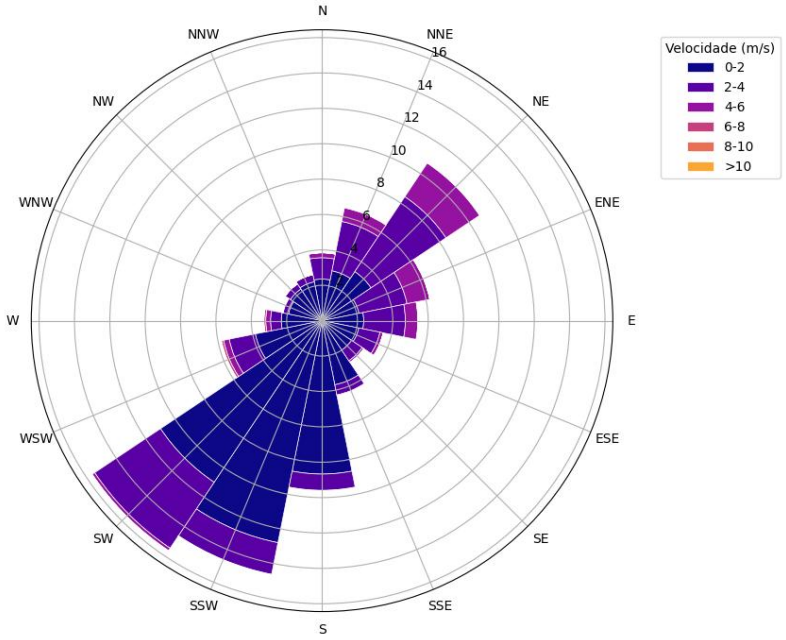


Figura 1: Rosa dos ventos por sequência por classe de velocidade
Fonte: Autores (2026)

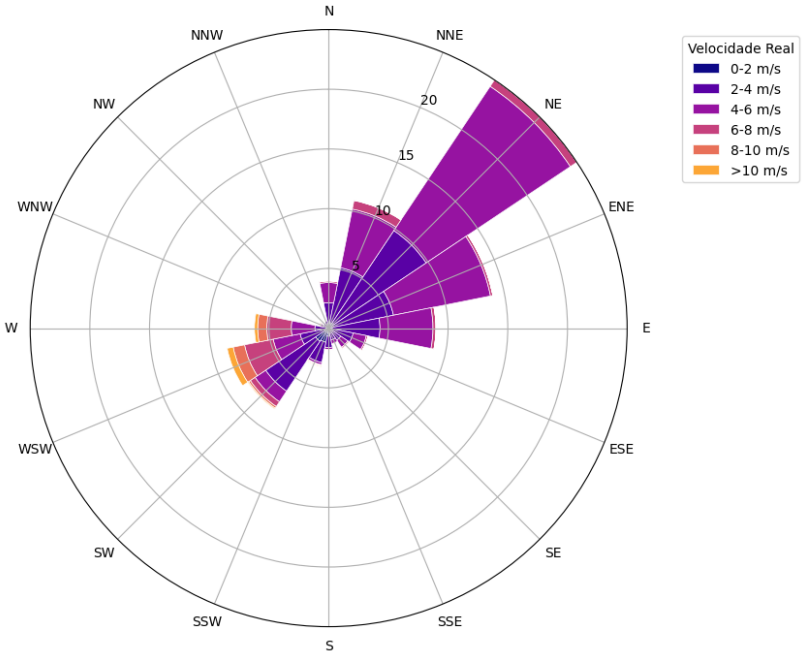


Figura 2: Rosa dos ventos por potência disponível
Fonte: Autores (2026)

Foi elaborada uma rosa dos ventos para rajadas de ventos, conforme apresentado na Figura (03), para geração de energia essa rosa de vento não possui contribuição significativa, visto que as rajadas de ventos acontecem em poucos segundos, contudo é valido estudar a direções que estas costumam acontecer se suas intensidades visto que sistemas de geração de energia ficam expostos diretamente a essas.

Observa-se que a rosa dos ventos de rajadas máximas para Itajaí/SC apresenta um padrão direcional bem definido de rajadas máximas para Itajaí/SC mostra um padrão direcional bem definido, com forte predominância do setor sul (S, SSW e SW),

particularmente SW, que apresenta a maior frequência relativa. As rajadas neste setor estão na faixa de 4 a 6 m/s, com ocorrências consistentes na classe de 6 a 8 m/s, indicando condições frequentes de carregamento moderado em estruturas expostas. Em contraste, o setor nordeste (NE e ENE), embora menos frequente, concentra as rajadas de maior intensidade, incluindo eventos nas faixas de 8 a 10 m/s, 10 a 12 m/s e >12 m/s. Outras correntes atmosféricas (N, NW, E e SE) apresentam baixa frequência e intensidade, indicando pouca relevância para o carregamento estrutural. De modo geral, tanto ventos moderados frequentes (setor sul) quanto rajadas extremas menos frequentes (setor nordeste) devem ser considerados na avaliação estrutural.

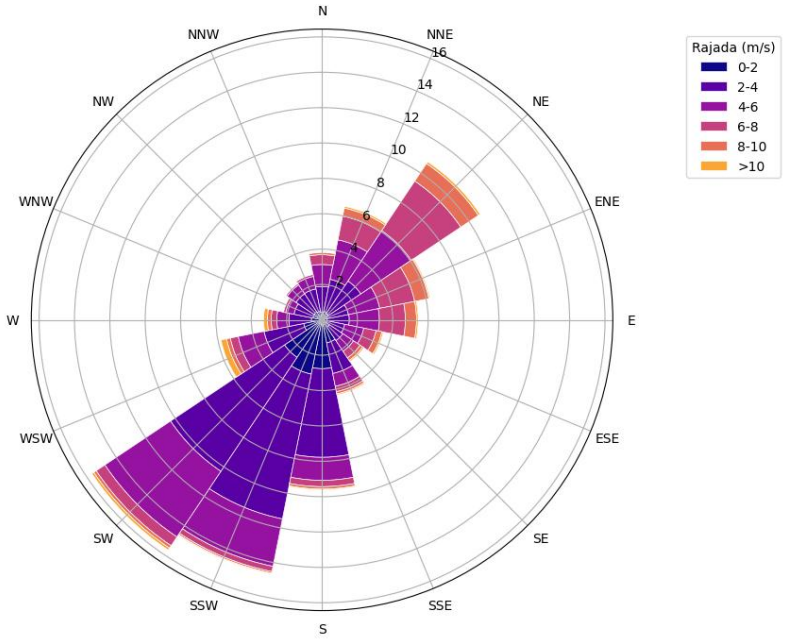


Figura 3: Rosa dos ventos das rajadas
Fonte: Autores (2026)

As rosas dos ventos são de grande importância para representação gráfica dos ventos, contudo para uma análise de forma quantitativa, foram utilizados os dados disponíveis para elaborar um histograma das velocidades médias em todas as direções. No entanto, para o regime de vento considerado neste estudo, o modelo de Weibull apresenta um ajuste inadequado para velocidades de vento iguais ou inferiores a 0,25 m/s (Wang et al., 2021), dado isso, todas as velocidades de vento abaixo de 0,25 m/s foram excluídas para melhorar a representação da curva de probabilidade usando a distribuição de Weibull padrão, amplamente aplicada em avaliações de viabilidade de energia eólica. Com esses ajustes, a probabilidade de um determinado evento de vento se enquadrar no grupo analisado é de 77,17%. O histograma e a curva de Weibull da velocidade horária do vento pode ser observada na Figura (04).

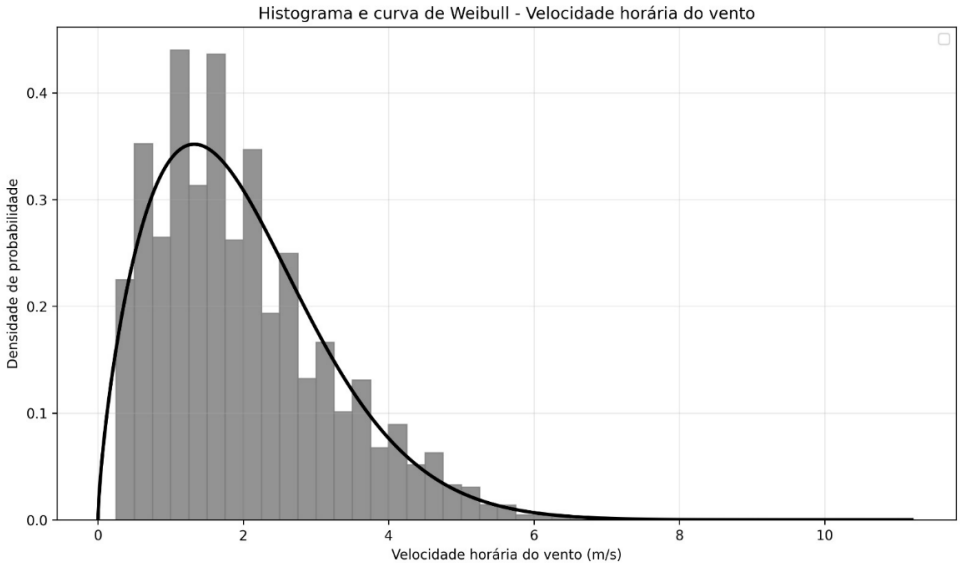


Figura 4: Histograma e curva de Weibull – velocidade média horária
Fonte: Autores (2026)

Fator determinante do artigo é o potencial de geração elétrica, portanto a curva de potencial é mais útil para o objetivo do estudo, a curva de frequência dos ventos médios nos indica a variabilidade que precisa ser levada em consideração em cenários reais. A combinação de informações da curva de Weibull pode ser acrescentada ao momento de dimensionamento das turbinas, principalmente pelo fator de previsão de cenários futuros, buscando o direcionamento do projeto sempre fundamentado na ideia de energia disponível levando em consideração os limites de velocidade e a eficiência do sistema. Como afirma Manwell, McGowan e Rogers *et al*. (2009). O vento possui energia cinética, e a energia efetiva é a parte dessa energia que pode ser extraída pela turbina, limitada pelo teorema de Betz e pelas condições operacionais. Neste estudo, assumiu-se uma eficiência média de 35% para converter a energia cinética disponível em potência elétrica efetiva. Adotou-se também uma velocidade de vento de entrada em operação de 2 m/s e uma velocidade de saída de 12,5 m/s, esta última correspondendo à velocidade máxima do vento registrada no conjunto de dados. Com base na função de potência, é possível integrar a curva dentro desses limites operacionais *Cut-In*: 2m/s e *Cut-Out*: 12,5m/s, assim é possível estimar a potência de saída efetiva do sistema de geração de energia. Assim, aplicou-se a Equação (4), combinando a curva de potência com a probabilidade de ocorrência de vento em cada direção e a eficiência geral, obtém-se a geração média de energia elétrica.

$$\int_{2}^{12,5} \frac{\rho * A * v^3}{2} * f(v)\, dv \qquad (04)$$

A Figura (05) apresenta as distribuições de Weibull para a velocidade média do vento e para o potencial energético. Essas curvas foram derivadas do mesmo conjunto de dados, embora processadas separadamente para representar suas respectivas características.

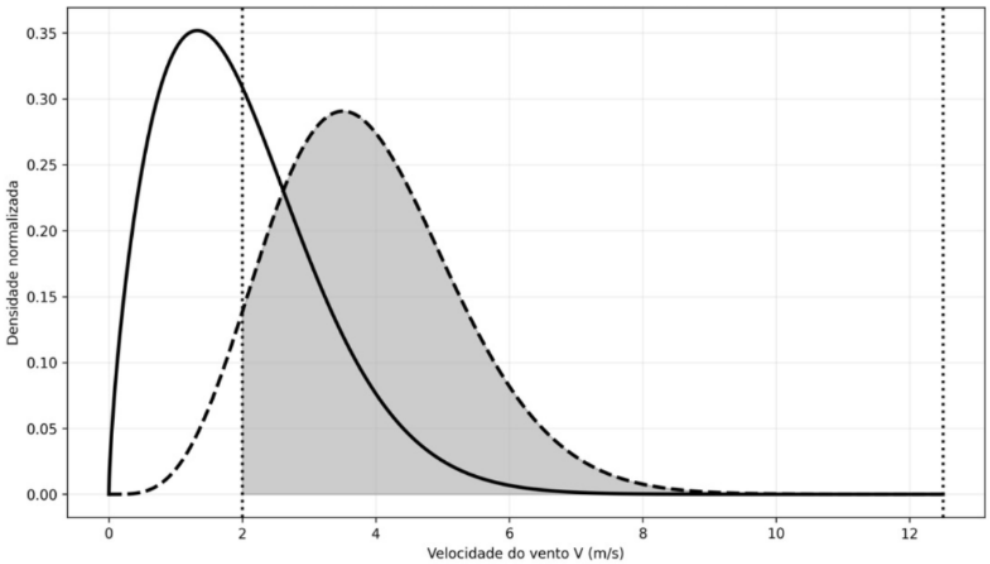


Figura 5: Weibull de velocidade X Distribuição Energética
Fonte: Autores (2026)

Os resultados indicam que a probabilidade de operação da turbina dentro da faixa definida (*Cut-In*: 2 m/s e *Cut-Out*: 12,5 m/s) é de 43,42%, enquanto a fração de energia disponível dentro desse mesmo intervalo atinge 92,54%. Isso destaca que, embora a turbina opere menos da metade do tempo, a maior parte da energia eólica está concentrada dentro da faixa operacional, reforçando a forte dependência da produção de energia em relação a velocidades de vento mais altas. É importante notar que essa estimativa considera inerentemente os períodos de não operação, incluindo condições de vento fraco (abaixo de 2m/s) e condições de vento forte (acima de 12,5m/s), também é desconsiderado as rajadas de ventos, visto que estas ocorrem em períodos muito curtos. Portanto, o valor resultante representa uma potência média de saída realista, considerando regimes eólicos produtivos e não produtivos. Dados esses resultados são possíveis selecionar uma turbina comercial de eixo vertical ou horizontal em que opere dentro das faixas consideradas nesse estudo e de acordo com o tamanho da turbina escolhida é possível quantificar a energia que a turbina será capaz de produzir.

Considerações Finais

Os resultados demonstram que, mesmo a janela de tempo de ventos favoráveis tendem a ser limitados, o potencial da fração de energia cinética é o que assegura a viabilidade, com sólidos 92,54%. As oportunidades de operação entre as fases de *Cut-in* e *Cut-out* de 43,42% deixa um caminho de oportunidades para trabalhar junto com o regime de ventos da região. Caminhos que foram criados a partir da aplicação de distribuição de Weibull, que define os comportamentos estatísticos da velocidade.

A análise das rajadas dos ventos não tem o intuito de determinar o potencial de energia, o estudo buscou saber a direção e intensidade que elas ocorrem para prever seus possíveis impactos sobre impactos sobre a estrutura e esforços sobre estas a instalação de uma futura turbina.

A redundância da viabilidade técnica indica, mesmo com cenário de uso reduzido, a grande eficiência energética. Segundo a literatura de Borges *et al*. (2006) e Araújo *et al*. (2019), o domínio da energia dentro da faixa operacional assegura a efetividade técnica para geração eólica. Logo, os resultados apresentados deixam de ser apenas promissores, e passam a ser respaldados por estudos anteriores. O método apresenta base para aplicação em diferentes regiões, colaborando para os futuros modelos de pesquisa eólica.

Referências Bibliográficas

BORGES, R. C. et al. Fundamentos de energia eólica e eficiência operativa. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

BRITO, R. P. et al. Análise de viabilidade geográfica para parques eólicos: rugosidade e obstáculos. [S. l.]: Editora Engenharia, 2008.

GU, Y. et al. A combined wind forecasting model based on SSA and WNN: application on real case of Ningbo Zhoushan Port. Journal of Marine Science and Engineering, v. 11, n. 9, p. 1636, 2023. https://doi.org/10.3390/jmse11091636

HUANG, C. et al. Research on wind turbine location and wind energy resource evaluation methodology in port scenarios. Sustainability, v. 16, p. 1074, 2024. https://doi.org/10.3390/su16031074.

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Dados históricos. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos. Acesso em: 15 jan. 2026

LEVIN, K. et al. Playing it forward: path dependency, active inertia, and the greenhouse gas emissions trajectory. Climate Policy, v. 9, n. 3, p. 285–300, 2009.

LIU, J. et al. Cumulative impacts of human activities on extreme meteorological events. Journal of Environmental Sciences, v. 40, n. 1, p. 12–25, 2025.

MANWELL, J. F.; McGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2. ed. Chichester: Wiley, 2009.

MOHAMED, M. H. et al. Optimization of a small wind turbine for low wind speed areas. Renewable Energy, v. 48, p. 476–485, 2012. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.044

SANTOS, A. L. et al. Crise climática e sistemas energéticos: análises históricas e previsões para o crescimento sustentável. Revista Brasileira de Energia, v. 28, n. 4, p. 102–120, 2022.

SERBAN, A.; PARASCHIV, L. S.; PARASCHIV, S. Assessment of wind energy potential based on Weibull and Rayleigh distribution models. Energy Reports, v. 6, p. 250–267, 2020. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.08.048

SILVA, J. R. et al. Modelagem matemática para conversão de energia eólica: análise de potência e velocidade. Rio de Janeiro: Editora Científica, 2022.

WANG, L.; LIU, J.; QIAN, F. Wind speed frequency distribution modeling and wind energy resource assessment based on polynomial regression model. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 130, p. 106964, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106964.

ECONOMIA CIRCULAR NAS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS: EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS DAS PRÁTICAS AMBIENTAIS

João Santana Alves
Universidade Federal Fluminense, e-mail: joaosantanaalves@id.uff.br

Palavras-chave: Economia circular; Práticas ambientais; Sustentabilidade ambiental.

Resumo

A economia circular consolidou-se como diretriz estratégica para reduzir impactos ambientais ao reorganizar os fluxos produtivos e o uso de recursos naturais nas organizações. No contexto brasileiro, as Micro e Pequenas Empresas (MPEs) exercem papel central na dinâmica econômica, ao mesmo tempo em que suas rotinas operacionais estão associadas ao consumo intensivo de recursos, à geração de resíduos e às emissões ambientais. Mesmo com os avanços normativos, das exigências legais e pela competitividade, persistem dificuldades na estruturação e na avaliação sistemática das práticas ambientais nesse segmento empresarial. O objetivo deste estudo é analisar como as MPEs estruturam práticas ambientais voltadas à implementação da economia circular, com foco na redução dos impactos ambientais associados às suas atividades. Trata-se de uma pesquisa empírica, descritiva e quantitativa, desenvolvida por meio de *survey* on-line aplicado a 225 MPEs de diferentes setores e regiões do Brasil. O instrumento de coleta consistiu em um questionário estruturado com dez questões alinhadas a referenciais normativos internacionais e a diretrizes de sustentabilidade ambiental. A análise dos dados foi conduzida por estatística descritiva, compatível com a natureza ordinal da escala de mensuração. Os resultados evidenciam avanços moderados na adoção de práticas ambientais, com maior consolidação de ações operacionais voltadas ao controle de impactos diretos. Enquanto dimensões estratégicas, como governança ambiental, cadeia de valor e conservação da biodiversidade, permanecem menos estruturadas. O estudo contribui ao oferecer evidências empíricas e um instrumento de diagnóstico aplicável ao contexto real das MPEs, com implicações para o aprimoramento da gestão ambiental e para o avanço da economia circular.

Introdução

A economia circular orienta a reorganização dos fluxos produtivos e do uso de recursos naturais nas organizações. (Elkington, 2012; OECD, 2021). Nesse sentido, sua finalidade central é eliminar desperdícios, manter produtos e materiais em uso contínuo e regenerar sistemas naturais (OECD, 2021; ONU, 2023). Para viabilizar essa transição, a *International Organization for Standardization* (ISO), consolidou princípios e diretrizes que estruturam as práticas ambientais voltadas à circularidade. (ISO, 2017; ABNT, 2023). Além disso, normas como a ISO 14001, a ISO 14031 e a família ISO 59000 enfatizam a prevenção da poluição, a eficiência no uso de recursos e a avaliação do desempenho ambiental. (ABNT, 2015; ABNT, 2020; ISO, 2017). Dessa forma, a economia circular é compreendida como um processo de gestão estratégica orientado ao uso contínuo dos recursos, reduzindo custos operacionais, aumentando a competitividade e minimizando o impacto ambiental (OECD, 2021; ISO, 2017).

No plano jurídico, a pratica do uso contínuo dos recursos ambientais é reforçada por dispositivos legais que atribuem às organizações o dever de prevenir e mitigar os impactos ambientais (Brasil, 1988; Brasil, 2010). Nesse contexto, o art. 225 da Constituição Federal estabelece a proteção ao meio ambiente como princípio estruturante das atividades econômicas (Brasil, 1988). Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos institui a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos e a gestão adequada dos resíduos (Brasil, 2010). De forma convergente, o Projeto de Lei nº 1.874/2022 consolida diretrizes associadas à economia circular, reforçando a redução de resíduos e a eficiência no uso de recursos naturais (Brasil, 2022). Assim, ao reconhecer que essas exigências se aplicam a qualquer tipo de organização, torna-se necessário analisar como elas se manifestam no contexto das Micro e Pequenas Empresas (OECD, 2021; SEBRAE, 2023).

Referente a competitividade organizacional, a economia circular é orientada por finalidades que articulam sustentabilidade ambiental, eficiência produtiva (Elkington, 2012; OECD, 2021). Nesse sentido, a redução da poluição, do uso de recursos finitos e das emissões de carbono contribui para o enfrentamento das mudanças climáticas e da perda de biodiversidade (ONU, 2023; OECD, 2021). Além disso, a transformação de resíduos em insumos produtivos promove eficiência no uso de recursos e redução de desperdícios ao longo da cadeia (Barbieri, 2022; Sáez-Martínez et al., 2020). Do ponto de vista estratégico, práticas circulares favorecem vantagem competitiva, redução de custos operacionais e diferenciação por produtos duráveis e reparáveis. (Elkington, 2012; Lewis et al., 2015; Sachs, 2009). Assim, ao fomentar inovação e novos modelos de negócio, a economia circular reforça sua relevância como diretriz de gestão também no contexto das MPEs (OECD, 2021; Barbieri, 2022).

Em termos operacionais, a economia circular pode ser observada por práticas associadas ao uso racional de energia e água, à segregação de resíduos e ao controle de emissões (Costa, 2017; Barbieri, 2022; Sáez-Martínez et al., 2020; ABNT, 2015). De modo complementar, a incorporação de critérios ambientais em compras e insumos amplia a circularidade para a cadeia de valor (Sachs, 2009; Lewis et al., 2015). Adicionalmente, ações de conscientização e aprendizagem institucional influenciam a continuidade dessas práticas no cotidiano organizacional (Jovanovic et al., 2017; Veronica et al., 2020). Essas dimensões permitem operacionalizar empiricamente a circularidade e avaliar seu grau de estruturação nas organizações (Hair Jr. et al., 2009; Marôco, 2014). Dessa forma, tais práticas constituem a base empírica para analisar a efetividade da economia circular nas MPEs. (OECD, 2021).

No Brasil, as Micro e Pequenas Empresas (MPEs) representam mais de 90% do tecido empresarial e exercem papel central na dinâmica econômica (SEBRAE, 2023; OECD, 2021). Entretanto, suas rotinas produtivas também estão associadas ao

consumo intensivo de energia e água, bem como à geração de resíduos e emissões (ABNT, 2015; Barbieri, 2022). Nesse cenário, a economia circular emerge como abordagem capaz de articular desempenho econômico e responsabilidade ambiental nesse segmento. (OECD, 2021; Elkington, 2012). Todavia, a implementação ocorre de forma gradual, condicionada por limitações operacionais, gerenciais e institucionais típicas das MPEs (OECD, 2021.) Assim, compreender como práticas ambientais são estruturadas nessas organizações torna-se essencial para interpretar trajetórias reais de transição à circularidade (ONU, 2023; OECD, 2021).

Apesar dos avanços normativos, das exigências legais e pela competitividade, a implementação da economia circular nas MPEs tende a ocorrer de forma fragmentada (Lewis et al., 2015; Sachs, 2009). Nesse contexto, práticas operacionais mostram-se mais difundidas do que dimensões estratégicas, como governança ambiental, cadeia de suprimentos e políticas internas (Hatmanu et al., 2019; Valdez-Juárez et al., 2019). Essa assimetria também se expressa na baixa internalização de práticas voltadas à conservação da biodiversidade, associadas ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS15) – Vida Terrestre (Vidal; Santos, 2022; Rabadán; Sáez-Martínez, 2017; ONU, 2023). Além disso, restrições operacionais, gerenciais e institucionais típicas das MPEs limitam a coordenação e a efetividade dessas práticas (OECD, 2021; SEBRAE, 2023). Dessa forma, permanece insuficientemente esclarecido como as MPEs estruturam práticas ambientais alinhadas à economia circular, configurando a lacuna empírica deste estudo (OECD, 2021; ONU, 2023).

Diante dessa lacuna, coloca-se a seguinte questão de pesquisa: como as MPEs estruturam as práticas ambientais voltadas à implementação da economia circular, considerando suas limitações operacionais, gerenciais e institucionais? (OECD, 2021; ONU, 2023). Assim, o objetivo geral deste estudo é analisar como as MPEs estruturam práticas ambientais voltadas à implementação da economia circular, com foco na redução dos impactos ambientais associados às suas atividades. Esse objetivo é operacionalizado por meio da análise de práticas mensuráveis presentes no cotidiano organizacional das MPEs (ABNT, 2015; Barbieri, 2022). A investigação é coerente com o uso de indicadores e avaliação de desempenho ambiental como suporte à melhoria contínua (ABNT, 2015; ISO, 2017). Na sequência, apresenta-se o delineamento metodológico adotado para responder à questão proposta. (Hair Jr. et al., 2009; Gil, 2019)).

Material e Métodos

A pesquisa possui natureza empírica, descritiva e quantitativa, delineada para compreender em que medida e de que forma as MPEs internalizam práticas ambientais alinhadas às diretrizes ISO e à agenda dos ODS como mecanismos de operacionalização da economia circular. Trata-se de um estudo aplicado, orientado à mensuração de comportamentos ambientais reais no contexto organizacional brasileiro, a partir de coleta sistemática de dados primários. Esse delineamento mostrou-se adequado em examinar como as MPEs estruturam práticas ambientais voltadas à implementação da economia circular, com foco na redução dos impactos ambientais associados às suas atividades. Pois permite identificar padrões de práticas ambientais sem interferir no ambiente observado. Conforme indicado por Gil (2019), Zanella (2013) e Godoy (2005), pesquisas descritivas são apropriadas para captar regularidades empíricas em contextos organizacionais reais. Assim, a abordagem adotada assegura coerência entre o objetivo analítico do estudo e o método empregado.

O instrumento de pesquisa consistiu em um questionário estruturado, elaborado com base nas diretrizes da ISO 14001, ISO 14031, ISO 26000 e nos ODS, priorizando clareza, objetividade e linguagem acessível, conforme recomendações normativas para instrumentos de avaliação ambiental. Foram selecionadas dez questões (Q1–Q10) diretamente relacionadas ao uso de recursos naturais, emissões, resíduos, governança e biodiversidade, aspectos considerados prioritários segundo a ISO 14001 e a ISO 14031. A construção metodológica seguiu orientações de Hair et al. (2009), Marôco (2014), Barbieri (2022), Mansour et al. (2021) e Falqi et al. (2020), que enfatizam o uso de indicadores objetivos e operacionalizáveis em pesquisas ambientais. As dimensões avaliadas, os referenciais normativos associados e os autores de fundamentação teórica encontram-se sistematizados no Quadro 1, que apresenta a estrutura final do instrumento utilizado no estudo. Dessa forma, o questionário permite operacionalizar empiricamente a economia circular por meio de práticas ambientais observáveis nas MPEs..

Nº	Dimensão avaliada	Normas ISO e ODS relacionados	Autores que fundamentam a dimensão
Q1	Resíduos gerados e segregação	Prevenção da poluição; gestão de resíduos. ISO 14001; ISO 14031. ODS 12.	Sáez-Martínez et al. (2020); Stekelorum et al. (2020); Martins et al. (2022); Mansour et al. (2021).
Q2	Emissões atmosféricas	Controle de emissões; prevenção da poluição. ISO 14001; ISO 14031. ODS 12 e 13.	Bashar et al. (2023); Mansour et al. (2021); Calisto et al. (2021); Chen et al. (2023).
Q3	Uso racional de energia	Eficiência energética; uso sustentável de recursos. ISO 14001; ISO 14031. ODS 7, 12 e 13.	Calisto et al. (2021); Nguyen e Tran (2020); Yu et al. (2023).
Q4	Uso racional de água	Ecoeficiência; gestão de recursos hídricos. ISO 14031; ISO 14001. ODS 6 e 12.	Costa (2017); Barbieri (2022); OECD (2021).
Q5	Compras sustentáveis e insumos	Consumo e produção responsáveis; cadeia de valor. ISO 26000; ISO 14001. ODS 12.	Sachs (2009); Lewis et al. (2015); OECD (2021).

Q6	Conscientização socioambiental	Educação ambiental; aprendizagem institucional. ISO 14004; ISO 26000. ODS 12 e 13.	Jovanovic et al. (2017); Veronica et al. (2020); Barbieri (2022); Freeman et al. (2021).
Q7	Governança e políticas ambientais	Estrutura de gestão; responsabilidade social. ISO 14001; ISO 26000; ABNT PR 2030. ODS 12, 13 e 15.	Hatmanu et al. (2019); Valdez-Juárez et al. (2019); Barbieri (2022); Freeman et al. (2021).
Q8	Emissões de gases de efeito estufa (GEE)	Mitigação climática; emissões diretas e indiretas. ISO 14001; ISO 14031. ODS 13.	Bashar et al. (2023); OECD (2021); ONU (2023).
Q9	Ações de economia circular	Redução de resíduos; reutilização; prevenção da poluição. ISO 14001; ISO 14031. ODS 12.	Sáez-Martínez et al. (2020); Stekelorum et al. (2020); Calisto et al. (2021); Martins et al. (2022).
Q10	Biodiversidade	Conservação de ecossistemas; responsabilidade socioambiental. ISO 26000. ODS 15.	Vidal e Santos (2022); Rabadán e Sáez-Martínez (2017).

Quadro 1: Instrumento de Avaliação das Práticas Ambientais
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A coleta de dados ocorreu por meio de survey on-line, aplicado entre abril e junho de 2025, reunindo respostas de 225 Micro e Pequenas Empresas distribuídas entre diferentes setores econômicos, portes e regiões do país. As empresas participantes foram selecionadas por critérios de acessibilidade e voluntariedade, sendo incluídas aquelas classificadas como MPEs e com atuação produtiva regular no período da coleta. Foram adotados procedimentos éticos, assegurando anonimato e confidencialidade das informações fornecidas. A diversidade organizacional da amostra foi considerada relevante para captar diferentes níveis de percepção e estruturação das práticas ambientais, influenciados por fatores culturais, setoriais e operacionais. Essa estratégia está alinhada às orientações do SEBRAE (2023) e às recomendações da OECD (2021) e da ONU (2023), que destacam o papel das MPEs na transição ambiental.

Procedimentos de análise, validade e confiabilidade

Os dados foram analisados considerando a natureza ordinal da escala Likert utilizada no instrumento, sendo adotadas medidas de mediana e intervalo interquartílico (IQR) para representar tendência central e dispersão das respostas. A opção pela estatística descritiva é coerente com as recomendações metodológicas de Hair et al. (2009) e Marôco (2014), ao evitar distorções associadas ao uso da média em dados ordinais e impedir inferências causais indevidas. Os procedimentos estatísticos foram executados no software RStudio (versão 2025.09.2+418), com apoio dos pacotes psych, likert e ggplot2. A confiabilidade do instrumento foi avaliada por meio do coeficiente alfa de Cronbach, assegurando consistência interna das questões (Cronbach, 1951; Hair et al., 2009; Marôco, 2014). Adicionalmente, a validade foi considerada sob a perspectiva do critério, a partir da convergência entre os itens do instrumento e referenciais normativos externos, garantindo coerência teórica e integridade metodológica, mesmo reconhecendo as limitações inerentes a estudos descritivos e transversais.

Resultados e Discussão

Esta seção apresenta e discute os resultados empíricos do estudo, articulando diretamente para analisar como as MPEs estruturam práticas ambientais voltadas à implementação da economia circular, com foco na redução dos impactos ambientais associados às suas atividades. A análise baseia-se na estatística descritiva aplicada às dez questões do instrumento (Q1–Q10), considerando a natureza ordinal da escala *Likert* e o uso da mediana (Md) e do intervalo interquartílico (IQR). Os resultados são apresentados na Tabela 1, a partir da qual se examina como asMPEs estruturam práticas ambientais associadas à economia circular. A discussão interpreta padrões de maior e menor consolidação das práticas, evidenciando assimetrias entre dimensões operacionais e estratégicas. Dessa forma, os achados empíricos são analisados como resposta direta, como as MPEs estruturam práticas ambientais alinhadas à economia circular, identificada na literatura.

De modo geral, os resultados indicam níveis diferenciados de estruturação das práticas ambientais nas MPEs analisadas. A Tabela 1 evidencia maior aderência em Q2 – emissões atmosféricas (Md = 4,0; IQR = 1,0; 77,3%), Q8 – emissões de gases de efeito estufa (Md = 4,0; IQR = 1,0; 73,8%) e Q6 – conscientização socioambiental (Md = 4,0; IQR = 2,0; 72,0%). Em contraste, Q10 – biodiversidade (Md = 2,0; IQR = 3,0; 42,5%), Q7 – governança ambiental (Md = 3,0; IQR = 2,5; 54,7%) e Q5 – compras sustentáveis (Md = 3,0; IQR = 2,5; 58,7%) apresentaram menor consolidação. A dispersão elevada observada em algumas dimensões indica heterogeneidade entre as MPEs. Esse padrão inicial revela assimetria entre práticas operacionais e estratégicas, orientando a discussão detalhada a seguir.

As práticas associadas à prevenção da poluição destacaram-se como as mais consolidadas entre as MPEs. Em Q2 – emissões atmosféricas, observou-se Md = 4,0, IQR = 1,0 e 77,3% de aderência, enquanto Q8 – emissões de GEE apresentou Md = 4,0, IQR = 1,0 e 73,8% de aderência (Tabela 1). Esses resultados indicam priorização de práticas diretamente vinculadas à conformidade legal e regulatória. Tal comportamento está alinhado às diretrizes da ISO 14001 e da ISO 14031, bem como ao foco do PL nº 1.874/2022 na mitigação de impactos ambientais. Evidências semelhantes são reportadas por Calisto et al. (2021) e Chen et al. (2023), ao apontarem que pressões institucionais orientam decisões ambientais mais imediatas em MPEs..

Item	Prática ambiental avaliada	Mediana	IQR	% de aderência*
Q1	Resíduos gerados e segregação	3,0	1,0	68,4
Q2	Emissões atmosféricas / prevenção da poluição	4,0	1,0	77,3
Q3	Uso racional de energia	3,0	1,0	66,2
Q4	Uso racional de água	3,0	1,0	64,0
Q5	Compras sustentáveis e insumos	3,0	2,5	58,7
Q6	Conscientização socioambiental	4,0	2,0	72,0
Q7	Governança e políticas ambientais	3,0	2,5	54,7
Q8	Emissões de gases de efeito estufa (GEE)	4,0	1,0	73,8
Q9	Ações de economia circular	3,0	1,0	61,0
Q10	Biodiversidade	2,0	3,0	42,5

Tabela 1: Estatísticas descritivas das práticas ambientais.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As práticas relacionadas à ecoeficiência apresentaram níveis intermediários de consolidação. Em Q1 – resíduos gerados e segregação, a mediana foi 3,0, com IQR = 1,0 e 68,4% de aderência. Resultados semelhantes foram observados em Q3 – uso racional de energia (Md = 3,0; IQR = 1,0; 66,2%) e Q4 – uso racional de água (Md = 3,0; IQR = 1,0; 64,0). Esses achados sugerem adoção incremental de práticas voltadas à economia circular. A literatura aponta que resíduos, energia e água constituem portas de entrada da circularidade em pequenas empresas, por exigirem menor complexidade estrutural (Costa, 2017; Barbieri, 2022; Sáez-Martínez et al., 2020). Assim, os resultados empíricos corroboram o caráter gradual da transição ambiental nas MPEs.

A dimensão Q5 – compras sustentáveis e insumos apresentou Md = 3,0, IQR = 2,5 e 58,7% de aderência, indicando maior dispersão e menor estabilidade das respostas. Esse resultado evidencia fragilidades na incorporação de critérios ambientais na cadeia de suprimentos. Segundo Sachs (2009) e Lewis et al. (2015), práticas dessa natureza dependem de mecanismos formais de coordenação e governança. A baixa consolidação observada contrasta com as diretrizes da ISO 26000 e com o princípio da responsabilidade compartilhada previsto no PL nº 1.874/2022. Dessa forma, os achados reforçam a dificuldade das MPEs em avançar da esfera operacional para a gestão integrada da cadeia de valor.

A conscientização socioambiental (Q6) apresentou Md = 4,0, IQR = 2,0 e 72,0% de aderência, superando a governança ambiental (Q7), que registrou Md = 3,0, IQR = 2,5 e 54,7%. Esse contraste revela assimetria entre aprendizagem organizacional e institucionalização das práticas. Enquanto ações educativas são relativamente difundidas, políticas ambientais formais e estruturas decisórias permanecem pouco consolidadas. Tal padrão confirma evidências de que a ausência de governança limita o amadurecimento ambiental nas MPEs (Hatmanu et al., 2019; Valdez-Juárez et al., 2019). As diretrizes da ISO 26000 e da ABNT PR 2030 reforçam que governança é condição para a continuidade das práticas ambientais.

As ações diretamente associadas à economia circular (Q9) apresentaram Md = 3,0, IQR = 1,0 e 61,0% de aderência. Esse resultado indica presença moderada de práticas como redução de resíduos e reutilização de materiais. Estudos anteriores apontam que tais ações tendem a emergir após a consolidação de práticas básicas de controle ambiental (Sáez-Martínez et al., 2020; Calisto et al., 2021). Assim, o posicionamento intermediário de Q9 reforça a interpretação de que a circularidade ainda é parcialmente operacionalizada nas MPEs. O achado dialoga com a literatura que descreve a economia circular como processo progressivo, e não como mudança abrupta.

Biodiversidade e limites da internalização (Q10)

A biodiversidade (Q10) apresentou o menor nível de aderência, com Md = 2,0, IQR = 3,0 e apenas 42,5% de concordância. Esse resultado evidencia dificuldades significativas das MPEs em internalizar práticas de conservação ambiental. A literatura aponta que a biodiversidade é frequentemente negligenciada em pequenas empresas por demandar visão sistêmica e planejamento de longo prazo (Vidal; Santos, 2022; Rabadán; Sáez-Martínez, 2017). O distanciamento observado contrasta com a ISO 26000, com o ODS 15 – Vida Terrestre e com os princípios sistêmicos da economia circular. Dessa forma, a evidência empírica confirma lacunas recorrentes apontadas na literatura.

De forma integrada, os resultados indicam que as MPEs apresentam maior maturidade em práticas operacionais de curto prazo e menor consolidação em governança, cadeia de valor e biodiversidade. Esse padrão responde diretamente à pergunta de pesquisa ao demonstrar que a estruturação das práticas ambientais ocorre de maneira gradual e assimétrica. Os achados confirmam a lacuna teórica identificada, ao evidenciar limites na internalização estratégica da economia circular sob restrições típicas das MPEs. Ao mesmo tempo, os resultados corroboram a adequação dos referenciais normativos internacionais e nacionais como instrumentos de transição. Assim, a evidência empírica sustenta a relevância do instrumento aplicado e prepara a análise conclusiva sobre implicações gerenciais e contribuições do estudo.

Comentários finais

O objetivo geral deste estudo foi analisar como as MPEs estruturam práticas ambientais voltadas à implementação da economia circular, com foco na redução dos impactos ambientais associados às suas atividades. O objetivo foi alcançado ao mapear, de forma sistemática, o grau de estruturação de práticas ambientais mensuráveis no cotidiano das empresas investigadas. Os resultados permitiram sintetizar padrões consistentes de adoção e dispersão das práticas, respeitando o delineamento

descritivo do estudo. O escopo analítico foi suficiente para evidenciar diferenças entre dimensões operacionais e dimensões estratégicas da economia circular.

O estudo revelou que as MPEs estruturam práticas ambientais voltadas à economia circular de maneira gradual e assimétrica, priorizando rotinas operacionais em detrimento de dimensões estratégicas. Esse padrão mostrou que ações ligadas ao controle de impactos diretos e à sensibilização interna tendem a apresentar maior consolidação do que governança, cadeia de valor e biodiversidade. Em termos práticos, a economia circular aparece primeiro como prática operacional, antes de se estabilizar como diretriz de gestão integrada. Dessa forma, a pergunta de pesquisa é respondida ao demonstrar que a estruturação das práticas é condicionada por limitações operacionais, gerenciais e institucionais típicas das MPEs. A partir desse achado central, destacam-se as contribuições efetivas do estudo.

A principal contribuição deste estudo é oferecer um instrumento estruturado e aplicável para diagnosticar o estágio inicial de práticas ambientais em MPEs no contexto real de gestão. Esse diagnóstico permite que a empresa realize uma avaliação de partida, identificando quais dimensões já estão minimamente consolidadas e quais permanecem incipientes para orientar um processo de implementação e sistematização da gestão ambiental. Além disso, o instrumento fornece uma base objetiva para organizar prioridades de melhoria, reduzindo incertezas típicas do início da jornada de transição para a economia circular. Em termos acadêmicos, o estudo contribui ao operacionalizar empiricamente práticas alinhadas a referenciais normativos e a dimensões-chave do cotidiano produtivo das MPEs.

Este estudo apresenta limitações inerentes ao desenho descritivo e transversal, que permite mapear padrões de estruturação, mas não permite inferir relações causais, além de reunir MPEs de diferentes setores e regiões, o que amplia diversidade e heterogeneidade e recomenda cautela na generalização. As medidas baseiam-se em autorrelato, podendo refletir percepções situadas no período de coleta e variações de interpretação, de modo que os achados devem ser lidos como diagnóstico de estruturação das práticas, e não como evidência de maturidade comparativa completa. A partir dessas delimitações, pesquisas futuras podem ampliar a aplicação do instrumento em outros recortes setoriais e em diferentes contextos nacionais, realizar estudos longitudinais para acompanhar a evolução das práticas e empregar desenhos comparativos para aprofundar como governança, cadeia de valor e biodiversidade se integram progressivamente à economia circular, além de combinar métodos para reduzir limitações de autorrelato e aumentar robustez interpretativa.

Referências Bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14001:2015 — Sistemas de gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14031:2015 — Gestão ambiental — Avaliação do desempenho ambiental — Diretrizes.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 26000:2010 — Diretrizes sobre responsabilidade social.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 59000:2020 — Economia circular — Terminologia, princípios e diretrizes.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT PR 2030:2021 — Práticas ESG — Diretrizes para organizações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BARBIERI, José Carlos. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos.** 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2022.

BASHAR, S.; WANG, D. P.; RAFIQ, M. **CSR's impact on labor and environmental issues in SMEs.** 2023.

BRAMMER, Stephen. **Corporate responsibility and sustainable development.** 2018.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 1.874, de 2022. Institui a Política Nacional de Economia Circular.** Brasília, DF: Senado Federal, 2022.

CALISTO, Maria L.; UMBELINO, J.; GONÇALVES, A.; VIEGAS, C. **Environmental sustainability strategies for smaller companies.** 2021.

CASSELLS, Suzanne; LEWIS, Kate. **SMEs and environmental responsibility: a policy perspective.** 2017.

CHEN, Lin et al. **Environmental responsibility and sustainable performance in SMEs.** 2022.

CHEN, Shuang et al. **Corporate environmental responsibility and competitiveness.** 2023.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Economia circular: diretrizes e oportunidades para a indústria brasileira.** Brasília: CNI, 2021.

COSTA, Ricardo. **Sustentabilidade ambiental: instrumentos de gestão e indicadores.** São Paulo: Atlas, 2017.

ELKINGTON, John. **Cannibals with Forks: the triple bottom line of 21st century business.** Oxford: Capstone, 2012.

FALQI, Ibrahim; ALSULAMY, Saud; MANSOUR, Mohammed. **Environmental performance evaluation using ISO 14031.** 2020.

FREEMAN, R. Edward et al. **Stakeholder theory: the state of the art.** Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

GAO, Lin; YANG, Fang. **Institutional pressures and environmental responsibility practices of SMEs.** 2022.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GODOY, Arilda Schmidt. **Introdução à pesquisa em administração.** São Paulo: Pioneira, 2005.

HAIR Jr., Joseph; ANDERSON, Rolph; TATHAM, Ronald; BLACK, William. **Análise multivariada de dados.** Porto Alegre: Bookman, 2009.

HATMANU, Marcel; SANDU, Claudia B.; JABA, Elisabeta. **Drivers for corporate environmental responsibility in EU SMEs.** 2019.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14001:2015 — Environmental management systems — Requirements with guidance for use.** Geneva: ISO, 2017.

JOVANOVIC, A. et al. **Environmental awareness and learning in SMEs.** 2017.

LEWIS, Kate; CASSELLS, Suzanne; ROXAS, Henry. **Collaborative paths to environmental responsibility among SMEs.** 2015.

MANSOUR, Mohammed; ALSULAMY, Saud; DAWOOD, Salah. **Prediction of implementing ISO 14031 guidelines.** 2021.

MARÔCO, João. **Análise estatística com o SPSS Statistics.** 7. ed. Lisboa: ReportNumber, 2014.

MARTINS, Filipe et al. **Circular economy practices in SMEs.** 2022.

NGUYEN, Phuong; TRAN, Khoa. **Energy-saving intentions among SMEs.** 2020.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Environmental performance review 2021.** Paris: OECD Publishing, 2021.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 2023.** Nova Iorque: ONU, 2023.

RABADÁN, Alejandro; SÁEZ-MARTÍNEZ, Francisco. **Biodiversity and environmental responsibility in SMEs.** 2017.

SÁEZ-MARTÍNEZ, Francisco et al. **Circular economy practices and competitiveness in SMEs.** 2020.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SCHEIN, Edgar H. **Organizational culture and leadership.** 4. ed. San Francisco: Jossey-Bass, 2010.

SEBRAE – SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Compras sustentáveis e cadeias de valor nas MPEs.** Brasília: SEBRAE, 2021.

SEBRAE – SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Panorama das Micro e Pequenas Empresas no Brasil.** Brasília: SEBRAE, 2023.

STEKELORUM, Ralf; LAGUIR, Issam; ELBAZ, Jamal. **SME environmental responsibility and supply chain impacts.** 2020.

VALDEZ-JUÁREZ, Luis; GALLARDO-VÁZQUEZ, Dolores; RAMOS-ESCOBAR, Esteban. **Organizational learning and CSR drivers in SMEs.** 2019.

VERONICA, M. et al. **Environmental education and organizational learning.** 2020.

VIDAL, Ana; SANTOS, Rodrigo. **Biodiversity and environmental practices in small firms.** 2022.

YU, Hao; CAO, Y.; SHI, L. **Energy efficiency and environmental practices in SMEs.** 2023.

ZANELLA, Liane Carly Hermes. **Metodologia da pesquisa.** Florianópolis: UFSC, 2013.

O PROGRAMA PRODUTOR DE ÁGUA DO RIO VERMELHO – PAGAMENTO POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM SÃO BENTO DO SUL - SC

1 Marco Rodrigo Redlich, 2 Prof. Dr. Virginia Grace Barros

1 Universidade Estadual de Santa Catarina - UDESC, Aluno do Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - Profágua, e-mail:marcoredlich@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Santa Catarina - UDESC, e-mail: virginia.barros@udesc.br

Palavras-chave: pagamento por serviços ambientais, preservação ambiental, conservação.

Resumo

No Brasil, o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) evoluiu de pequenas ações locais para uma política pública centralizada pela Lei nº 14.119/2021, aplicando o princípio do "protetor-recebedor" para remunerar a preservação de serviços ecossistêmicos. O município de São Bento do Sul (SC) possui o Programa Produtor de Água do Rio Vermelho, que oferece subsídios a proprietários rurais para proteger o manancial de abastecimento hídrico. A Lei Municipal nº 2.677/2010 de São Bento do Sul instituiu o Programa, visando proteger o manancial da cidade, com adesão voluntária de proprietários rurais que implementam práticas conservacionistas em troca de retribuição financeira baseada no custo de oportunidade e na entrega de serviços ambientais. O trabalho desenvolvido foi baseado em levantamento documental de natureza qualitativa e descritiva, adotando o procedimento técnico de estudo de caso, com análise de legislações pertinentes e desafios enfrentados. Como resultado apresentado, verificou-se que o Programa demonstra avanços na relação entre produtores participantes, órgãos envolvidos e comunidade beneficiada. Parcerias foram realizadas e levantamentos detalhados da microbacia na qual se desenvolve o pagamento foram apresentados e possibilitaram a realização de um planejamento estratégico de ações prioritárias no sentido de aprimorar a proteção ambiental na região, objetivo principal das ações. O pagamento é financiado por uma fração da tarifa de água dos consumidores e a gestão do programa é realizada pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto – SAMAE. Além disso é apresentada relação entre dificuldades enfrentadas na implementação do programa e quais ações foram tomadas, auxiliando assim na possibilidade de replicação da experiência em outros locais.

Introdução

Com a promulgação da Política Nacional de Pagamentos por Serviços Ambientais, Lei Federal nº 14.119/2021 de 13 de janeiro de 2021 (Brasil, 2021), o Brasil deu um passo importante para a implantação de incentivos para a conservação. O PSA deixa de ser uma iniciativa isolada para se tornar um instrumento central de política pública, com objetivos direcionados à preservação ambiental e ao incentivo remunerado de ações e serviços prestados ao meio ambiente. A valorização de ativos bioeconômicos da floresta em pé, incluindo a biodiversidade e recursos hídricos, oferece um retorno econômico superior à substituição por pastagens ou agricultura predatória (Banco Mundial, 2023). Assim, florestas em pé, rios limpos e solos férteis não são apenas 'cenários', mas serviços vitais que sustentam a economia global. No entanto, a lógica de mercado tradicional, com foco em resultados financeiros cada vez mais encorpados, raramente recompensa àqueles que zelam por esse patrimônio. O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) propõe inverter essa lógica, aplicando o princípio do 'protetor-recebedor'.

O município de São Bento do Sul, localizado no Planalto Norte do Estado de Santa Catarina, criou a Lei Municipal nº 2677/2010 que instituiu o Programa Produtor de Água do Rio Vermelho, visando realizar pagamentos por serviços ambientais prestados na Bacia do Rio Vermelho, manancial de abastecimento de água da cidade (São Bento do Sul, 2010). Segundo Hubel, Mello e Bollmann (2011), o Programa foi desenvolvido como uma Política Pública para geração de subsídios para produtores ou proprietários de terras às margens do Rio Vermelho, desde onde é captada água para o município até suas nascentes. A iniciativa promoveu o primeiro pagamento aos produtores participantes já no ano de 2011, antes mesmo de existirem programas federais nesse sentido. O objetivo desse artigo será estudar o caso do Programa Produtor de Água do Rio Vermelho, demonstrando o caminho legal adotado, as formas de adesão, os objetivos principais do programa, a forma de pagamento e origem dos recursos, além de identificar pontos chave para a replicação de programas de PSA.

O Relatório de Brundtland (World Commission on Environment and Development,1987) propõe o desenvolvimento sustentável como um processo de mudança em que a exploração de recursos, a orientação dos investimentos, os rumos do desenvolvimento ecológico e a mudança institucional se harmonizam e estão de acordo com as necessidades das gerações atuais e futuras. Esse conceito de sustentabilidade deriva da visão de que os seres humanos estão consumindo o meio ambiente a um ritmo tão intenso que brevemente resultará no esgotamento dos recursos naturais.

Hardin (1968) descreve uma situação em que indivíduos, agindo em benefício próprio, esgotam recursos compartilhados, levando à sua degradação. Ele denomina essa situação como ‘tragédia dos comuns’, que implica na necessidade de regulamentação e gestão coletiva para evitar a superexploração e garantir a sustentabilidade dos recursos naturais. O pagamento por serviços ambientais (PSA) é um instrumento econômico para a conservação do meio ambiente, em que os que se beneficiam dos serviços ambientais pagam, e os que contribuem para a geração e conservação desses serviços recebem por esse motivo (Pagiola; Bishop; Landell-Mills, 2006). O objetivo do PSA é prevenir a manutenção ou aumentar a qualidade dos serviços ecossistêmicos (Godecke; Hupfer; Chaves, 2014).

O Brasil conta com uma lei sobre o tema, Lei Federal nº 14.119 de 13 de janeiro de 2021. (Brasil, 2021). Em seu artigo 1º ela define conceitos, objetivos, diretrizes, ações e critérios de implantação da Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais

(PNPSA), institui o Cadastro Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (CNPSA) e o Programa Federal de Pagamento por Serviços Ambientais (PFPSA), e dispõe sobre os contratos de pagamento por serviços ambientais. (Brasil, 2021). Segundo Araújo (2025), o conceito de economia ecológica reconhece que serviços como a purificação de água, a regulação do clima e a manutenção da biodiversidade são fundamentais para a saúde do planeta, reforçando a importância de políticas públicas que promovam uma gestão mais equilibrada e sustentável dos recursos naturais. Para Seehusen e Prem (2011), existem quatro serviços ambientais (Quadro 1) comercializados com maior intensidade e frequência no mundo.

Quadro 1 – Serviços ambientais comercializados.

	Recursos Hídricos	Biodiversidade	Carbono	Beleza cênica
Serviço Ambiental	Redução da sedimentação, melhoria da qualidade da água, aumento de fluxo.	Manutenção dos ecossistemas, corredores ecológicos, manutenção da polinização.	Absorção e armazenamento de carbono na vegetação e solo.	Proteção da beleza visual para recreação.
Paga-se por	Reflorestamento em mata ciliar, manejo de bacia hidrográfica, qualidade da água, áreas protegidas.	Áreas protegidas, produtos amigos, créditos de biodiversidade.	Tonelada de carbono não emitido ou sequestrado. Créditos de carbono.	Entradas, permissão de acesso, concessão para ecoturismo.

Fonte: Adaptado de Seehusen e Prem (2011, p.40).

No Estado de Santa Catarina, a Lei Estadual nº 15.133, de 19 de janeiro de 2010 (Santa Catarina, 2010), que institui a política estadual de serviços ambientais e regulamenta o programa estadual de pagamento por serviços ambientais no Estado de Santa Catarina. Esta legislação tem como diretrizes a utilização do pagamento por serviços ambientais como instrumento de promoção do desenvolvimento sustentável, o restabelecimento, recuperação, proteção, preservação, manutenção ou melhoramento de áreas prioritárias para conservação da biodiversidade ou para preservação cênica, além de atividades de uso sustentável e fomento às ações humanas voltadas à promoção e manutenção de serviços ambientais. (Santa Catarina, 2010). Ao estabelecer o Programa Estadual de PSA, o legislador catarinense consolidou o papel do agricultor como provedor de bem-estar público, vinculando a remuneração à melhoria de indicadores ambientais, especialmente em bacias hidrográficas críticas.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o processo de implantação do Programa Produtor de Água do Rio Vermelho, que foi uma das primeiras iniciativas do gênero no Brasil, identificando as motivações iniciais, as dificuldades enfrentadas, as legislações criadas, as estratégias adotadas frente aos problemas apresentados e os resultados produzidos. O programa é capitaneado pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto – SAMAE, autarquia do município responsável pela captação, tratamento e distribuição de água potável, além de coleta e tratamento de esgoto sanitário e coleta e destinação de resíduos sólidos (São Bento do Sul, 1966).

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa e descritiva, adotando o procedimento técnico de estudo de caso. O objeto de análise é o Programa "Produtor de Água do Rio Vermelho", instituído em São Bento do Sul – SBS (SC) como uma estratégia de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) voltada à conservação de mananciais.

A área de desenvolvimento do estudo engloba a microbacia do Rio Vermelho, no trecho localizado desde suas nascentes até o ponto de captação de água para abastecimento do município de SBS. Segundo SEBRAE (2023), São Bento do Sul está localizado no Planalto Norte do Estado de Santa Catarina, com altitude aproximada de 840 metros, clima temperado úmido e temperatura média anual entre 16 e 17 graus Celsius. Sua economia é fortemente industrializada com os setores predominantes sendo o moveleiro, o metalmecânico, o plástico e o cerâmico. Seu PIB – Produto Interno Bruto ultrapassou 5 bilhões de reais em 2023 e sua população está estimada em 87.661 habitantes (IBGE, 2025). Parte da cidade está situada na Bacia do Rio Itapocu, da Vertente do Atlantico Sul e a outra parte na Bacia do Alto Rio Negro, da Bacia do Paraná. O Rio Vermelho faz parte da Bacia do Rio Itapocu, integrante da Região Hidrográfica 06, da Baixada Norte (Santa Catarina, 2017). A Figura 1 representa a localização do Rio Vermelho, na divisa entre as cidades de São Bento do Sul e Campo Alegre.

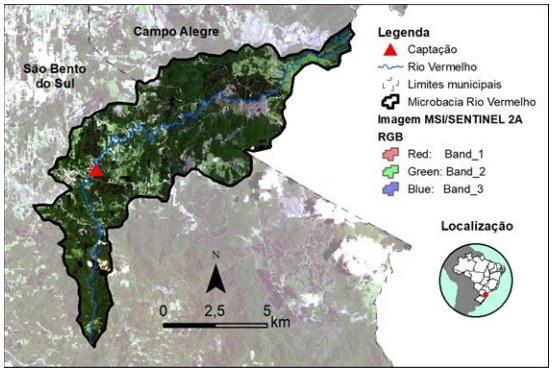


Figura 1 – Localização da microbacia do Rio Vermelho.
Fonte: Fundação CERTI (2018, p. 9)

Para execução deste trabalho foram delineadas e seguidas as seguintes etapas:

1. Coleta de Dados Locais.

Etapa na qual foram buscadas informações socioeconômicas que possibilitem realizar a caracterização da área de estudo. Dados do IBGE (IBGE, 2025), assim como documentos como o perfil socioeconômico da cidade de São Bento do Sul (SEBRAE, 2024). Informações acerca da Bacia do Rio Vermelho também foram obtidas através de análise de documentos e legislações, como foi o caso da implantação da Área de Proteção Ambiental – APA na área de estudo (São Bento do Sul, 1998).

2. Informações que motivaram o município de São Bento do Sul a desenvolver o Programa Produtor de Água do Rio Vermelho.

Através de pesquisa, tanto de legislações aplicadas (Brasil, 2008), (Brasil, 2021), (Santa Catarina, 2010), (São Bento do Sul, 2023), (São Bento do Sul, 2025), como artigo relacionado à implantação do Programa (Hubel, Mello e Bollmann, 2011), foram identificadas as motivações e objetivos da implantação do Pagamento por Serviços Ambientais. Também foram pesquisados documentos da autarquia de saneamento, através de seu site institucional (São Bento do Sul – SAMAE, 2025).

3 . Percurso Legislativo para implantação do Programa.

Foram buscados dados no portal de leis municipais, que apresenta toda a legislação do município, tanto leis, quanto decretos e portarias municipais, pesquisa que permite identificar as regras do programa, as condições de participação, seus objetivos e a composição dos atores integrantes do Comitê Gestor do PSA.

4. Valores investidos, regras de participação, parcerias e valoração dos serviços ambientais.

Busca realizada junto ao site de transparência da autarquia responsável pelos pagamentos do programa, assim como através dos editais de credenciamento de produtores rurais (São Bento do Sul – SAMAE, 2025). Outro documento pesquisado e que trouxe extrema clareza acerca de diversos aspectos da área pesquisada, embasou a elaboração do planejamento estratégico do Programa foi o Diagnóstico realizado pela Fundação CERTI com apoio da ANA e do Estado. (Fundação CERTI, 2018).

5. Problemas enfrentados pelo programa e estratégias utilizadas para dirimi-los.

Através de pesquisa documental acerca de notícias, recortes de divulgações e artigo que discorre sobre o Programa foi possível identificar problemas e ações adotadas.

A figura 2 apresenta um fluxograma metodológico utilizado neste trabalho.

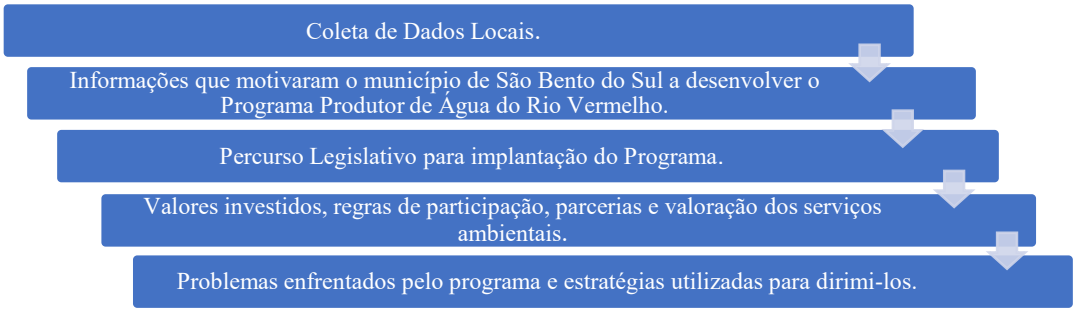


Figura 2 – Fluxograma metodológico.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Resultados e Discussão

1. Informações que motivaram o município de São Bento do Sul a desenvolver o Programa Produtor de Água do Rio Vermelho.

Dentre as motivações que levaram o município de São Bento do Sul a desenvolver o programa, observou-se que ocorreram eventos de poluição com comprometimento da água do Rio Negrinho II, manancial utilizado até 2004 para abastecer a cidade. Isso levou ao aumento no custo de tratamento e principalmente à escassez de água, que levou a campanhas rígidas e de controle, quando em períodos prolongados de estiagem (Hubel, Mello e Bollmann, 2011). A alteração da captação de água para o Rio Vermelho manancial de águas mais límpidas e em volume suficiente para abastecer a demanda sem causar danos ao curso d'água, foi entendida como necessária naquele momento pelos gestores municipais. A incontornável necessidade de preservar esta fonte de recurso natural e garantir a manutenção do abastecimento de toda uma cidade, motivou a estruturação do PSA segundo Hubel, Mello e Bollmann (2011).

A lei Municipal nº 246 de 14 de agosto de 1998 do município de São Bento do Sul (São Bento do Sul, 1998), criou a APA - Área de Proteção Ambiental do Rio Vermelho constituída na bacia hidrográfica do Rio Vermelho, no município de São Bento do Sul, assim entendida como a área compreendida entre o divisor de águas, ou seja, divisor topográfico que divide as águas que fluem diretamente para o Oceano Atlântico daquelas que fluem para a bacia hidrográfica do Rio Negro (São Bento do Sul, 1998). Segundo o inciso I do art.1º da Lei nº 246, uma das finalidades da Lei é proteger as nascentes do Rio Vermelho e seus afluentes, tendo em vista a preservação e conservação natural da drenagem em suas formas e vazões e sua condição de futura fonte de captação de água para abastecimento público. (São Bento do Sul, 1998).

2. Percurso Legislativo que instituiu o Programa.

Em novembro de 2010 ficou definida a redação final do Projeto de Lei que Instituiu a Política Municipal dos Serviços Ambientais e o Programa Municipal de pagamento por Serviços Ambientais, estabelecendo formas de controle e financiamento desse Programa, e dando outras providências. (Hubel, Mello e Bollmann, 2011). Após encaminhamento para a Câmara de Vereadores o referido projeto foi aprovado na forma da Lei Municipal nº 2677, de 24 de novembro de 2010 (São Bento do Sul, 2010). A Lei determina o desenvolvimento de um programa específico denominado "Produtor de Água do Rio Vermelho", sendo estabelecido pelo Decreto Municipal nº 0634 de 22 de março de 2011 (São Bento do Sul, 2011). Para acompanhamento do PSA foi criado o Comitê Gestor do Programa Municipal de Pagamentos por Serviços Ambientais designado pelo Decreto Municipal nº 0672, de 27 de abril de 2011 (São Bento do Sul, 2011)

Dentre os principais pontos verificados na legislação criada, observa-se a separação dos serviços ambientais em três categorias: 1- Serviços de aprovisionamento, que resultam em bens ou produtos ambientais com valor econômico, obtidos diretamente pelo uso e manejo sustentável dos ecossistemas; 2 - Serviços de suporte e regulação que mantêm processos ecossistêmicos e as condições dos recursos ambientais naturais, de modo a garantir a integridade dos seus atributos para as presentes e futuras gerações; e 3 - Serviços culturais associados aos valores e manifestações da cultura humana, derivados da preservação ou conservação dos recursos naturais. A lei ainda previu que, além do PSA, poderiam ser prestados serviços de assistência técnica e capacitação de proprietários, assim como a realização de inventário de áreas potenciais para o programa.

Os objetivos do PSA, conforme art 3º da Lei Municipal 2677/2010 são: desenvolvimento sustentável; controle Social e transparência; promoção da integridade ambiental com inclusão social de populações rurais em situação de vulnerabilidade; restabelecimento, recuperação, manutenção ou melhoramento de áreas prioritárias para conservação da biodiversidade ou para preservação da beleza cênica; formação, melhoria e manutenção de corredores ecológicos; reconhecimento da contribuição da agricultura familiar e comunidades tradicionais para a conservação ambiental; prioridade para áreas sob maior risco socioambiental; promoção da gestão de áreas prioritárias para conservação, uso sustentável e repartição de benefícios e biodiversidade; fomento às ações humanas voltadas à promoção de serviços ambientais.

O Comitê Gestor, atualizado pelo Decreto Municipal nº 3.428, de 22 de maio de 2025 (São Bento do Sul, 2025) é composto por representantes de instituições multidisciplinares de saber notório para a governança do Programa. As instituições que compõe o Comitê contribuíram para sua implantação, além de acompanhar sua execução. Na composição atual do Comitê estão representadas: 1 – SAMAE; 2 – Consórcio Intermunicipal Quiriri; 3 – Secretaria Municipal de Agricultura e Meio Ambiente; 4 – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, EPAGRI; 5 – Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente, COMDEMA.

3. Valores investidos, regras de participação, parcerias e valoração dos serviços ambientais.

A lei Municipal nº 2677/2010 (São Bento do Sul, 2010), que criou o programa, também previu sua forma de financiamento, sendo que as despesas de planejamento, acompanhamento, avaliação e divulgação de resultados relativos ao financiamento de pagamentos por serviços a ambientais poderão ser custeadas pelos recursos orçamentários destinados ao SAMAE – Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, autarquia municipal responsável pela captação, tratamento e distribuição de água potável, coleta e tratamento de esgoto sanitário e coleta e destinação de resíduos sólidos (São Bento do Sul, 2010).

Já o decreto Municipal que regulamenta o programa, nº 3266/2025 (São Bento do Sul, 2025) estabelece que o pagamento máximo será de 122,5 UFM (Unidade Fiscal Municipal) por hectare da propriedade, sendo o cálculo definido nos editais de credenciamento abertos pela autarquia municipal de saneamento. O Mesmo decreto define que os pagamentos ocorrerão anualmente e, para as propriedades que não atingirem o valor mínimo a ser pago, receberão 125 UFM pela propriedade. As despesas decorrentes do pagamento pelos serviços ambientais de que trata o decreto, serão custeadas com recursos da autarquia, sendo que os proprietários selecionados pelos editais devem firmar contratos com a mesma (São Bento do Sul, 2025).

A Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza firmou parceria com o Programa em 2011, ano do primeiro pagamento aos produtores. A principal conquista da parceria foi a adoção da metodologia Oásis para valoração dos serviços ambientais a serem pagos aos proprietários participantes. A metodologia estabeleceu um questionário e uma planilha a serem preenchidos em cada vistoria anual das propriedades participantes. Atualmente chamada de Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Economia Verde – SEMAE, a Secretaria de Desenvolvimento Sustentável – SDS do Estado de Santa Catarina, é parceira do Programa desde seu início, tendo como participação muito importante o aporte de recursos financeiros para contrapartida na contratação da CERTI (Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras), para realização do Diagnóstico socioeconômico e Planejamento Estratégico de Ampliação do Programa Produtor de Água da Microbacia do Rio Vermelho. Já a Agência Nacional de Água e Saneamento – ANA também se mantém parceira do programa desde 2011. O Governo Federal, por intermédio da Agência, financiou o Diagnóstico e Planejamento Estratégico feitos pela Fundação CERTI. Os estudos ocorreram nos anos de 2017 e 2018 e o produto final traz uma gama de ações projetadas para a continuidade do programa, inclusive com um vasto mapeamento da área, mostrando dados importantes para identificação de áreas prioritárias de ação, em relação à recuperação de áreas de proteção permanentes, contenção do carreamento de solo e mapeamento de nascentes e contribuintes do Rio Vermelho. As figuras 3a e 3b mostram resultados do diagnóstico.

O Programa Produtor de Água da ANA determina que as práticas conservacionistas devem aportar benefícios ambientais ao manancial de interesse. Estes benefícios incluem o abatimento da sedimentação e da turbidez da água e o aumento da infiltração de água no solo. (Brasil, 2008). Segundo o manual operativo do Programa, ele tem como foco a redução da erosão, melhoria da qualidade da água e aumento das vazões dos rios, utilizando-se práticas mecânicas e vegetativas de conservação de solo e água, readequação das estradas vicinais e construção de fossas sépticas nas propriedades rurais. (Brasil, 2008).

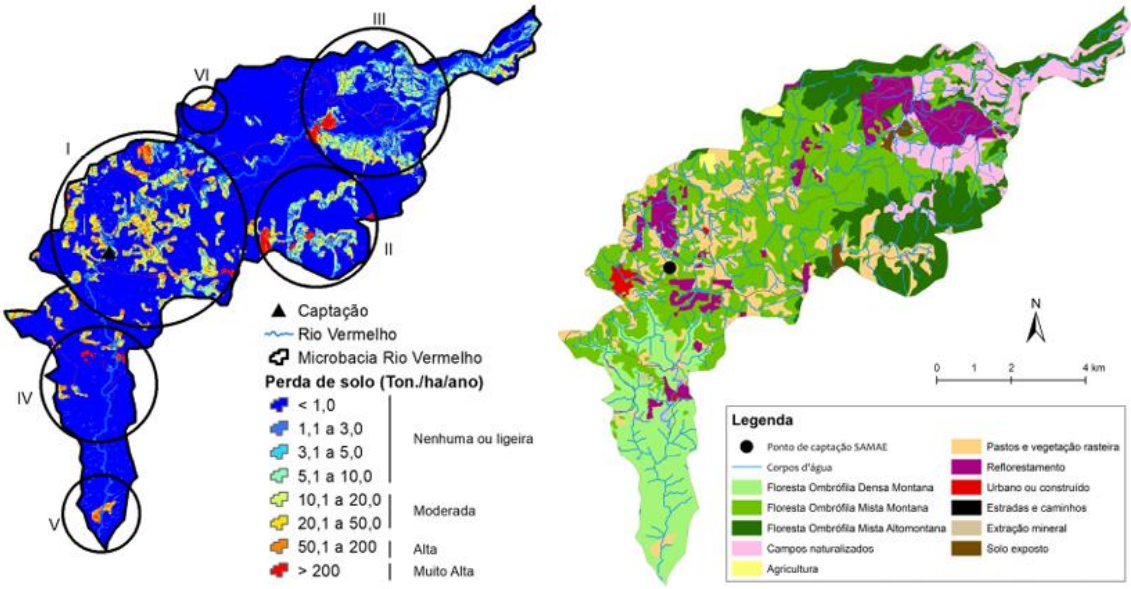


Figura 3a – Classificação da taxa de perda de solo e 3b - Uso e cobertura na microbacia do Rio Vermelho.
Fonte: Fundação CERTI (2018, p.33 e 39).

A gama de parceiros envolvidos no programa é ampla. Ainda podemos destacar o envolvimento mais próximo de Secretarias Municipais como a do Meio Ambiente e Agricultura, Obras, Planejamento e Saúde. O Consórcio Quiriri, que abrange 4 municípios da região também sempre teve participação assídua, assim como a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - EPAGRI, que é o órgão de extensão rural do Estado de Santa Catarina. A Secretaria de Saúde mantém uma parceria muito interessante com o Programa Produtor de Água do Rio Vermelho, pois alguns proprietários mantém o plantio de espécies com comprovada ação medicinal em suas terras. A Secretaria, por sua vez, mantém o programa Farmácia Viva, no qual faz a dispensa de medicamentos fitoterápicos aos usuários do Sistema Único de Saúde - SUS no município. Na Figura 4 temos um panorama dos parceiros envolvidos no programa, que tem como centro os proprietários.

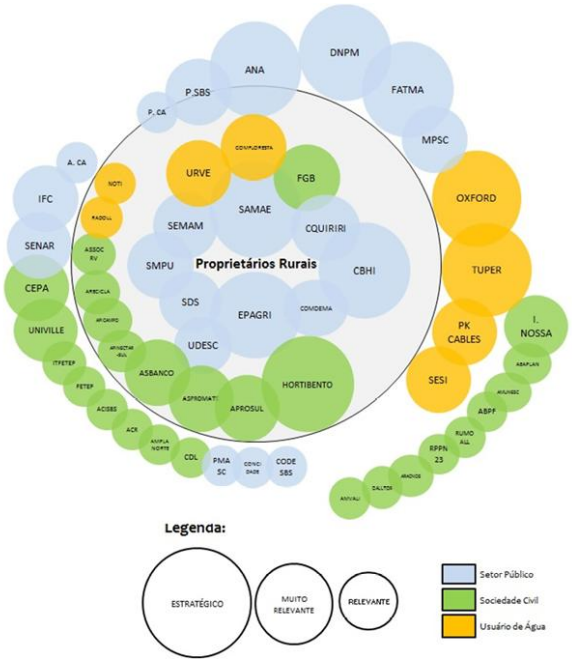


Figura 4 – Diagrama de Venn dos atores sociais da região da microbacia do Rio Vermelho.
Fonte: Fundação CERTI (2018, p.24)

O Decreto Municipal 3266/2025 delimita que o Programa de Pagamento por Serviços Ambientais – PMPSA será desenvolvido na microbacia do Rio Vermelho, sendo que o programa fica instituído para os proprietários de imóveis localizados a montante da lagoa de captação de água do SAMAE, até a nascente primária, localizada no município de Campo Alegre (São Bento do Sul, 2025). Serão considerados os pagamentos por hectare de área conservada ou em fase comprovada de recuperação

bem como de adoção comprovada por vistoria de práticas ecoeficientes que melhoram o desempenho ecossistêmico da propriedade conforme Tabela 3, de valoração. Equipara-se ao proprietário de área rural, o arrendatário ou detentor do domínio legal de propriedade, a qualquer título. Para aderir ao programa proponentes podem ser pessoas físicas ou jurídicas e ter as seguintes características: ser voluntário a participar do Programa; estar total ou parcialmente inserida na área geográfica de execução do projeto, estabelecida pelo Comitê Gestor do Programa Municipal de Pagamentos por Serviços Ambientais; apresentar documentos que habilitam o proprietário/possuidor da área (aquele que está usando a terra); atender à legislação ambiental. Caso contrário, o proprietário precisa possuir termo de compromisso de adequação ambiental assinado com os órgãos competentes, condicionado ao recebimento da premiação; não apresentar pendências no Cadastro de Inadimplentes.

Mediante prévio contato com o proprietário, serão feitas visitas semestrais à propriedade, seguindo a metodologia de monitoramento de propriedades, para elaboração de relatório técnico de vistoria. Ao realizar este monitoramento, será verificado se houve manutenção das características naturais documentadas ou se houve alguma alteração (positiva e/ou negativa), sendo condição a aprovação dos relatórios referentes ao pagamento anual da parcela.

Segundo previsto no edital nº 200/2025, os pagamentos serão realizados no mês de novembro ou dezembro do ano em parcela única via depósito bancário. O pagamento mínimo será de 125 UFM por propriedade que não atingir o valor mínimo a ser pago devido às características da propriedade. O pagamento máximo será de 122,5 UFM por hectare da propriedade. O valor máximo total a ser pago por propriedade fica limitado ao teto de R$ 8.000,00 (oito mil reais), (São Bento do Sul, 2025).

A tábua de valoração utilizada no início do programa foi desenvolvida pela Fundação Grupo Boticário. A mesma foi utilizada por mais de uma década, sendo substituída pela planilha atual, que apresenta as calculadoras desenvolvidas para dar suporte a captação de recursos financeiros para projetos de PSA no Estado de Santa Catarina, bem como calcular o valor de PSA a ser pago levando em conta ações para conservação da vegetação nativa e ações para conservação da água e do solo. A planilha foi desenvolvida no âmbito do projeto "Plano Modelo de Viabilidade e Sustentabilidade Econômica para Projetos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) em Santa Catarina", elaborado pela Fundação CERTI para a Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDE/SC). A Tabela 1 apresenta os itens mais representativos que podem acrescentar pontuação, demonstrando quais intervenções os proprietários podem realizar para aumentar os valores recebidos como pagamento pelos serviços ambientais prestados. Os dados completos de valoração podem ser consultados diretamente no edital nº 200/2025 disponível em https://www.samaesbs.sc.gov.br/edital-psa-2025.

Tabela 1 – Tabela de valoração das propriedades participantes.

Item	Respostas	Notas
Áreas Naturais	Área de vegetação nativa primária ou em estágio médio/avançado de regeneração	0,36
	Área com vegetação em estágio inicial de regeneração	0,07
	Área sem vegetação nativa destinada para restauração	0
Presença de Rios	Possui	0,18
	Não possui	0
Presença de Nascentes ou áreas úmidas	Possui	0,18
	Não possui	0
Proporção de APP na propriedade	Acima de 50% de APP na propriedade	0,36
	De 20% à 50% de APP na propriedade	0,18
	Abaixo de 20% de APP na propriedade	0
Nível de preservação das APPs em rios, lagos, nascentes e áreas úmidas	APPs totalmente preservadas ou não se aplica	0,36
	Mais de 70% de APP preservadas	0,18
	APPs com níveis de degradação	0,09
	Desprotegidas	0
Conectividade entre as áreas naturais internas	Todas as áreas naturais formam um bloco único	0,18
	Mais de 50% do total de áreas naturais da propriedade formam um bloco único	0,09
	A maioria das áreas naturais da propriedade encontra-se desconectada	0
Possui RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural	Totalidade das áreas naturais da propriedade é RPPN	0,36
	Parte da propriedade é RPPN	0,18
	Não possui RPPN	0
Possui área com vegetação nativa excedente à APP e RL	Acima de 60% de excedentes	0,54
	De 40% à 60%	0,4
	De 20% à 40%	0,3
	De 10% à 20%	0,2
	De 5% à 10%	0,1
	Abaixo de 5%	0

Fonte: Fundação CERTI (2020).

Os pagamentos do Programa iniciaram em 2011. A Tabela 2 demonstra os valores investidos pelo SAMAE na remuneração aos produtores. Em 2025 foram 31 propriedades remuneradas pelo PSA. A área abrangida pelo programa chegou a 1500 hectares, sendo que a microbacia conta com cerca de 5500 hectares.

Tabela 2 – Valores investidos na remuneração aos produtores.

Ano	Valor	Ano	Valor
2011	R$ 9.668,85	2019	R$ 77.513,70
2012	R$ 9.778,97	2020	R$ 86.491,60
2013	R$ 10.027,42	2021	R$ 84.560,93
2014	R$ 11.478,56	2022	R$ 104.480,79
2015	R$ 11.933,93	2023	R$ 107.039,08
2016	R$ 35.031,31	2024	R$ 110.360,58
2017	R$ 34.907,64	2025	R$ 101.842,52
2018	R$ 33.402,54	**Total**	**R$ 828.518,42**

Fonte: Elaborado pelos próprios autores (2026)

Como as ações já estão em andamento por alguns anos, nas propriedades que estão participando do programa desde o início, há resultados visíveis, inclusive em imagens de satélite das propriedades, com nítida recomposição de áreas de APP e áreas vegetadas totais. Na Figura 5 é possível visualizar uma mesma propriedade em dois momentos distintos.

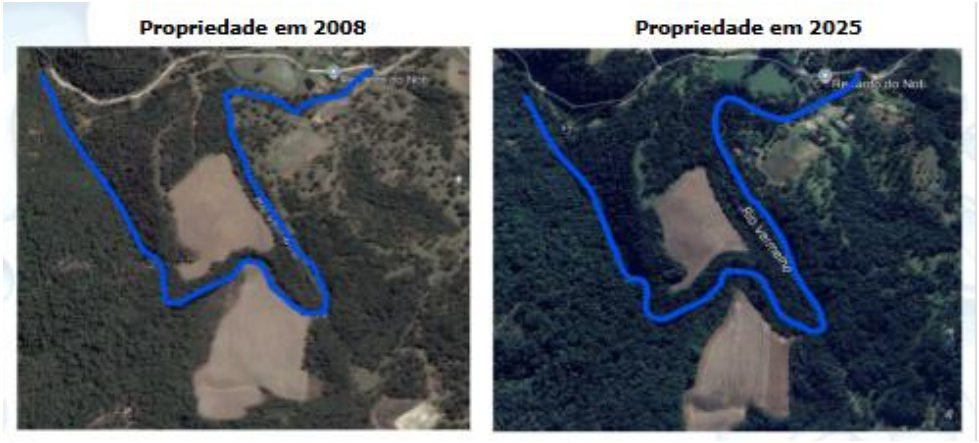


Figura 5 – Propriedade Rural participante do PSA.
Fonte: Próprio autor (2026)

4.2 Problemas enfrentados pelo programa e estratégias utilizadas para dirimi-los.

A implantação de um programa pioneiro não se traduz em tarefa fácil. Diversos foram os problemas enfrentados durante os anos de implantação e manutenção do Programa Produtor de Água do Rio Vermelho. A replicação do programa em outros municípios é possível e poderá ocorrer de forma ainda mais fluida e eficiente ao serem observados os dados levantados e apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Problemas enfrentados e estratégias adotadas.

Problemas enfrentados	Estratégias adotadas
Resistência de Participação por parte dos proprietários.	• Realização de reuniões informativas; • Continuidade das ações sem interrupções; • Deixar claro que o Estado não quer tomar posse das terras de interesse; • Criar o sentimento de pertencimento com participação dos proprietários nas metas e ações do programa.
Financiamento dos Pagamentos	• Priorizar uma fonte fixa de pagamento, para garantia de continuidade e segurança; • Buscar parceiros financeiros para ações complementares do programa; • Criar legislação prevendo o financiamento, se público; • Estabelecer valor mínimo e máximo para pagamento, visando oportunizar maior participação de produtores sem comprometer todo o recurso disponível com poucos grandes proprietários; • Aproveitar a recente legislação nacional sobre o tema para expandir a atuação.
Descontinuidade devido a mudanças de governo.	• Tornar o programa importante para a população beneficiada, fortalecendo o pertencimento; • Desenvolvimento de arcabouço legal robusto; • Desvinculação do projeto de qualquer vinculação partidária.
Definição de ações os proprietários devem adotar.	• Fortalecimento da participação dos mais diversos setores na composição do Comitê Gestor e na lista de parceiros do programa; • Visitas periódicas de acompanhamento e orientação aos proprietários.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores (2026)

Considerações Finais

A criação e implantação do Programa Produtor de Água do Rio Vermelho, no Município de São Bento do Sul foi uma iniciativa que nasceu da necessidade de realizar o pagamento por serviços ambientais prestados na microbacia do Rio Vermelho, localizada no Planalto Norte de Santa Catarina, entre os municípios de São Bento do Sul e Campo Alegre.A legislação municipal foi constituída de leis e decretos que formaram a base para aplicação prática do Pagamento por Serviços Ambientais. O programa teve início ainda no ano de 2010.

A implantação do programa aconteceu com o envolvimento de diversos participantes, divididos entre órgãos públicos, sociedade civil, empresas privadas e universidades. A pluralidade de conhecimentos dos diversos atores permitiu o avanço do programa ao longo de seus 15 anos de existência.

O valor dos pagamentos tem origem no Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, tendo em vista que o principal objetivo observado no estudo de caso foi a manutenção e preservação da área de manancial de abastecimento de água da cidade. O PSA está delimitado do ponto de captação até a nascente mais distante do Rio Vermelho. Assim, todos os habitantes da cidade contribuem financeiramente através do pagamento das faturas de água, para que seja possível remunerar os produtores detentores de terras na Bacia do Rio Vermelho, já que os mesmos promovem serviços ambientais que garantam a disponibilidade de água em quantidade e qualidade.

A adesão ao programa é voluntária e os participantes têm suas propriedades avaliadas periodicamente, gerando um valor a ser pago. Existe um Comitê Gestor nomeado para formular os editais de credenciamento e realizar o acompanhamento da evolução das propriedades. A tábua de valoração leva em consideração diversos aspectos de preservação, sendo que o valor mínimo pago por propriedade é de R$ 930,00 (novecentos e trinta reais), o que corresponde a 125 UFMs, e o valor máximo de R$ 8.000,00 (oito mil reais).

A replicação de programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) em outros municípios é fundamental porque transforma a conservação da natureza em um ativo econômico viável, incentivando quem protege recursos vitais. Ao remunerar produtores rurais e proprietários de terras pela preservação de nascentes, e manutenção de florestas nativas, as cidades garantem a segurança hídrica e a resiliência climática de toda a região. Além de ser uma estratégia mais barata do que remediar desastres naturais ou tratar águas poluídas, o PSA promove a justiça social no campo e cria uma cultura de sustentabilidade onde o desenvolvimento econômico caminha lado a lado com a proteção dos ecossistemas. Ao observar as dificuldades enfrentadas e as atitudes adotadas no Programa Produtor de Água do Rio Vermelho, novas iniciativas podem produzir efeitos ainda maiores e melhores quando replicados.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) pela infraestrutura e suporte durante a realização desta pesquisa, que está inserida no Mestrado Nacional em Rede em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, contando ainda com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e da Agência Nacional de Águas (ANA). Agradecimento especial à Professora Doutora Virginia Grace Barros pelo suporte e orientação.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, Anderson Henrique Santos; SANTOS LIMA, Andreina Suellen. **Pagamento de Serviços Ambientais (PSA) no Brasil: uma análise bibliométrica (2004-2024) e perspectivas futuras.** Novos Cadernos NAEA, [S.l.], v. 28, n. 1, abr. 2025. ISSN 2179-7536. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index. php/ncn/article/view/16367/12250>. Acesso em: 08 fev. 2026. doi:http://dx.doi.org/10. 18542/ncn.v28i1.16367.

BANCO MUNDIAL. **Um Equilíbrio Delicado para a Amazônia Legal Brasileira**: Memorando Econômico da Amazônia. Washington, DC: World Bank, 2023. Disponível em: https://www.bancomundial.org. Acesso em: 22 mai. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Disponível em: Câmara dos Deputados. Acesso em: 08 fev. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. **Manual Operativo do Programa produtor de Água. Brasília, 2008.** Disponível em: http://produtordeagua.ana.gov.br/Portals/0/DocsDNN6/documentos /MANUAL%20OPERATIVO%20-%20PROGRAMA%20 PRODUTOR%20DE%20%C3%81GUA.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

FUNDAÇÃO CERTI. **Diagnóstico Socioeconômico e Ambiental: Planejamento Estratégico de Ampliação do Programa Produtor de Água da Microbacia do Rio Vermelho em São Bento do Sul e Campo Alegre – SC**. Florianópolis: CERTI, 2018

GODECKE, M.V.; HUPFFER, H.M.; CHAVES, I.R. (2014) **O futuro dos Pagamentos por Serviços Ambientais no Brasil a partir do novo Código Florestal. Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 31, p. 31-42. http://dx.doi.org/ 10.5380/dma.v31i0.34896

HARDIN, G. **The tragedy of the commons: the population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality**. Science, [s. l.], v. 162, n. 3859, p. 1243-1248, 1968.

HÜBEL, M.; MELLO, R.; BOLLMANN, M. **Programa de pagamento por serviços ambientais, "Produtor de Água do Rio Vermelho",**

em São Bento do Sul – Santa Catarina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. Anais. Porto Alegre: ABRH, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da população residente para os municípios e para as Unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2025**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 28 fev. 2026.

LANDELL-MILLS, N.; PORRAS, I. T. **Silver bullet or fools´ gold? A global review of markets for forest environmental services and their impact on the poor.** London: International Institute for Environment and Development, 2002.

PAGIOLA, S.; BISHOP, J.; LANDELL-MILLS, N. **La venta de servicios ambientales forestales.** 2. ed. Cidade do México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. 2006

SANTA CATARINA. **Lei nº 10.949, de 09 de novembro de 1998**. Dispõe sobre a divisão do Estado em Regiões Hidrográficas. Florianópolis: Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 1998. Disponível em: https://leis.alesc.sc.gov.br/ato-normativo/12495. Acesso em: 28 fev.

SANTA CATARINA. **Lei nº 15.133, de 19 de janeiro de 2010**. Institui a Política Estadual de Serviços Ambientais, o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais e estabelece outras providências. Florianópolis: Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, [2010]. Disponível em: leis.alesc.sc.gov.br. Acesso em: 8 fev. 2026.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDE). **Plano Modelo de Viabilidade e Sustentabilidade Econômica para Projetos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) em Santa Catarina**. Elaborado pela Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI). Florianópolis: SDE, 2020

SÃO BENTO DO SUL. **Decreto nº 3.428, de 22 de maio de 2025**. Designa Comitê Gestor do Programa Municipal de Pagamento por Serviços Ambientais. São Bento do Sul: Prefeitura Municipal, 2025. Disponível em leismunicipais.com.br. Acesso em: 20 fev. 2026.

SÃO BENTO DO SUL. **Decreto nº 3.266, de 31 de março de 2025**. Regulamente a Lei nº 2677, de 24 de novembro de 2010, que dispõe sobre o Programa Municipal de Pagamento por Serviços Ambientais: Prefeitura Municipal, 2025. Disponível em: leismunicipais.com.br. Acesso em: 20 fev. 2026.

SÃO BENTO DO SUL. **Lei nº 41, de 04 de maio de 1966**. Cria o Serviço Autônomo de Água e Esgoto e dá outras providências. São Bento do Sul: Câmara Municipal, 1966. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/a/sc/s/sao-bento-do-sul/lei-ordinaria/1966/4/41/lei-ordinaria-n-41-1966-cria-o-servico-autonomo-de-agua-e-esgoto-e-da-outras-providencias. Acesso em: 28 fev. 2026.

SÃO BENTO DO SUL. **Lei Ordinária nº 246, de 24 de julho de 1998**. Cria a APA - Área de Proteção Ambiental do Rio Vermelho, revoga a Lei nº 696/96 e dá outras providências. São Bento do Sul: Câmara Municipal, 1998. Disponível em: leismunicipais.com.br. Acesso em: 20 fev. 2026.

SÃO BENTO DO SUL. **Lei Ordinária nº 2.677, de 24 de novembro de 2010**. Institui a Política Municipal dos Serviços Ambientais, o Programa Municipal de Pagamento por Serviços Ambientais, estabelece formas de controle e financiamento desse programa, e dá outras providências. São Bento do Sul: Câmara Municipal, 2010. Disponível em: leismunicipais.com.br. Acesso em: 20 fev. 2026.

SÃO BENTO DO SUL. **Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental (APA) Rio Vermelho/Humboldt**. Elaborado por STCP Engenharia de Projetos Ltda. Homologado pelo Decreto nº 2.655, de 1º de abril de 2024. São Bento do Sul, SC, 2024.

SÃO BENTO DO SUL. Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE). **Edital nº 200, de 16 de abril de 2025**. Credenciamento para Pagamento por Serviços Ambientais a Proprietários Rurais. São Bento do Sul: SAMAE, 2025. Disponível em: https://www.samaesbs.sc.gov.br/edital-psa-2025. Acesso em: 20 fev. 2026.

SEBRAE. **Perfil Socioeconômico de São Bento do Sul**. Florianópolis: SEBRAE/SC, 2023. Disponível em: https://datasebrae.com.br. Acesso em: 22 mai. 2024.

SEEHUSEN, S. E. & PREM, I. **Por que pagamentos por serviços ambientais?** In: Pagamento por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios. BECKER, F. G. & SEEHUSEN, S. E. (orgs). Brasília: MMA, p. 15- 54, 2011.

ABNT. **NBR 6022**: informação e documentação: artigo em publicação periódica técnica/científica: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

ESTUDO DA FROTA DE ÔNIBUS E EMISSÕES DE POLUENTES À LUZ DA FERRAMENTA ENVIRONMENTAL, SOCIAL, AND GOVERNANCE (ESG)

1 Leandro Camilo Florentino, 2 Anna Gabriella Tempesta, 3 Thiago Mathias de Oliveira, 4 Guilherme Augusto Queiroz Schunemann Manfrin De Oliveira.

1Universidade Positivo, e-mail: leandrocf@ufpr.br; anna.tempesta@ufpr.br, 2Universidade Federal do Paraná, 3Universidade Positivo, e-mail: thiagomathias@alunos.utfpr.edu.br, 4Universidade Positivo, e-mail: guilherme.oliveira@up.edu.br.

Palavras-chave: ESG; Transporte Coletivo; Descarbonização.

Resumo

O setor de transportes está entre os principais responsáveis pela poluição atmosférica urbana. Reconhece-se que a aplicação isolada e segmentada dos critérios Environmental, Social, and Governance (ESG) dificulta a implementação de uma transição energética integrada. Nesse contexto, essa transição refere-se à substituição da frota movida a combustíveis fósseis (como o diesel) por tecnologias de matriz limpa (como a eletrificação), um processo complexo que exige que a modernização tecnológica caminhe junto ao suporte social e à transparência gerencial. Diante disso, esta investigação analisa de que maneira os programas e iniciativas relacionados ao ESG no transporte coletivo urbano contribuem para a diminuição das emissões poluentes e para a promoção da sustentabilidade no Brasil, com foco nas regiões do Paraná e São Paulo. O estudo justifica-se pela necessidade premente de articular esses três eixos, incorporando a visão da base operacional para evitar que a sustentabilidade seja apenas um discurso institucional. A metodologia empregada, de natureza mista, foi organizada em três fases: (i) uma revisão integrativa da literatura envolvendo 46 artigos; (ii) a validação do constructo por meio do método Delphi, avaliado por um comitê multidisciplinar de juízes especialistas nas de Engenharia de Transportes, Engenharia Ambiental, Gestão Pública e Planejamento Urbano, Economia e Políticas de Transporte, Saúde Ocupacional e Medicina do Trabalho, Psicologia do Trabalho, Estatística e Metodologia Científica, além de Fonoaudiologia e Saúde Ambiental; e (iii) a aplicação de um questionário estruturado direcionado a motoristas e cobradores. As respostas obtidas foram convertidas matematicamente em um Escore ESG normalizado (em uma escala de 0 a 100), permitindo quantificar a maturidade das práticas no setor. Os resultados indicam que, apesar do predomínio do foco no eixo ambiental, a governança se configura como o elemento essencial para viabilizar a descarbonização. A aplicação do instrumento revelou um nível satisfatório de maturidade ESG no setor (61,67), com melhor desempenho na dimensão ambiental (73), impulsionado pela maior visibilidade das tecnologias de eletrificação, enquanto a governança apresentou o menor índice (51), evidenciando fragilidades na transparência institucional. Conclui-se que o avanço da agenda sustentável demanda marcos legais rigorosos para superar o uso de combustíveis fósseis, a adoção da Linguagem Simples para assegurar o engajamento crítico da base operacional diante do risco de greenwashing (maquiagem verde), e a aplicação de uma Matriz de Materialidade para direcionar estrategicamente a governança do setor. Propõe-se a incorporação do framework ESG como uma sexta medida estruturante no planejamento urbano. Por último, com o intuito de ampliar sua utilidade na formulação de políticas públicas, este estudo está em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico).

Introdução

Os programas de Environmental, Social, and Governance (ESG) surgem como um elemento essencial na promoção da sustentabilidade e no enfrentamento das mudanças climáticas, desempenhando papel fundamental na diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no âmbito do transporte público. O agravamento das alterações climáticas e o crescimento da urbanização intensificam os impactos ambientais relacionados a esse setor, evidenciando sua contribuição significativa para a liberação de CO_2, NOx e material particulado em áreas urbanas. Nesse contexto, a incorporação dos critérios ESG funciona como um agente de modernização institucional, incentivando a substituição de frotas alimentadas por combustíveis fósseis por veículos elétricos e promovendo um planejamento urbano sustentável (BARCZAK; DUARTE, 2012; ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015; FIRMINO; PEIXOTO, 2024).

Entretanto, a literatura aponta que esses avanços, quando considerados isoladamente, apresentam resultados parciais e limitados diante da complexidade dos sistemas urbanos. Nota-se que o componente Ambiental (E) é o mais explorado, com ênfase na eletrificação e no uso de biocombustíveis, embora existam restrições práticas quanto à dispersão dos poluentes. Segundo Figueroa *et al.* (2013), na prática, isso implica que a redução da poluição não está condicionada exclusivamente ao tipo de combustível utilizado, mas também a variáveis meteorológicas locais, assim sendo fenômenos como a inversão térmica funcionam como uma barreira que retém e concentra os poluentes, enquanto condições de elevada umidade e variações térmicas dificultam a dispersão do material particulado e do dióxido de enxofre liberados pelos ônibus. Dessa forma, mesmo com a adoção de frotas menos poluentes, as emissões podem permanecer acumuladas ao nível das ruas, impactando diretamente a qualidade do ar nas áreas urbanas.

No âmbito Social (S), persistem lacunas relevantes na incorporação de princípios de equidade, evidenciando que os benefícios operacionais raramente se traduzem em acessibilidade justa (DÍAZ-ARRIETA; RIVAS VALVERDE; ALLEN, 2023).

Por fim, a Governança (G) é identificada como o elemento mais crítico e vulnerável, enfrentando desafios como a falta de coordenação interinstitucional e a desigualdade tecnológica (CORREIA JUNIOR; CONDEÇO-MELHORADO; LIMA, 2025).

O problema central que fundamenta esta pesquisa reside justamente na constatação de fragmentações e na aplicação isolada desses componentes (E), (S) e (G). Observa-se a carência de estudos que compreendam de que maneira as empresas do setor utilizam o framework ESG para converter as pressões advindas de políticas públicas em resultados de descarbonização que sejam mensuráveis e socialmente equitativos. Há uma lacuna significativa na compreensão integrada de como esses três eixos se articulam a partir da perspectiva da base operacional, ou seja, dos trabalhadores diretamente envolvidos no cotidiano do transporte coletivo urbano (DA SILVA *et al.,* 2022; MEYER; MEYER JUNIOR, 2021; COUTINHO; ANDRADE, 2025).

Dessa forma, justifica-se a condução deste estudo pela necessidade premente de articular os eixos ambiental, social e de governança, incorporando as vozes frequentemente negligenciadas dos motoristas e cobradores, a fim de suprir as lacunas teóricas e empíricas existentes. Ao evidenciar essas percepções operacionais, a pesquisa forneceu fundamentos para o desenvolvimento e aprimoramento das políticas públicas e da governança corporativa no setor, bem como direciona para estratégias de descarbonização urbana do ponto de vista tecnológico na mitigação das emissões, além de promover justiça social e transparência administrativa, assegurando uma transição energética inclusiva.

O aprofundamento dessa temática oferece contribuições essenciais para o aprimoramento das políticas públicas corporativas e para evitar que a transição energética se configure apenas como um discurso institucional (greenwashing). Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar de que modo os programas e iniciativas de ESG aplicados ao transporte coletivo urbano colaboram para a redução das emissões1 de poluentes e para a sustentabilidade no território nacional.

Material e Métodos

Este estudo utiliza uma metodologia mista, combinando técnicas qualitativas e quantitativas, com enfoque exploratório e descritivo (CRESWELL, 2010). Para garantir o cumprimento dos objetivos propostos, a pesquisa foi estruturada em três etapas principais, sequenciais e interligadas, conforme sintetizado na Tabela 01.

Etapa Condensada	Procedimentos Metodológicos	Produto/Convergência para a etapa seguinte
Etapa I – Revisão Integrativa da Literatura	Consolidação do referencial teórico e definição dos eixos ESG (A, S, G).	Subsídio teórico para construção e validação do instrumento.
Etapa II – Elaboração e Validação do Instrumento	Validação de conteúdo pelos especialistas e aprimoramento do questionário piloto.	Questionário validado para coleta de dados.
Etapa III – Aplicação e Análise dos Dados	Coleta de dados primários por meio de questio-nário estruturado, seguida de tratamento estatí-stico descritivo e cálculo de índices normalizados referentes às dimensões Ambiental (E), Social (S) e Governança (G), com posterior inter-pretação dos resultados à luz do referencial ESG.	Geração de resultados empíricos e discussão dos achados.

Fonte: Etapas da pesquisa. Autor (2026).

Detalhando as fases apresentadas na Tabela 01, a etapa inicial consistiu em uma revisão integrativa da literatura nas bases SciELO, Scopus e EBSCO, considerando publicações entre 2010 e 2025. Para a condução das buscas, foram aplicadas estratégias estruturadas que combinaram palavras-chave em português e inglês, interligadas pelos operadores booleanos AND e OR. Os descritores foram distribuídos em quatro eixos principais de análise: (1) Mobilidade Urbana (por exemplo, "transporte coletivo urbano", "ônibus urbano", "urban public transport"); (2) Sustentabilidade e Governança (como "ESG", "governança corporativa", "corporate sustainability"); (3) Descarbonização (tais como "redução de emissões", "emission reduction"); e (4) Impactos Socioambientais (incluindo "impacto ambiental", "qualidade do ar", "SDG"). A fórmula básica da busca consistiu na combinação sistemática desses eixos, seguindo a estrutura: [Termos de Mobilidade] AND [Termos ESG] AND [Termos de Descarbonização] AND [Termos de Impactos], com as adaptações sintáticas necessárias para cada base de dados consultada.

Após uma triagem realizada por pares em duplo-cego com o auxílio do software Rayyan, foi selecionada uma amostra final de 46 artigos alinhados ao tema da descarbonização e sustentabilidade no transporte coletivo urbano, com foco nas práticas de ESG.

Na segunda etapa, foi elaborado um questionário estruturado destinado a motoristas e cobradores, o qual passou por uma validação exploratória de constructo utilizando o método Delphi. Para garantir a robustez científica do modelo, constituiu-se um comitê multidisciplinar composto criteriosamente por especialistas nas áreas de Engenharia de Transportes, Engenharia Ambiental, Gestão Pública e Planejamento Urbano, Economia e Políticas de Transporte, Saúde Ocupacional e Medicina do Trabalho, Psicologia do Trabalho, Estatística e Metodologia Científica, além de Fonoaudiologia e Saúde Ambiental. O perfil heterogêneo dos avaliadores e os índices de concordância obtidos nas categorias analisadas na fase final da validação encontram-se detalhados na Tabela 02. Além disso considerar: *Critério: <60% = revisar profundamente; 60–79% = revisar com boa aceitação; ≥80% = aceito. Nota: C+CT representa a soma das respostas "Concordo" (C) e "Concordo Totalmente" (CT). Os resultados da convergência e consenso superaram o patamar mínimo de 80% recomendado na literatura para os principais critérios, garantindo a confiabilidade do instrumento para sua aplicação prática em campo (CRESWELL, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2025).

Dimensão	Versão I – % juízes em C+CT	Decisão Delphi V1*	Versão II – % juízes em C+CT	Decisão Delphi V2*
Conteúdo	54,2%	Revisar profundamente	87,5%	Aceito (pequenas revisões de forma)
Relevância	62,5%	Revisar (boa aceitação)	91,7%	Aceito (conteúdo consolidado)
Linguagem	41,7%	Revisar profundamente	79,2%	Revisar (limiar próximo ao consenso)
Motivação	45,8%	Revisar profundamente	79,2%	Revisar (boa aceitação, abaixo de 80%)
Cultura	62,5%	Revisar (boa aceitação)	87,5%	Aceito (pequenas revisões de forma)

Fonte: Validação do questionário. Adaptado de Oliveira *et al*. (2025).

A terceira etapa consistiu na aplicação do questionário validado por meio da plataforma Google Forms, utilizando a técnica Snowball (bola de neve), reconhecida na literatura por sua eficácia em acessar populações operacionais específicas e ampliar a amostra (VINUTO, 2014; WOHLIN, 2014). A amostra final contou com 100 respondentes válidos, sendo 80,7% motoristas e 19,3% cobradores. Vale ressaltar que a proporção observada na composição da amostra final reflete com precisão a configuração operacional vigente do transporte coletivo, onde a ampla utilização da bilhetagem eletrônica resultou na extinção da função de cobradores. Dessa forma, essa disparidade numérica não configura um viés metodológico na amostragem, mas sim evidencia que a pesquisa refletiu de maneira realista a demografia e a proporção efetiva dos profissionais que atuam diretamente no sistema atualmente.

Os dados coletados foram exportados para planilhas eletrônicas, onde as médias das respostas foram convertidas para uma escala de maturidade normalizada de 0 a 100, permitindo a geração e comparação do Índice ESG Integrado.

Para a análise quantitativa, as variáveis investigadas foram organizadas conforme as três dimensões do framework: Ambiental (12 itens), Social (13 itens) e Governança (9 itens). As respostas foram obtidas por meio de uma escala Likert de 5 pontos, variando de 1 (Discordo Totalmente) a 5 (Concordo Totalmente). Com o objetivo de padronizar os dados e viabilizar a comparação direta, calculou-se a média aritmética das respostas em cada dimensão, que foi posteriormente convertida para uma escala percentual normalizada entre 0 e 100. Para exemplificar a estrutura do instrumento de pesquisa aplicado aos motoristas e cobradores, apresentam-se a seguir algumas afirmações representativas avaliadas em cada uma das dimensões.

Dimensão Ambiental: “A fumaça, o cheiro de diesel e outros poluentes do ônibus prejudicam o ar no meu local de trabalho” e “Conheço ou percebo o uso de outras tecnologias de baixa emissão, além da eletrificação”.

Dimensão Social: Recebi treinamento e/ou requalificação específicos para lidar com as novas tecnologias (ex: ônibus elétricos) ou os novos processos de trabalho”.

Dimensão Governança: “A empresa demonstra valorizar a sustentabilidade e o bem-estar do trabalhador na prática” e “Os trabalhadores são incluídos na tomada de decisões relativas a novos investimentos e sustentabilidade da frota”.

A transformação matemática das médias para a escala de maturidade normalizada foi realizada conforme a Equação (01) apresentada a seguir:

$$E_{norm} = \left(\frac{(E_{mean} - 1)}{4} 4\right) * 100 \qquad (01)$$

Em que:

E_{norm} é o escore normalizado da dimensão (0 a 100);
E_{mean} representa a média aritmética simples das respostas do eixo (escala 1 a 5);
1 é o valor mínimo da escala Likert;
4 representa a amplitude da escala (valor máximo menos o valor mínimo).

Após a etapa de normalização, o Índice ESG Integrado foi determinado pela combinação das pontuações de cada eixo, conforme expresso na Equação (02).

$$\text{Índice ESG Integrado} = \frac{(E_{norm} + S3_{norm} + G_{norm})}{3} 3 \qquad (02)$$

Em que: I_{ESG} representa o Índice ESG Integrado final (0 a 100);

I_{ESG} é o escore normalizado da dimensão Ambiental;
E_{norm} é o escore normalizado da dimensão Social;
$S3_{norm}$ é o escore normalizado da dimensão Governança;
G_{norm} é o escore normalizado da dimensão Governança.

Após a normalização, o Índice ESG Integrado foi obtido por meio da média aritmética simples das dimensões Ambiental, Social e Governança, atribuindo-se pesos iguais a cada eixo (1/3).

Os dados foram avaliados de maneira consolidada (n=100), combinando as percepções das regiões Sul e Sudeste, com o intuito de assegurar a robustez estatística do Índice ESG Integrado e minimizar possíveis vieses regionais.

Resultados e Discussão

A revisão integrativa revelou diferenças marcantes na aplicação prática dos pilares ESG, destacando um nível elevado de maturidade nas estratégias ambientais, como a descarbonização da frota, em contraposição à limitada organização das métricas sociais e da governança participativa. No aspecto ambiental, os estudos empíricos ressaltam que as iniciativas de eletrificação e o uso de biocombustíveis são estratégias centrais, embora apresentem limitações operacionais. Por exemplo, a substituição da frota por ônibus movidos a biodiesel, apesar de se tratar de uma fonte renovável, pode ocasionar emissões de monóxido de nitrogênio (NO) até 37% superiores em comparação ao diesel convencional, o que demanda o desenvolvimento de novas tecnologias de controle (RIBAS *et al*., 2016). No que tange à governança corporativa e regulação, os casos empíricos indicam que intenções climáticas desprovidas de marcos legais obrigatórios são insuficientes. A cidade de São Paulo, ao promulgar a Lei nº 16.802/2018, impulsionou a transição tecnológica ao definir prazos rigorosos para a diminuição do uso de combustíveis fósseis (BRASIL, 2018). Por outro lado, embora Curitiba tenha avançado com a promulgação da Lei nº 15.852/2021 (PlanClima) (BRASIL, 2021), a renovação efetiva da frota ocorre de maneira gradual; dados operacionais recentes apontam que veículos com emissão zero ou reduzida correspondem a cerca de 1,62% do total da frota em circulação (URBS, 2024). O percentual foi obtido a partir do Quadro Total de Ônibus, considerando a frota operante de modelos com tecnologia sustentável em relação ao total da frota cadastrada. Essa diferença evidencia que a existência de marcos legais deve estar associada a mecanismos de governança que promovam a implementação prática na base operacional. Com o intuito de compreender como essas diretrizes teóricas e institucionais se concretizam na prática, a aplicação do instrumento a 100 profissionais proporcionou um diagnóstico quantitativo sobre a maturidade ESG no setor. As percepções obtidas foram convertidas em uma escala normalizada de 0 a 100, consolidando o Índice ESG Integrado, conforme apresentado na Tabela 03.

Dimensão	Itens	Cálculo	Resultado	Classificação
Ambiental	12	(3,92 - 1) ÷4 x 100	73	Bom
Social	13	(3,44 - 1) ÷4 x 100	61	Bom
Governança	9	(3,05 - 1) ÷4 x 100	51	Moderado
Índice ESG integrado	34	(3,47 - 1) ÷4 x 100	61,67	Bom

Tabela 03: Médias aritméticas dos três eixos e do índice integrado. Elaborado pelo autor (2026).

Os dados empíricos apresentados na Tabela 03 confirmam a existência de um descompasso entre o avanço tecnológico e a estrutura de gestão. A dimensão Ambiental alcançou um índice de 73, refletindo a visibilidade da renovação da frota, que em 2024 incorporou veículos elétricos e a combustão (URBS, 2024), consolidando a eletrificação como uma manifestação tecnológica institucional. Contudo, é fundamental aprofundar essa análise: a percepção da linha de frente acerca do sucesso ambiental contrasta com o baixo desempenho no eixo Governança (51), indicando que a redução efetiva das emissões não deve se limitar à substituição dos motores. É necessário integrar a Análise do Ciclo de Vida (ACV) (VERNALHA; SEIXAS, 2023) e alinhar-se a diretrizes estratégicas, como o RenovaBio, que potencializa o uso de soluções renováveis e reforça o papel do transporte na mitigação dos gases de efeito estufa (DA SILVA *et al*., 2022). Embora temas como ACV e logística reversa sejam de nível estratégico, o escore moderado em Governança indica uma lacuna de letramento: sem uma gestão transparente, o conhecimento sobre o descarte e reciclagem de baterias (PEREIRA *et al*., 2019) não alcança a base operacional. Assim, a comparação entre as percepções dos motoristas e cobradores e a complexidade das políticas públicas evidencia que a transição tecnológica em Curitiba ainda carece de uma estrutura gerencial que conecte a inovação à prática cotidiana da linha de frente.

A Governança permanece como o principal entrave estrutural, situando-se em um nível Moderado (51). Essa disparidade resulta da ausência de mecanismos específicos de transparência na gestão. A transição ainda enfrenta desafios na comunicação interna, como a ineficácia na transmissão de informações relativas aos resultados dos testes de novos veículos e dados de transparência (por exemplo, tarifa técnica e investimentos em sustentabilidade).

A literatura indica que a inovação tecnológica promove sustentabilidade sistêmica apenas quando apoiada por rigorosos mecanismos regulatórios. A cidade de São Paulo, ao instituir a Lei nº 16.802/2018, impulsionou a transição tecnológica ao impor restrições ao uso de combustíveis fósseis (BRASIL, 2018). Em âmbito internacional, a reforma do transporte urbano por meio do sistema Transantiago no Chile, baseada em forte articulação de políticas de mobilidade e monitoramento, resultou na redução estatisticamente comprovada da concentração atmosférica de material particulado fino (MP10) (FIGUEROA *et al*., 2013). Na ausência desses instrumentos coercitivos e de controle de desempenho, o avanço da frota não se traduz em governança efetiva. Conforme destacado por Chimenti e Ribeiro (2024), a análise isolada das métricas corporativas pode induzir a uma falsa percepção de precisão ou desempenho organizacional.

Além da avaliação das médias globais de maturidade, torna-se essencial compreender a forma como essas percepções se distribuem ao longo das distintas etapas da gestão corporativa. Essa análise possibilita identificar a discrepância entre as diretrizes estabelecidas e sua efetiva implementação na rotina operacional do transporte. A Figura 01 ilustra a distribuição percentual das percepções dos profissionais, organizadas conforme quatro perspectivas operacionais: Estratégica, Planejamento, Controle e Ação.

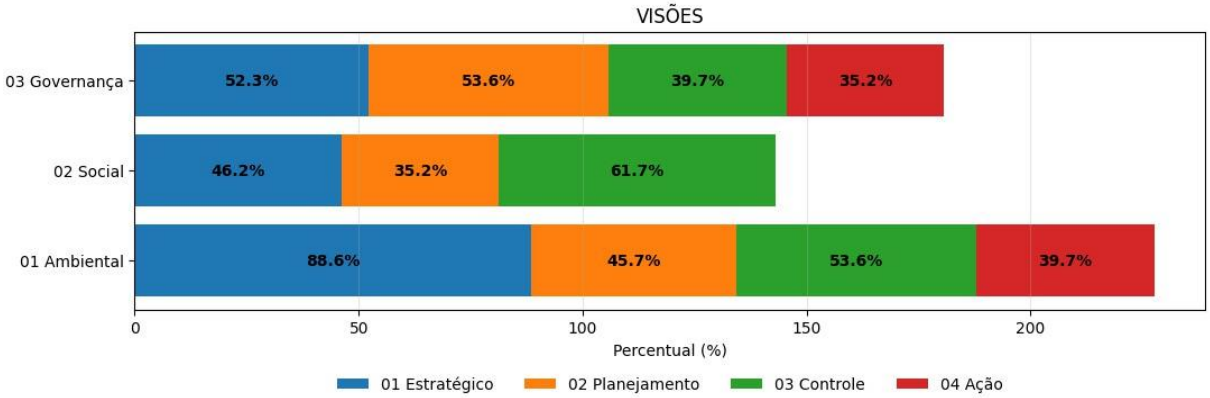


Figura 01: Distribuição percentual das visões ESG (estratégico, Planejamento, Controle e Ação). Elaborado pelo autor (2026).

Conforme demonstrado pelos dados apresentados na Figura 01, o eixo Ambiental concentra os maiores índices na dimensão Estratégica, alcançando 88,6%. Isso evidencia que os aspectos ambientais, incluindo a eletrificação da frota, são amplamente reconhecidos como prioritários tanto no discurso quanto nas diretrizes institucionais. Entretanto, observa-se uma diminuição gradual nos percentuais referentes às dimensões de Planejamento, Controle e Ação, indicando uma discrepância entre o reconhecimento estratégico e a implementação prática dessas iniciativas. No que tange ao eixo Social, destaca-se a predominância da dimensão de Controle, com 61,7%, o que sugere que os trabalhadores percebem um acompanhamento das questões sociais, embora haja menor ênfase no planejamento estruturado prévio. Já no eixo de Governança, os percentuais na dimensão Ação são críticos, situando-se em 35,2%. Este quadro empírico corrobora a hipótese de que, apesar da existência de diretrizes institucionais em níveis elevados, a governança permanece como o principal obstáculo para a efetivação da agenda ESG, falhando em converter as metas estabelecidas em ações concretas que sejam percebidas no âmbito operacional.

Ao aprofundar a avaliação da Governança sob uma perspectiva regionalizada, identificam-se obstáculos específicos que impactam a transição energética justa.

Assim sendo, a baixa avaliação em Governança, associada ao elevado número de respostas neutras no instrumento, está diretamente relacionada a barreiras cognitivas e informacionais enfrentadas pela força de trabalho. Dados do Indicador Nacional de Alfabetismo Funcional (INAF) apontam que comunicações institucionais excessivamente técnicas excluem operadores de base dos processos decisórios e do entendimento pleno das metas ESG (LINHARES, 2023; REDAÇÃO JEDUCA, 2023). A negligência dessas dificuldades de letramento perpetua a assimetria informacional. Dessa forma, para que o desempenho ambiental não se configure como mero "greenwashing", torna-se imprescindível que a transição seja acompanhada pela adoção institucional da Linguagem Simples, promovendo a democratização da informação e assegurando o engajamento crítico de motoristas e cobradores na agenda sustentável (DUARTE, 2024; IFPE, 2025).

Para consolidar os resultados empíricos e orientar as futuras estratégias corporativas do setor, é fundamental relacionar as percepções dos operadores à implementação de uma Matriz de Materialidade. Conforme o Instituto Brasileiro de Governança Corporativa (IBGC, 2022), essa matriz constitui uma ferramenta estratégica que visa identificar as questões mais relevantes para a organização, baseando-se na escuta ativa dos stakeholders e em um processo estruturado de avaliação e priorização interna. No contexto da agenda ESG, o conceito de materialidade está diretamente associado à incorporação dos temas prioritários nos processos decisórios, no direcionamento estratégico e no planejamento organizacional das empresas de transporte.

Neste trabalho, a escuta da base operacional serve como fundamento para a elaboração dessa matriz. A percepção dos trabalhadores revelou que temas como a eficiência energética (dimensão Ambiental) já estão amplamente materializados e assimilados, enquanto aspectos relacionados à qualificação tecnológica, transparência e comunicação (dimensão de Governança) ainda necessitam ser incorporados de forma mais consistente na gestão cotidiana. Assim, a Matriz de Materialidade transcende um diagnóstico pontual, funcionando como um instrumento essencial para apoiar a formulação de políticas, a definição de ações estratégicas e a alocação de recursos, minimizando os riscos vinculados à transição para a frota elétrica e garantindo que a sustentabilidade no transporte público seja implementada em consonância com as expectativas reais dos seus operadores.

Considerações Finais

Esta investigação evidenciou que o setor de transporte coletivo apresenta um nível satisfatório de maturidade em ESG, destacando que, embora o pilar Ambiental funcione como uma espécie de "vitrine tecnológica" para as políticas de eletrificação, a Governança surge como o principal obstáculo estrutural. A percepção da base operacional mostrou-se fundamental para constatar que a atual transição possui um enfoque predominantemente técnico, carecendo ainda de aprofundamento nos aspectos humanos, comunicacionais e administrativos.

Para que a transição ultrapasse o campo das intenções, a Governança necessita de marcos legais obrigatórios, visto que intenções climáticas e testes operacionais, sem políticas públicas que limitem o avanço dos combustíveis fósseis, são insuficientes para consolidar a descarbonização. O avanço da agenda sustentável corre o risco considerável de se configurar como uma greenwashing, caso a mera substituição da frota não seja acompanhada por uma estrutura institucional transparente e participativa.

Nesse contexto, ignorar a exclusão digital e as dificuldades de letramento da força de trabalho perpetua a desigualdade informacional, ressaltando a necessidade premente de incorporar a Linguagem Simples nas políticas corporativas. O otimismo tecnológico presente nas políticas públicas contrasta com a realidade diária dos trabalhadores, demandando que a modernização considere o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico). Ao promover a democratização da informação, a modernização tecnológica relaciona-se não apenas aos ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), mas também integra a inovação dentro de uma perspectiva sistêmica de justiça social.

Por fim, esta pesquisa confirma que a adoção de tecnologias limpas somente contribuirá para a maturidade sustentável das cidades se o planejamento urbano deixar de centrar-se exclusivamente nos veículos. De acordo com o modelo apresentado por Barczak e Duarte (2012), a mitigação eficaz dos impactos ambientais relacionados à mobilidade urbana depende da articulação integrada de cinco categorias de medidas: econômico-fiscais e financeiras; regulatórias; informativas e comunicacionais; de planejamento urbano e transporte; e tecnológicas. O principal entrave das políticas vigentes reside no fato de que as ações concentram-se quase que exclusivamente no aprimoramento tecnológico dos motores, sem reduzir o excesso de veículos individuais em circulação, o que impede a diminuição efetiva dos danos ambientais. Frente a essa lacuna, propõe-se a utilização da Matriz de Materialidade para orientar estrategicamente a gestão, associada à incorporação do framework ESG como uma sexta medida estruturante no planejamento urbano. A integração do ESG a essas iniciativas mitigadoras e às normas já vigentes, como a NBR ISO 14001 e os Códigos do IBGC, fortalecerá a conformidade regulatória, garantindo que a maturidade sustentável do transporte seja auditável, transparente e sistêmica. Para investigações futuras, recomenda-se ampliar a amostra para diferentes regiões e implementar projetos-piloto que possibilitem o acompanhamento contínuo da evolução das práticas nas empresas operadoras.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Positivo pelo apoio acadêmico e institucional recebido para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALBINO, V; BERARDI, U; DANGELICO, R. M. Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives. **Journal of Urban Technology**, v. 22, n. 1, p. 3–21, 2015. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10630732.2014.942092. Acesso em: 23 jan. 2025.

BARCZAK, R.; DUARTE, F. Impactos ambientais da mobilidade urbana: cinco categorias de medidas mitigadoras. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 4, n. 1, p. 13-32, jan./jun. 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/j/urbe/a/ZXSBgxC6QxMwtB7rhHDtLkC/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 18 fev. 2026.

BRASIL. **Lei nº 15852 de 01 de julho de 2021.** Dispõe sobre a política municipal de proteção, conservação e recuperação do meio ambiente e dá outras providências. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=416686. Acesso em 12 abr. 2026.

BRASIL. **Lei nº 16.802 de 18 de janeiro de 2018.** Dispõe sobre o uso de fontes motrizes de energia menos poluentes e menos geradoras de gases do efeito estufa na frota de transporte coletivo urbano do Município de São Paulo e dá outras providências. Disponível em: https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-16802-de-18-de-janeiro-de-2018. Acesso em: 02 mar. 2026.

CHIMENTI, P; RIBEIRO, T. Se eu não posso medir... não existe? **Métricas e dilemas em ESG. Rio de Janeiro**, 2023. Disponível em: https://valor.globo.com/empresas/esg/artigo/se-eu-nao-posso-medir-nao-existe-metricas-e-dilemas-em-esg.ghtml. Acesso em: 10 mar. 2026.

CORREIA JUNIOR, P. de A.; CONDEÇO-MELHORADO, A. M.; LIMA, C. de A. Análise da equidade espacial do transporte sustentável na cidade de Curitiba, Paraná, Brasil. **Ambiente Sociedade**, São Paulo, v. 28, p. e00038, 2025. DOI: 10.1590/1809-4422asoc00382vu28L3TD. Disponível em: https://www.scielo.br/j/asoc/a/d4pdHYjFxnfbsvg8JDbkP5G/?lang=pt. Acesso em: 18 fev. 2026.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa**: métodos qualitativo, quantitativo e misto. Tradução, prefácio e notas de: Maria Isabel Cruz Lopes. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

DA SILVA, T. B.; BAPTISTA, P.; SILVA, C. A. S.; SANTOS, L. Assessment of decarbonization alternatives for passenger transportation in Rio de Janeiro, Brazil. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 103, p. 103161, 2022. DOI: 10.1016/j.trd.2021.103161. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920921004569?via%3Dihub. Acesso em: 18 fev. 2026.

DÍAZ-ARRIETA, J. P.; RIVAS VALVERDE, J.; ALLEN, J. Análisis de perspectivas y políticas públicas enfocadas al transporte público eléctrico modalidad autobús en Costa Rica (2018-2022). **Infraestructura Vial**, San Pedro de Montes de Oca, v. 25, n. 44, jan./dez. 2023. DOI: 10.15517/iv.v25i44.54872. Disponível em: https://archivo.revistas.ucr.ac.cr//index.php/vial/article/view/54872. Acesso em: 18 fev. 2026.

DUARTE, J (org.). **Simplificar para incluir**: casos inspiradores de linguagem simples em comunicação pública. São Paulo: Aberje; ABCPública, 2024. ISBN 978-65-86831-79-5. Disponível em: https://abcpublica.org.br/wp-content/uploads/2024/12/Livro-Linguagem-Simples-Simplificar-para-Incluir-2.pdf. Acesso em: 16 jan. 2026.

FIGUEROA, E.; GÓMEZ-LOBO, A.; JORQUERA, P.; LABRÍN, F. Develando econométricamente los impactos sobre la concentración atmosférica de material particulado de un proyecto de remodelación del transporte urbano: El caso del Transantiago en Chile. **Estudios de Economía**, Santiago, v. 40, n. 1, p. 53-79, jun. 2013. Disponível em: https://www.scielo.cl/pdf/ede/v40n1/art03.pdf. Acesso em: 18 fev. 2026.

FIRMINO, A. L.; PEIXOTO, F. M. Desempenho ESG e seu impacto no desempenho das emissões de gases de efeito estufa na América Latina. **Revista Contabilidade & Finanças**, São Paulo, v. 36, n. 96, e20242089, 2024. Disponível em: https://revistas.usp.br/rcf/pt_BR/article/view/237211. Acesso em: 18 fev. 2026.

IBGC. Instituto Brasileiro de Governança Corporativa. **Boas práticas para uma agenda ESG nas organizações**. 1. ed. São Paulo: IBGC, 2022, p. 8. Disponível em: https://conhecimento.ibgc.org.br/Paginas/Publicacao.aspx?PubId=24587&assessment=1. Acesso em 10 mar. 2026.

IFPE. Campus Afogados da Ingazeira. **Manual de linguagem simples**. Afogados da Ingazeira: IFPE, 2025. Disponível em: https://portal.ifpe.edu.br/afogados/wp-content/uploads/sites/10/2025/11/manual-linguagem-simples-corrigido-1_compressed.pdf. Acesso em: 16 jan. 2026.

LINHARES, Lilian Nunes da Silva. **Quando a escola é porto, o processo é travessia**: o conceito rizoma como abordagem plural de letramento: do texto clássico ao contemporâneo. 2023. 160 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Letras) – Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2023. Disponível em: https://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/22734. Acesso em: 16 jan. 2026.

OLIVEIRA, T. M. de. ASSEF, A. A; BARUSSO, A. C.G; CONTO, J. de. Validade de um instrumento de percepção profissional sobre o uso de tecnologias na clínica fonoaudiológica. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 21, n. 67, p. 302–321, out./dez. 2025. DOI: 10.3895/rts.v21n67.18291. Disponível em: https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/18291. Acesso em: 17 fev. 2026.

PEREIRA, F. M.; VELÁSQUEZ, J. A.; RIECHI, J. L.; TEIXEIRA, J.; RONCONI, L.; RIOLFI JR., S.; KARAS, É. L.; ABREU, R. A.; TRAVAIN, J. C. Impact of pure biodiesel fuel on the service life of engine-lubricant: A case study. **Fuel**, v. 253, p. 116418, 2019. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116418. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236119317727. Acesso em: 2 dez. 2024.

REDAÇÃO JEDUCA. **Alfabetismo funcional**: entenda os principais resultados do Inaf. Jeduca, 05 maio 2025. Disponível em: https://jeduca.org.br/noticia/alfabetismo-funcional-entenda-os-principais-resultados-do-inaf. Acesso em: 16 jan. 2026.

RIBAS, W. F.; BILOTTA, P.; JANISSEK, P. R.; CARVALHO FILHO, M. A. S.; PENTEADO NETO, R. A. Influência do combustível (diesel e biodiesel) e das características da frota de veículos do transporte coletivo de Curitiba, Paraná, nas emissões de NOx. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 437-445, 2016. DOI: doi.org/10.1590/S1413-41522016133868. Disponível: https://www.scielo.br/j/esa/a/5x4qtPPGNXtry48x9GWqtqP/?lang=pt. Acesso em: 18 fev. 2026.

URBS. **Incorporação de Veículos: 2013 a 2024**. Informação técnica fornecida por comunicação direta. Curitiba, 2024.

VERNALHA, E. B. R.; SEIXAS, S. R. Alternativas para mobilidade urbana sustentável: comparação entre veículo elétrico a bateria íon-lítio e a célula a combustível (utilizando ACV). **Revista Brasileira de Energia**, v. 28, n. 4, p. 59-70, 2023. Disponível em: https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/771. Acesso em: 4 dez. 2024.

VINUTO, J. A amostragem em bola de neve na pesquisa qualitativa: um debate em aberto. **Revista Temáticas**, Campinas, v. 22, n. 44, p. 203–220, jul./dez. 2014. DOI: 10.20396/temáticas.v22i44.10977. Disponível em: https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/tematicas/article/view/10977/6250. Acesso em: 22 jan. 2025.

WOHLIN, C. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In: **Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering** (EASE '14). New York: ACM, 2014. p. 1–10. DOI: 10.1145/2601248.2601268. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266658918_Guidelines_for_snowballing_in_systematic_literature_studies_and_a_replication_in_software_engineering Acesso em: 09 mar. 2026.

PERSPECTIVA DA SUSTENTABILIDADE NO PROCESSAMENTO DE CHAPAS METÁLICAS: UM ESTUDO DE CASO

1 Letícia Raquel Almeida, 2 Paulo Roberto Janissek, 3 Eduardo Thomazi.
1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, e-mail: leticia.almeida@aluno.farroupilha.ifrs.edu.br; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, e-mail: paulo.janissek@caxias.ifrs.edu.br; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, e-mail: eduardo.thomazi@caxias.ifrs.edu.br;

Palavras-chave: análise do ciclo de vida (ACV); impacto ambiental; perfis de aço carbono.

Resumo

A crescente preocupação com os fatores ambientais e a sustentabilidade tem ganhado destaque na academia e nos setores produtivos. A área científica desenvolve ferramentas, como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que permite analisar todo processo produtivo, desde a extração da matéria-prima até o final da vida do produto. No entanto, as empresas, especialmente do setor metalmecânico, têm dificuldades em aplicar a ACV em todas as etapas, e a maioria dos estudos se limita nas etapas de extração de minérios e produção de metais, que são as etapas que ocasionam os maiores impactos ambientais. Este artigo supre esta lacuna, ao apresentar um estudo de ACV da etapa de conformação de chapas metálicas. O objetivo do trabalho foi avaliar as possibilidades de redução dos impactos ambientais comparando os insumos necessários para conformar chapas metálicas de diferentes espessuras. Como procedimento metodológico, foi feito o inventário dos processos e recursos necessários para produzir perfis de chapas metálicas de aço carbono, nas espessuras de 2,00 e 2,65mm. O escopo do trabalho se limitou aos processamentos de dobra, corte e perfuração para a produção de perfis metálicos, desde a recepção das bobinas metálicas até a obtenção do produto final dentro de uma abordagem conhecida como *"gate to gate*". Foi dada ênfase ao consumo energético necessário para o processamento de diferentes espessuras. Os dados obtidos evidenciaram uma diferença de aproximadamente 35,3% no consumo energético específico para a produção de perfis metálicos, considerando as espessuras analisadas. Os impactos ambientais ocasionados pela utilização de energia da matriz energética brasileira, que segundo a ANEEL é predominantemente composta por fontes renováveis, podem ser expressos pelo fator de emissão de 0,0385 kg CO_2/kWh. Dessa forma, considerando a produção anual de 7.423,20 t de perfis metálicos com espessura de 2,65 mm e a produção anual de 5.185,10 t de perfis metálicos com espessura de 2,00 mm, verifica-se um potencial estimado de redução de aproximadamente 45,4 t de CO_2 ao se adotar condições produtivas de menor consumo energético. Apesar de significativamente menor do que as emissões relacionadas à produção de cada tonelada de aço carbono, estimadas em aproximadamente 2.000 kg de CO_2 por tonelada de aço produzido, os resultados demonstram a relevância da otimização energética dos processos industriais como estratégia complementar para mitigação dos impactos ambientais. Os resultados deste trabalho são promissores, porém a sua implementação depende de alinhamentos com os usuários finais dos perfis produzidos neste estudo de caso específico. Para que a modificação sugerida neste trabalho possa ser realizada, as propriedades e o desempenho estrutural destas chapas precisam ser compatibilizadas com especificações de projetos, um trabalho que está em andamento. Como a produção de perfis metálicos é uma etapa intermediária do processo, outras etapas, como o transporte, uso e destinação ao final da vida útil (como reciclagem e reaproveitamento) podem ser beneficiadas com a produção de perfis metálicos de menor espessura.

Introdução

Características e aplicações do aço carbono

O aço carbono se destaca como um dos materiais mais utilizados na indústria metalmecânica em razão de sua versatilidade, resistência mecânica e viabilidade econômica (Callister & Rethwisch, 2020). O aço carbono é amplamente utilizado na indústria metalmecânica por apresentar uma combinação equilibrada de resistência mecânica, ductilidade e custo acessível. Suas propriedades são determinadas pela composição química e pelos processos de fabricação, especialmente pela relação entre os elementos carbono, manganês e silício, além das condições de laminação e resfriamento (Callister & Rethwisch , 2020). As propriedades mecânicas, como resistência à tração, limite de escoamento, alongamento e dureza, definem o comportamento do material sob solicitações externas, sendo fundamentais para o dimensionamento e a confiabilidade de componentes estruturais, automotivos e industriais (Dieter et al., 2017).

O aço carbono é um insumo estratégico amplamente empregado em componentes estruturais, automotivos e industriais, incluindo os setores automotivo, aeronáutico, da construção civil e agrícola (Totten et al., 2002; Ashby & Jones, 2012). O material é produzido em diferentes espessuras, influenciando diretamente o desempenho técnico, o consumo de insumos e os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos (Chiaverini, 2005). Diante da crescente pressão por práticas sustentáveis, Baumann et al. (2004) afirmam que é fundamental adotar metodologias que avaliem e minimizem a pegada ambiental associada aos materiais de engenharia. Nesse sentido, a Análise do Ciclo de Vida (ACV), normalizada pelas normas ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2014; ABNT, 2009), constitui uma ferramenta robusta para quantificar os impactos ambientais desde a extração da matéria-prima até o fim de vida útil dos produtos.

A influência da espessura do aço carbono nos impactos ambientais representa uma abordagem estratégica para a indústria metalmecânica (Lehni, M. WBCSD.;2000), alinhada aos princípios da ecoeficiência e da economia circular (Geissdoerfer, et al.

2017). A escolha da espessura impacta diretamente no consumo de matéria-prima, energia e emissões durante o ciclo de vida do produto. Nesse contexto, a metodologia ACV permite identificar as etapas críticas dos impactos ambientais e propor melhorias voltadas à ecoeficiência. Assim, este estudo justifica-se pela necessidade de alinhar práticas industriais aos princípios da sustentabilidade e da economia circular, fortalecendo a competitividade do setor.

Processo de conformação *cold roll-forming*

A fabricação de perfis metálicos é realizada a partir de fitas metálicas chamadas *slitters,* cada uma com largura e espessura definidas. Essas fitas são alimentadas na máquina perfiladeira, que transforma a chapa plana em perfis específicos. Durante o processo, além dos componentes estruturais da máquina, são utilizados água, óleo e energia elétrica para garantir o funcionamento adequado e a qualidade do produto final.

A fabricação de perfis de aço por meio do processo de conformação a frio se destaca como uma tecnologia amplamente consolidada e essencial para a produção industrial de componentes estruturais. A conformação a frio por rolos, conhecida como *cold roll forming*, consiste em uma operação contínua de curvatura de uma longa chapa metálica, na qual o material é gradualmente conformado por pares de rolos rotativos distribuídos em estações sucessivas até atingir a geometria final desejada (Timothy & Gauchey, 2025).

Nos últimos anos, a *Cold Roll Forming* tem ganhado destaque especialmente para a conformação de aços de ultra-alta resistência (UHSS), motivada pela busca por soluções estruturais mais leves, eficientes e sustentáveis. Esses materiais apresentam elevada resistência mecânica, permitindo otimizações de projeto e redução de massa em aplicações estruturais, alinhando-se às demandas por eficiência energética e menor impacto ambiental. A popularização do processo também está associada à sua capacidade de superar limitações enfrentadas por métodos convencionais, como a estampagem, ao trabalhar com ligas de maior resistência (Timothy & Gauchey, 2025).

Análise de Ciclo de Vida (ACV): Ferramenta para avaliar impactos ambientais

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é reconhecida mundialmente como uma das ferramentas mais completas de gestão ambiental. A metodologia ACV oferece uma abordagem científica para avaliar os impactos ambientais associados a produtos, processos e serviços, considerando todas as entradas e saídas ao longo do ciclo de vida.(Guinée et al., 2004) A importância da ACV está em sua capacidade de integrar diferentes categorias de impacto (energia, emissões, resíduos, toxicidade, aquecimento global, entre outros), proporcionando uma visão sistêmica dos efeitos ambientais (Heijungs et al., 2002; Curran et. al., 2012). A ACV, que está estruturada em quatro fases conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Fluxograma das fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).
Fonte: Adaptado da norma ISO 14040 (2009).

Existem poucas evidências sobre como a variação de espessuras em chapas de aço carbono influencia os impactos ambientais em análises do tipo portão a portão. A literatura de ACV em metais geralmente trata ligas e rotas produtivas, mas raramente isola o efeito da espessura nas etapas internas de produção (insumos, energia, emissões e perdas de processo). Essa ausência de comparativos diretos limita decisões de projeto e manufatura orientadas à redução de impactos no âmbito fabril. Este estudo aborda essa lacuna ao comparar diferentes espessuras de chapas por meio da ACV cujo estudo foi limitado ao escopo de transformação dos materiais

Material e Métodos

O trabalho está dividido em três partes: a primeira sobre o material utilizado, a segunda sobre os processos aos quais ele é submetido para obter a peça final conformada a partir da bobina metálica e a terceira sobre os procedimentos adotados para realizar a ACV comparando o processamento de chapas metálicas de diferentes espessuras de conformação para definir o escopo, obter o inventário de recursos necessários para a produção de cada perfil nas diferentes espessuras, bem como a metodologia e referências utilizadas para a avaliação dos impactos ambientais.

Bobinas de Aço Carbono Utilizadas

As características físico-químicas dos aços das bobinas foram obtidas dos laudos e certificações dos fornecedores. A Figura 2, apresenta as bobinas de aço carbono em sua forma original, evidenciando o estado inicial da matéria-prima antes do

processamento. Já a Figura 3 ilustra o desenho técnico do perfil metálico obtido, contendo as especificações necessárias para a fabricação e aplicação destes perfis. A associação entre as propriedades iniciais das bobinas de aço carbono e as características finais do perfil metálico produzido permite uma análise mais abrangente da influência das propriedades mecânicas e físico-químicas do material sobre o comportamento do aço durante as etapas de conformação, recorte e estampagem, contribuindo para a avaliação do desempenho produtivo, da estabilidade do processo e da qualidade final do produto obtido.



Figura 2 - Matéria-prima: bobinas.
Fonte: Os autores (2026).

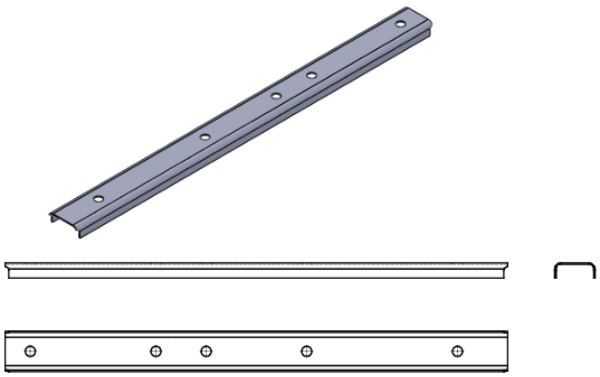


Figura 3 - Desenho técnico do perfil.
Fonte Adaptado pelos autores do projeto do cliente (2026).

Processos de Conformação Realizados na Empresa:

As chapas metálicas são conformadas em perfiladeiras através do sistema *roll-forming* (conformação a frio). A chapa metálica entra na perfiladeira e passa por rolos que vão realizando a curvatura do aço e transformando a chapa lisa em um perfil metálico.

A Figura 4 apresenta, de forma sequencial, o processo de conformação a frio de perfis a partir de bobinas de aço carbono.

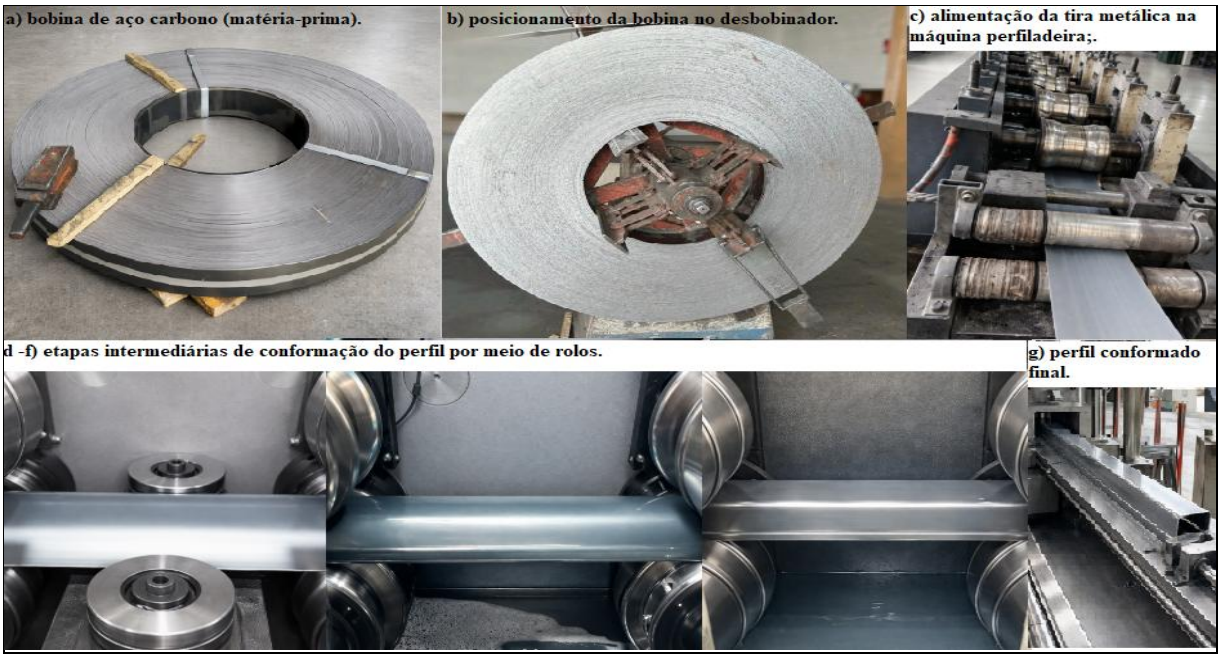


Figura 4 - Processo de conformação de perfis a partir de bobina de aço carbono.
Fonte: Os autores (2026).

Existem produtos que precisam de estampo, conhecido como a etapa de furação dos perfis, realizado nas prensas. São colocados módulos com os punções (agulhas) demarcados nos locais que serão recortados (furados) os perfis. Esse processo de estampagem recorta o local do furo através da pressão exercida pela máquina.

Na etapa de recorte, os perfis são cortados nas duas extremidades nos dois lados, respeitando o projeto do cliente. A Figura 5 apresenta, de forma sequencial, as etapas do processo de recorte de perfis metálicos realizado em equipamento de corte mecânico. Na Figura 5a, observa-se a máquina responsável pelo recorte dos perfis, composta por sistema de fixação e ferramenta

de corte, projetados para garantir estabilidade e precisão durante a operação. Na Figura 5b, é evidenciada a etapa inicial de corte, na qual dois perfis são simultaneamente posicionados e submetidos à ação da ferramenta, otimizando a produtividade do processo. A Figura 5c indica o recorte da extremidade oposta dos perfis, assegurando a obtenção das dimensões finais especificadas e a conformidade geométrica das peças. Por fim, na Figura 5d, apresenta-se o perfil metálico após o processo de recorte, evidenciando o acabamento das extremidades e a padronização dimensional.

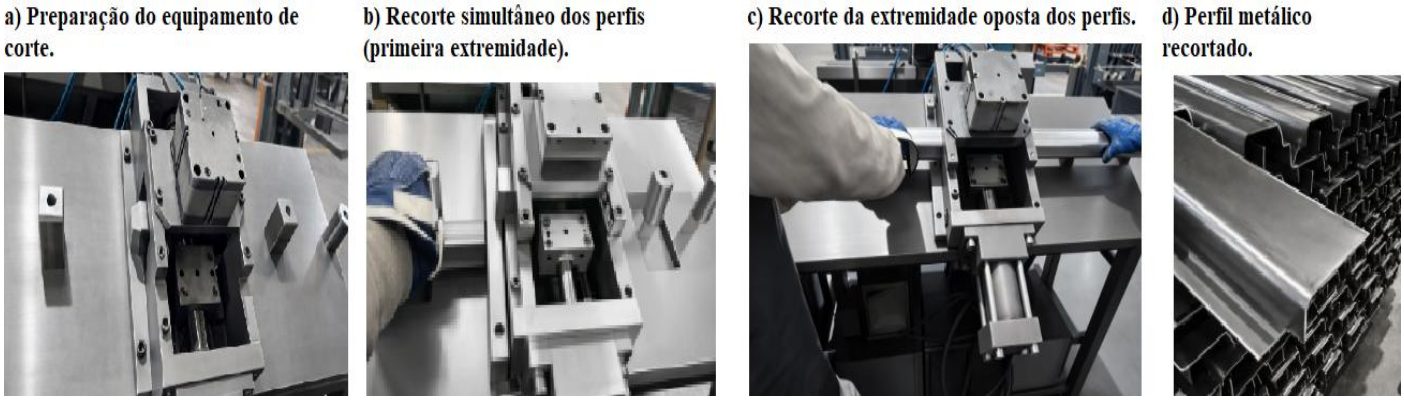


Figura 5 - Etapas do processo de recorte de perfis metálicos.
Fonte: Os autores (2026).

A Figura 6 apresenta, de forma sequencial, três etapas do processo de furação de perfis metálicos realizado em prensa mecânica. Na Figura 6a, observa-se o posicionamento inicial do perfil metálico sobre o dispositivo de fixação, alinhado aos punções da ferramenta de furação, garantindo a precisão dimensional e o correto referenciamento geométrico da peça. Nas Figuras 6b e 6c, evidenciam-se os acionamentos da máquina pelo operador, momento em que ocorre a descida dos punções e a consequente perfuração do perfil, caracterizando a etapa ativa do processo de conformação mecânica por cisalhamento. Na Figura 6d, é apresentado o perfil após a operação de furação, já com os furos, indicando a finalização do ciclo produtivo.

A sequência apresentada na figura 6 indica o fluxo operacional típico do processo, destacando a interação entre operador, equipamento e ferramenta, bem como aspectos relacionados à repetibilidade, controle dimensional e eficiência produtiva.

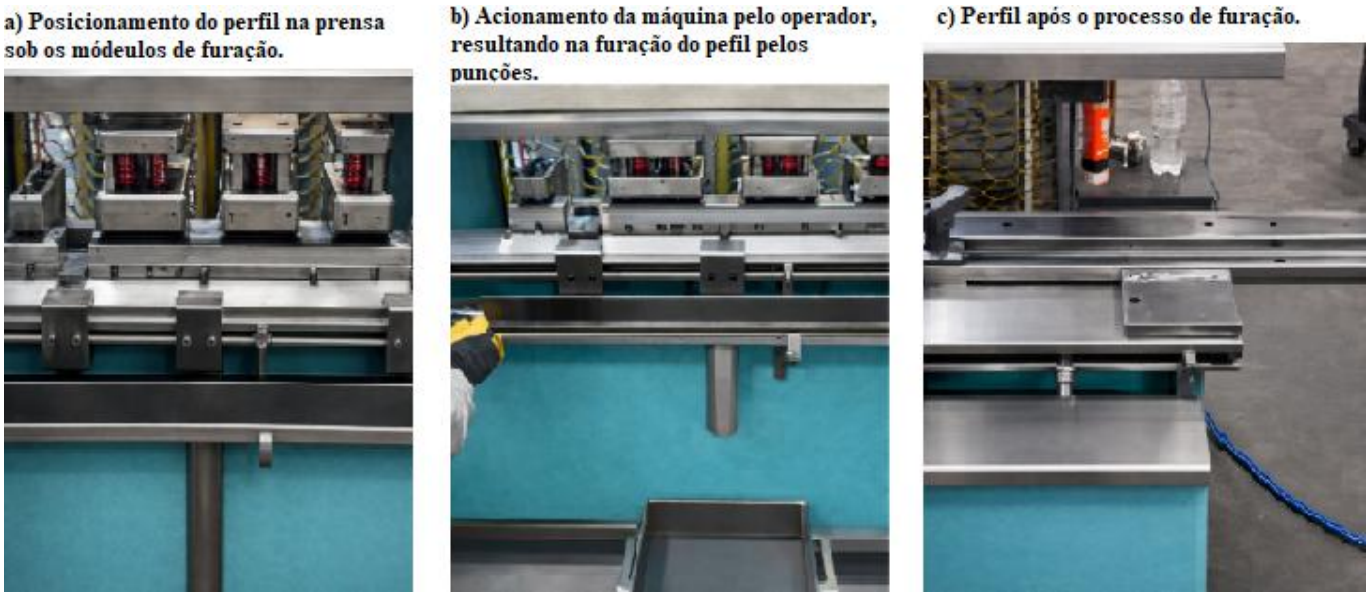


Figura 6 - Etapas do processo de furação de perfil metálico em prensa.
Fonte: Os autores (2026).

Estudo ACV Realizado:

1a Etapa: Objetivos, Escopo e Unidade Funcional:

O objetivo do estudo foi comparar os impactos ambientais associados ao processamento de chapas metálicas de diferentes espessuras: 2,00 e 2,54 mm. O escopo do trabalho foi definido como portão a portão, também denominado *"gate to gate"*. As fronteiras do sistema abrangem exclusivamente os processos internos da empresa, incluindo as operações de perfilação, recorte e estampagem, não sendo consideradas, de forma quantitativa, as etapas de produção do aço, transporte, uso e final de

vida, as quais são abordadas apenas de maneira qualitativa. Levando em conta as diferentes aplicações possíveis para os perfis metálicos produzidos, foi adotada a tonelada (t) de perfil metálico produzido como unidade funcional.

2a Etapa: Coleta de Dados:
A obtenção do inventário foi realizada a partir da coleta e análise de dados operacionais dos processos de transformação mecânica de chapas metálicas. Os dados de produção foram obtidos a partir de registros internos da empresa, incluindo relatórios de produção mensal e anual. Inicialmente, foram levantados os tempos de processamento para cada operação, considerando diferentes espessuras de material, os quais serviram como base para a estimativa do consumo energético. O consumo de energia elétrica foi determinado a partir da relação entre a potência dos equipamentos e o tempo de operação, permitindo a quantificação do consumo em kWh para cada etapa do processo. Com base nesses valores, foram calculados indicadores de desempenho, como o consumo específico de energia por tonelada processada. O consumo de energia para processar cada perfil foi obtido multiplicando a potência efetiva de cada motor pelo tempo de processamento, conforme dados fornecidos pelo setor de manutenção da empresa.

3a Etapa: Avaliação de Impacto e Categorias de Impacto
O cálculo do impacto ambiental foi realizado com base nos dados de consumo de energia elétrica obtidos no Inventário do Ciclo de Vida. Inicialmente, os valores de energia consumida em cada processo (kWh), foram consolidados por unidade funcional, permitindo a análise comparativa entre as diferentes condições operacionais e espessuras de material. A quantificação dos impactos ambientais foi conduzida por meio da conversão do consumo energético em emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), utilizando o Fator de Emissão de CO_2, adotando-se valores referenciados na literatura ((Flórez-Orrego, Silva, and Oliveira Jr. 2015) para a matriz energética Brasileira. Essa abordagem possibilitou estabelecer uma relação direta entre o desempenho energético do processo e suas implicações ambientais. Adicionalmente, foram calculados indicadores de impacto, como as emissões específicas por tonelada processada, permitindo avaliar a eficiência ambiental dos processos analisados.

Resultados e Discussão

Análise Comparativa da Produção de Aço Processado em Escala Empresarial e Nacional
A produção de aço constitui um dos principais indicadores do desempenho industrial, sendo diretamente associada ao nível de atividade econômica e à demanda dos setores produtivos. No contexto analisado, observa-se que a empresa em estudo apresenta uma capacidade anual de processamento superior a cinco mil toneladas de aço conformado, evidenciando sua inserção no setor de transformação metalmecânica, conforme indicado na Tabela 1.

De forma comparativa, os dados disponibilizados pelo Instituto Aço Brasil indicam que a produção nacional de aço bruto atingiu valores expressivos no período de 2023 a 2025, alcançando aproximadamente 33,6 milhões de toneladas ao final da série histórica considerada, também indicado na Tabela 1. Tal volume reflete a relevância da indústria siderúrgica brasileira no atendimento às demandas internas e externas.

Ano	2023	2024	2025
Quantidade de aço processado na empresa (t) [% do total]	6.495,49 [0,02]	7.425,99 [0.02]	5.098,92 [0,01]
Quantidade total de aço produzido no Brasil (t) (1)	32.000.000,00	33.000.000,00	33.600.000,00

Tabela 9: Comparativo entre as quantidades de aço processadas na empresa e a produção nacional de aço.

Do ponto de vista proporcional, observa-se que o volume processado pela empresa representa uma fração (cerca de 0,02%) da produção nacional, o que é esperado considerando a diferença de escala entre unidades industriais de transformação e o setor siderúrgico de base. Ainda assim, a atuação da empresa é relevante no contexto regional, especialmente no fornecimento de produtos conformados para cadeias produtivas específicas, reforçando a importância das indústrias de transformação na agregação de valor ao aço produzido no país.

A análise do consumo de energia elétrica em função da quantidade de aço processada constitui um importante indicador de desempenho energético em processos industriais, especialmente em operações envolvendo transformação mecânica de materiais metálicos. Esse indicador permite avaliar a eficiência operacional, identificar variações de produtividade e propor melhorias no uso racional de energia.

Uma análise mais detalhada pode ser realizada por meio do consumo específico de energia (kWh/t), indicador obtido pela relação entre o consumo elétrico e a tonelagem processada, permitindo avaliar a eficiência energética do processo independentemente do volume produzido. A Tabela 2 apresenta a relação entre a tonelagem processada por espessura nos anos de 2024 e 2025 e as respectivas emissões de CO_2, considerando perfis metálicos similares destinados à mesma aplicação, porém com espessuras distintas (2,00 mm e 2,65 mm) e fornecidos a clientes diferentes. Observam-se variações nas emissões ao longo dos meses, influenciadas pelo volume de produção e pelo consumo específico de energia, destacando-se o aumento das emissões associado ao perfil de 2,00 mm em 2025 e a redução observada para o perfil de 2,65 mm, indicando diferenças de demanda e eficiência operacional entre os processos analisados.

Produção de perfis metálicos e emissões de CO_2 por espessura (t/mês) – 2024 e 2025								
Mês	2024				2025			
	2,65 mm		2,00 mm		2,65 mm		2,00 mm	
	t perfis	emissões	t perfis	emissões	t perfis	emissões	t perfis	emissões
Jan	57,66	0,071	49,51	0,061	74.35	0,110	37.73	0,056
Fev	79,53	0,100	59,70	0,075	59.20	0,092	38.09	0,059
Mar	83,48	0,097	42,28	0,049	20.36	0,039	26.94	0,052
Abr	85,66	0,127	67,42	0,100	41.90	0,070	20.68	0,035
Mai	41,82	0,051	77,33	0,094	28.95	0,074	9.94	0,026
Jun	107,89	0,143	53,84	0,071	29.07	0,084	30.08	0,087
Jul	81,38	0,108	51,32	0,068	35.91	0,084	34.75	0,081
Ago	67,96	0,094	60,80	0,084	5.28	0,011	30.75	0,070
Set	52,97	0,076	30,60	0,044	18.82	0,043	37.81	0,086
Out	89,09	0,123	31,18	0,043	53.26	0,087	36.99	0,060
Nov	49,49	0,081	17,46	0,029	18.14	0,069	20.76	0,079
Dez	35,35	0,087	10,42	0,026	30.84	0,078	5.60	0,014
Total Anual	832,28	1,158	551,87	0,744	415,870	0,842	330,122	0,705

Tabela 2 - Comparativo entre a produção de chapas de cada espessura, com as emissões de CO_2 correspondentes

De acordo com o GHG Protocol (2024), as emissões indiretas provenientes da eletricidade adquirida são classificadas como Escopo 2, sendo amplamente utilizadas em inventários corporativos de gases de efeito estufa. Esse tipo de abordagem permite quantificar o impacto ambiental associado ao consumo energético, mesmo quando a geração de energia ocorre fora dos limites operacionais da organização.

A quantificação dessas emissões é comumente realizada por meio da aplicação de fatores de emissão, que relacionam a quantidade de gases de efeito estufa emitida por unidade de energia consumida. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2024), o fator de emissão da matriz elétrica brasileira apresenta valores relativamente baixos em comparação a outros países, em função da elevada participação de fontes renováveis, como hidrelétricas, eólica e solar.

A metodologia de cálculo baseia-se na multiplicação do consumo de energia elétrica pelo fator de emissão correspondente, conforme recomendado por diretrizes internacionais de inventários de emissões. Para a estimativa das emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas ao consumo de energia elétrica, foi adotado um fator de emissão de 0,0385 kg CO_2/kWh, valor compatível com a matriz energética brasileira, predominantemente renovável, conforme dados de inventários nacionais de emissões (MCTI) e diretrizes do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Esse fator permite converter o consumo energético em emissões equivalentes de CO_2, que neste trabalho foi reaizado conforme a equação 01.

$$CO_2\ mensal(ton) = Tonelagem(ton) \times kWh/ton \times 0{,}0385 \div 1000 \qquad (01)$$

No contexto da engenharia de produção, a utilização de indicadores normalizados, como kg de CO_2 por tonelada processada, possibilita uma avaliação mais precisa do desempenho ambiental dos processos, uma vez que reduz a influencia de variações no volume produtivo. Dessa forma, torna-se possível comparar eficiência energética ao longo do tempo e identificar oportunidades de melhoria no uso de recursos.

Entretanto, destaca-se que o uso de fatores médios nacionais representa uma simplificação da realidade, não contemplando variações temporais na matriz energética, como aquelas decorrentes de condições hidrológicas ou despacho de usinas termelétricas. Ainda assim, essa abordagem é considerada adequada para estudos comparativos e análises de desempenho em nível industrial.

Na Tabela 3 os valores de emissão de CO_2 foram calculados com base no consumo energético específico por peça e no fator de emissão de 0,0385 kg CO_2/kWh. Observa-se que o perfil com espessura de 2,65 mm apresentou maior consumo energético e, consequentemente, maior emissão específica de CO_2 em todas as etapas do processo produtivo.

$$CO^2 = \frac{kWh}{peça} \times 0{,}0385 \qquad (02)$$

Etapa	Potência (kW)	Tempo (s)	kWh/peça	CO_2 (g/peça)	Potência (kW)	Tempo (s)	kWh/peça	CO_2 (g/peça)
	Espessura 2,00 mm				Espessura 2,65 mm			
Perfilar	3,105	9	0,00776	0,299	3,105	13	0,01121	0,432
Recorte	0,828	12	0,00276	0,106	0,828	15	0,00345	0,133
Estampo	0,2484	23	0,00159	0,061	0,2484	25	0,00172	0,066
Total	—	—	**0,01211**	**0,466**	—	—	**0,01639**	**0,631**

Tabela 3 - Comparação do consumo energético e emissão de CO_2 entre perfis de 2,00 mm e 2,65 mm.

Conforme apresentado na Tabela 3, o consumo específico de energia elétrica e as emissões associadas de CO_2 aumentam com a elevação da espessura do material processado. Para a espessura de 2,00 mm, o consumo energético total foi de 0,01211 kWh/peça, resultando em emissão específica de aproximadamente 0,466 g CO_2/peça. Já para a espessura de 2,65 mm, o consumo atingiu 0,01639 kWh/peça, correspondente a uma emissão de 0,631 g CO_2/peça. Os resultados demonstram um incremento de aproximadamente 35,3% tanto no consumo energético quanto nas emissões de CO_2 por peça produzida. Esse aumento está diretamente relacionado ao maior tempo de processamento nas etapas produtivas, especialmente no processo de perfilação, que apresenta maior potência instalada e maior contribuição para o consumo energético total do sistema.

Considerações Finais

As análises realizadas neste estudo permitiram avaliar o consumo específico de energia elétrica e as emissões associadas de CO_2 ao longo das etapas do processo de conformação de perfis metálicos, considerando diferentes espessuras de matéria-prima. Os resultados demonstraram que o aumento da espessura do material de 2,00 mm para 2,65 mm provoca elevação significativa tanto no consumo energético quanto nas emissões específicas de dióxido de carbono por peça produzida.

Para a espessura de 2,00 mm, o consumo energético total foi de 0,01211 kWh/peça, resultando em emissão específica aproximada de 0,466 g CO_2/peça. Já para a espessura de 2,65 mm, o consumo atingiu 0,01639 kWh/peça, com emissão correspondente de 0,631 g CO_2/peça. Os resultados indicaram um incremento de aproximadamente 35,3% no consumo energético e nas emissões de CO_2 associadas ao processamento do material de maior espessura.

Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento do tempo de processamento em todas as etapas produtivas, especialmente no processo de perfilação, que apresentou a maior contribuição para o consumo energético total devido à sua maior potência efetiva instalada e maior tempo de operação. As etapas de recorte e estampo também apresentaram aumento no consumo energético e nas emissões, porém com menor representatividade no impacto global do processo.

Dessa forma, verifica-se que a espessura do material constitui um fator determinante na eficiência energética e no desempenho ambiental do processo produtivo, influenciando diretamente o consumo específico de energia elétrica e a intensidade das emissões de CO_2. Os resultados reforçam a importância da otimização dos parâmetros operacionais, sobretudo nas etapas de maior demanda energética, visando maior eficiência produtiva e redução dos impactos ambientais associados ao consumo de energia elétrica.

Sob a perspectiva da sustentabilidade industrial, a redução do consumo energético por peça representa uma estratégia relevante para diminuição de custos operacionais e mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, ações como otimização dos tempos de processamento, modernização de equipamentos, melhoria da eficiência operacional e adequação da espessura do material às exigências funcionais do produto final mostram-se fundamentais para promover processos produtivos mais sustentáveis.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da análise para diferentes materiais, geometrias de perfis e condições operacionais, bem como a avaliação detalhada das emissões em termos de tonelagem processada e integração dos dados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), visando uma análise mais abrangente dos impactos ambientais relacionados ao processo.

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, pelo apoio recebido e pela empresa onde foi realizado o estudo de caso por autorizar a realização dessa pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABNT. NBR ISO 14040: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT. NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ASHBY, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). Engenharia de Materiais 1 uma introdução às propriedades, aplicações e projeto. Campus/Elsevier, Org.; 3a.

BAUMANN, H., & TILLMAN, A. (2004). The Hitch Hiker's Guide to LCA An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application. Studentlitteratur.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Fatores de emissão de CO_2 pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional. Disponível em: https://www.gov.br/mcti. Acesso em: 26/04/2026.

CALLISTER, W. D., & .RETHWISCH, D. G. (2020). Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução (LTC, Org.; 10o ed).

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.

CURRAN, A. M., & WILEY, J. (2012). Book Review Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products edited by. 1–611. https://doi.org/10.1111/jiec.12217/abstract

DIETER, G. E., SERGIO DE SOUSA SILVA, A., HENRIQUE DE ALMEIDA, L., & EMÍLIO VALADÃO DE MIRANDA, P. (2017). Metalurgia Mecânica GUANABARA DOIS.

FLÓREZ-ORREGO, DANIEL, JULIO A.M. SILVA, SILVIO DE OLIVEIRA Jr. (2015). "Exergy and Environmental Comparison of the End Use of Vehicle Fuels: The Brazilian Case." Energy Conversion and Management 100 (August): 220–31. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.074.

GEISSDOERFER, M. et al. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm. The Circular Economy, 143, 757–768.

GHG PROTOCOL. Corporate Accounting and Reporting Standard. World Resources Institute, 2004.

GUINÉE, J. B. ., BRUIJN, HANS., DUIN, R. VAN., HUIJBREGTS, M. A. J. ., GORREE, MARIEKE., HEIJUNGS, REINOUT., HUPPES, G. ., KLEIJN, R. ., KONING, ARJAN., OERS, LAURAN., WEGENER SLEESWIJK, ANNEKE., SUH, SANGWON., & UDO DE HAES, H. A. . (2004). Handbook on Life Cycle Assessment : Operational Guide to the ISO Standards.

HEIJUNGS, R., & SUH, S. (2002). The Computational Structure of Life Cycle Assessment (Springer, Org.; 2002o ed).

Instituto Aço Brasil. Estatísticas do setor siderúrgico. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/estatisticas/. Acesso em: 27 abr. 2026.

LEHNI, M. WBCSD.(2000). Ecoefficiency: Creating more value with less impact. World Business Council for Sustainable Development Conches-Geneva, Switzerland.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação Fator de emissão de CO_2 na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mcti. Acesso em: 27 abr. 2026.

Sistema de Registro Nacional de Emissões. Emissões de CO_2 do setor elétrico brasileiro. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/sirene. Acesso em: 27 abr. 2026.

TIMOTHY, S., GAUCHEY, M. (2025). A cost-effective cold roll-forming FE model for industrial applications. Materials, Research Forum LLC, DOI: 10.21741/9781644903599-106.

TOTTEN, G. E., HOWES, M. A. H., & INOUE, TATSUO. (2002). Handbook of residual stress and deformation of steel. ASM International.

PRÁTICAS ESG EM UMA PEQUENA EMPRESA COUREIRO-CALÇADISTA: EVIDÊNCIAS, LACUNAS E DESAFIOS

1 Júlio César Ramos, 2 Daiana Rodrigues, 3 Lara De Oliveira Bierei, 4 Giane Daniela de Oliveira, 5 Raquel da Silva Bechtold, 6 Andressa Bassani, 7 Paulo Emílio Vogt Frank, 8 Dusan Schreiber

1 Universidade Feevale, e-mail: engjuliocramos@gmail.com; 2 Universidade Feevale, e-mail: daiadaianardg@gmail.com; 3 Universidade Feevale, e-mail: eng.amb.lara@gmail.com; 4 Universidade Feevale, e-mail: gianedeoliveira26@gmail.com; 5 Universidade Feevale, e-mail: raquelbechtold@hotmail.com; 6 Universidade Feevale, e-mail: arq.andressab@gmail.com; 7 Universidade Ulbra, e-mail:franke_paulo@yahoo.com.br; 8 Universidade Feevale, e-mail: dusan@feevale.br

Palavras-chave: ESG; Pequenas e Médias Empresas; Setor Coureiro-Calçadista.

Resumo

Este artigo analisa as práticas ESG *(Environmental, Social and Governance)* em uma pequena empresa do setor coureiro-calçadista. O estudo investiga a Empresa Delta, fabricante de bolsas femininas em couro localizada em Novo Hamburgo/RS, fundada em 1997, com 16 funcionários. A pesquisa adota abordagem qualitativa, estruturada como estudo de caso único exploratório e descritivo. Os dados foram coletados em abril de 2026 por meio de entrevistas semiestruturadas com uma profissional da empresa, complementadas por checklist de observação, levantamento documental e análise de nuvem de palavras via software IRaMuTeQ. Os resultados indicam que a dimensão ambiental apresenta o maior conjunto de práticas verificáveis, uso de recouro, energia solar e gestão de resíduos, orientadas predominantemente pela conformidade legal. As dimensões social e de governança revelam lacunas mais acentuadas: iniciativas pontuais existem, mas carecem de formalização. Os achados apontam para uma condição de incompletude estruturada, comum às PMEs industriais sem pressão externa suficiente para induzir a sistematização das práticas ESG.

Introdução

A consolidação do ESG (Environmental, Social and Governance) como critério de avaliação corporativa representa uma das inflexões mais significativas do ambiente de negócios nas últimas décadas. Desde sua formalização em 2004, no relatório "Who Cares Wins" das Nações Unidas, o conceito deixou de ser diferencial voluntário para tornar-se parâmetro de competitividade, acesso a capital e legitimidade organizacional (Dayal et al., 2024). Bashir et al. (2023) documentam que a avaliação ESG passou a receber atenção crescente tanto no ambiente acadêmico quanto corporativo, com efeitos mensuráveis sobre reputação, custo de capital e relações com stakeholders.

Esse deslocamento impõe desafios particulares às pequenas e médias empresas industriais. Recursos financeiros limitados, estruturas organizacionais enxutas, ausência de mecanismos formais de governança. Gregory (2024) demonstrou que empresas de maior porte apresentam escores ESG sistematicamente superiores. São exatamente essas empresas, contudo, que concentram parcela expressiva da produção industrial brasileira e a maior parte dos postos de trabalho no setor manufatureiro.

O setor coureiro-calçadista do Rio Grande do Sul situa-se no centro desse paradoxo. O Vale do Rio dos Sinos reúne historicamente uma das maiores concentrações de produção de calçados e artefatos de couro do país, composta majoritariamente por PMEs com processos intensivos em mão de obra. Iniciativas como os selos ABVTEX e Origem Sustentável indicam que a agenda ESG começa a alcançar esse conjunto de empresas, ainda que de forma seletiva (ABVTEX, 2025; Origem Sustentável, 2022). A pergunta não é se ESG é relevante para essas empresas. É o que acontece quando uma pequena empresa do setor tenta, concretamente, operacionalizá-lo.

É essa pergunta que orienta este estudo. A pesquisa analisa as práticas ESG na Empresa Delta, fabricante de bolsas femininas em couro, fundada em 1997, com 16 funcionários, localizada em Novo Hamburgo/RS. O objetivo é identificar avanços, lacunas e condicionantes específicos nas três dimensões do framework ESG em uma PME do setor coureiro-calçadista. O trabalho está organizado em cinco seções: introdução, revisão teórica, metodologia, análise e discussão dos resultados e considerações finais.

Revisão Teórica

1. Origem e evolução do conceito ESG

O termo ESG foi formalizado em 2004, no relatório "Who Cares Wins", iniciativa das Nações Unidas que propôs um framework para avaliar fatores ambientais, sociais e de governança no desempenho corporativo. O documento surgiu em um momento de profunda desconfiança nas instituições: escândalos contábeis, crises de governança e a percepção crescente de que a maximização do lucro, tomada isoladamente, não garantia a sustentabilidade das organizações no longo prazo. Dayal et al. (2024) situam esse marco como ponto de inflexão em relação ao conceito anterior de investimento socialmente responsável, surgido nas décadas de 1960 e 1970. A diferença é de lógica. O investimento socialmente responsável operava pela exclusão de setores considerados nocivos; o ESG passou a orientar a identificação ativa de empresas que atendem critérios de responsabilidade em múltiplas dimensões simultaneamente.

A consolidação do conceito não foi linear. Bashir et al. (2023) argumentam que a avaliação do desempenho ESG ganhou importância crescente tanto nas investigações acadêmicas quanto no ambiente corporativo, recebendo atenção de partes interessadas

em níveis nacional e internacional. Engajar-se em atividades ESG pode reduzir o custo de capital, fortalecer a reputação e construir relações de confiança com funcionários, consumidores, investidores e comunidades, achado que Gupta e Chaudhary (2023) corroboram ao identificar que índices ESG em economias emergentes apresentam perfil de risco ajustado superior ao de índices convencionais. O desempenho ESG, portanto, não é apenas compromisso ético. É ativo estratégico.

A extensão do conceito ao setor financeiro revela nuances importantes. Azmi et al. (2021) investigaram 251 bancos em 44 economias emergentes e identificaram uma relação não linear entre atividade ESG e valor bancário: níveis moderados de engajamento geram retornos positivos, mas investimentos excessivos apresentam retornos decrescentes. As atividades ambientais exercem maior influência sobre o valor das instituições, o que sugere que stakeholders em mercados emergentes respondem com especial sensibilidade ao comprometimento ambiental das organizações.

O tamanho da empresa importa nessa equação. Gregory (2024) demonstrou que empresas de maior porte tendem a apresentar escores ESG sistematicamente mais elevados, independentemente do setor ou da agência de rating utilizada, padrão que Gjergji et al. (2021) confirmam ao identificar que a divulgação ESG reduz o custo de capital em PMEs europeias, mas com efeito moderado pela maturidade das práticas de reporte. Pequenas e médias empresas partem de uma posição estruturalmente desfavorável. O acesso aos benefícios do ESG não é automático. Depende de capacidade de comunicação que muitas PMEs ainda não desenvolveram.

No Brasil, percebe-se no setor coureiro-calçadista um avanço nos conceitos ESG, através dos selos ABVTEX da entidade Associação Brasileira do Varejo Têxtil e Selo Origem Sustentável com o apoio das entidades Abicalçados e Assintecal. Alinhando os processos produtivos com indicadores ESG com reconhecimento internacional (ABVTEX, 2025; ORIGEM SUSTENTÁVEL, 2022). Esse movimento encontra evidência empírica no estudo de Ramos et al. (2025), que analisaram a adoção de práticas ESG em uma indústria coureiro-calçadista do Vale do Rio dos Sinos (RS) e identificaram avanços nas dimensões ambiental e social, com destaque para o uso de energia solar fotovoltaica, materiais recicláveis e políticas de valorização do trabalho alinhadas às diretrizes da OIT. Os autores, contudo, apontam que a dimensão de governança ainda apresenta lacunas relevantes, como a ausência de um comitê dedicado ao ESG, o que limita a sistematização e a transparência das ações adotadas.

O conjunto dessas evidências aponta para uma transformação estrutural. O ESG deixou de ser diferencial voluntário para tornar-se parâmetro de competitividade, acesso a capital e legitimidade organizacional. Investidores institucionais, reguladores e consumidores passaram a incorporar critérios ESG em suas decisões, ampliando a pressão sobre empresas de todos os portes. Esse deslocamento impõe desafios particulares às pequenas e médias empresas industriais, tema central desta pesquisa e fio condutor dos blocos seguintes.

2. Dimensão Ambiental

A dimensão ambiental é, entre os três pilares do ESG, a que acumula maior evidência empírica e a que exerce impacto mais direto sobre as decisões de investimento e inovação nas organizações. Khamisu et al. (2024) demonstram, por meio de modelagem estrutural interpretativa fuzzy, que pressões regulatórias e engajamento de stakeholders constituem os fatores com maior poder de condução do sistema. O comprometimento ambiental não é ponto de chegada. É resultado de forças que se retroalimentam.

Wang e Li (2026) investigaram o impacto da certificação de fábricas verdes sobre o desempenho ESG de empresas listadas na China entre 2012 e 2023, encontrando que a dimensão ambiental apresentou melhorias mais acentuadas do que a de governança após a certificação. Faz sentido. Programas de certificação voluntária operam principalmente por canais técnicos e operacionais, produzindo ganhos mensuráveis em eficiência energética e gestão de emissões antes de qualquer alteração nas estruturas organizacionais mais profundas. Burinskienė et al. (2025) reforçam esse achado ao identificar, em empresas do setor industrial na Europa e nos Estados Unidos, que melhorias ambientais tendem a preceder ganhos de rentabilidade, com o retorno financeiro operando com defasagem temporal. A sequência importa.

O vínculo entre práticas ambientais e inovação ganha especificidade no contexto das PMEs. Fülöp e Cifuentes-Faura (2026) analisaram 317 pequenas e médias empresas romenas e constataram que medidas como eficiência energética, redução de emissões e desenvolvimento de produtos ecológicos exercem o efeito mais forte sobre a inovação verde, com coeficiente de caminho padronizado de 0,378 e correlação de $r = 0,801$, resultado que encontra eco em Kang e Hew (2025), para quem o acesso a financiamento atua como variável mediadora condicional nesses processos: PMEs com maior capacidade financeira convertem práticas ambientais em ganhos operacionais com mais consistência. Recursos limitados não impedem a transformação. Orientam o caminho por onde ela começa.

Okeke (2025) acrescenta uma perspectiva crítica precisa ser considerada. Ao examinar cadeias de suprimentos na Nigéria, o autor observou que a consciência ambiental vinculada ao ESG produz efeitos mediadores significativos sobre a descarbonização, mas encontra barreiras severas em restrições financeiras, lacunas de infraestrutura e inconsistências regulatórias. A existência formal de regulação ambiental não basta. Em contextos institucionalmente frágeis, é a capacidade efetiva de fiscalização e aplicação das normas que determina se a política ambiental produz mudança real nas organizações. O argumento ressoa diretamente para economias emergentes onde o aparato regulatório existe, mas opera de forma seletiva e descontínua.

3. Dimensão Social

A dimensão social do ESG ocupa uma posição singular no debate acadêmico: é reconhecida como estratégica e, ao mesmo tempo, tratada como a mais difícil de operacionalizar. Esposito De Falco et al. (2021) investigaram 222 PMEs (Pequenas e Médias Empresas) inovadoras italianas e demonstraram que os stakeholders contratuais, especialmente funcionários e redes de clientes e fornecedores, exercem pressão superior à dos stakeholders comunitários sobre a adoção de ecoinovações. A presença

de vínculos formais induz as pequenas empresas a responder mais rapidamente às expectativas sociais. Em PMEs com estruturas de governança enxutas e decisões concentradas, essa lógica relacional substitui os mecanismos formais típicos das grandes corporações.

Os funcionários requerem atenção específica, uma vez que exercem influência por meio de três dimensões inter-relacionadas: como beneficiários das melhorias nas condições de trabalho, como consumidores dos produtos da própria empresa e como cidadãos dotados de sensibilidade ambiental, conforme apontam Esposito De Falco et al. (2021). Trata-se, portanto, de uma pressão que não é externa, mas que emerge do interior da própria organização.

A relação entre regulação e comportamento social das PMEs emerge com clareza na literatura. Lam et al. (2025) investigaram mais de 1.400 PMEs em Hong Kong e constataram que essas empresas preferem alguma forma de regulação a um ambiente completamente voluntário, resultado que Zhou e Rahat (2025) complementam ao identificar, em amostra de PMEs europeias, que fatores ESG sociais influenciam positivamente o acesso a financiamento empreendedor, mas apenas quando respaldados por marcos regulatórios que conferem credibilidade às práticas declaradas. A disposição está presente, contudo, em muitos contextos, ainda carece de diretrizes claras e de incentivos efetivos.

Jin (2025) oferece perspectiva macroeconômica complementar. Ao examinar dez países da OCDE entre 2005 e 2020, o autor identificou que o crescimento das receitas das PMEs contribui positivamente para a expansão de energia renovável no curto e no longo prazo. PMEs financeiramente mais sólidas tendem a direcionar recursos para práticas sustentáveis. O fortalecimento econômico dessas empresas, portanto, é condição habilitadora para o engajamento social. Sem base financeira, a dimensão social permanece aspiracional.

Cardillo e Basso (2025) apresentam um estudo que tensiona o debate. Ao examinarem 2.987 observações empresa-ano em economias do BRICS, verificaram que a dimensão social não demonstrou associação estatisticamente significativa com os indicadores financeiros analisados. Tal achado não invalida a relevância desse pilar, mas indica que sua conversão em valor econômico está condicionada à presença de arranjos institucionais adequados, frequentemente ausentes nos contextos em que operam as PMEs industriais. Na ausência de mecanismos efetivos que permitam a consumidores, trabalhadores e à sociedade civil exercer pressão e reconhecer iniciativas sociais, estabelece-se um ambiente em que esses esforços não se traduzem em retornos mensuráveis. A intencionalidade está presente, porém o mecanismo de reconhecimento permanece ausente.

4. Dimensão Governança

A governança é o pilar que condiciona os demais. Não se trata de exigência burocrática. Trata-se da estrutura que determina se os compromissos ambientais e sociais saem do papel ou permanecem como declaração de intenção. Para Nuhu e Alam (2024), que examinaram 1.260 observações empresa-ano no setor de energia dos países BRICS entre 2010 e 2019, apenas 37% das empresas atingiam níveis adequados de divulgação ESG, com alta variabilidade entre os casos. O dado é sintomático. Mesmo em grandes corporações de economias emergentes com peso relevante no comércio global, a transparência em governança segue sendo exceção, não regra.

A composição do conselho de administração tem consequências mensuráveis. Os achados de Nuhu e Alam (2024) indicam que diversidade de gênero, independência dos conselheiros e frequência de reuniões exercem impacto positivo e significativo sobre o nível de divulgação ESG, resultado que Jayachandran et al. (2026) e Biju et al. (2025) corroboram ao identificar, em economias emergentes, que gestores com percepção estratégica da governança produzem práticas ESG mais consistentes e integradas ao modelo de negócio. A qualidade da governança interna, portanto, não é variável decorativa. Opera com efeito real sobre o que a empresa decide tornar público.

O quadro se complica quando se examina a estrutura de propriedade. Bayong et al. (2025), ao investigarem 246 empresas manufatureiras na África Subsaariana, identificaram que propriedade gerencial, estatal e estrangeira impulsionam a divulgação ESG, ao passo que a propriedade por acionistas majoritários concentrados não produz efeito significativo, padrão que Biju et al. (2025) confirmam ao mostrar que a relação entre governança e desempenho ESG é mais robusta em estruturas com maior dispersão de propriedade. O horizonte temporal do proprietário é que define a direção. Acionistas concentrados tendem a priorizar retornos imediatos, e a sustentabilidade recua para segundo plano.

Há ainda o papel moderador do ambiente regulatório. Conforme apontado por Bayong et al. (2025), em contextos normativos mais robustos a correlação entre propriedade gerencial e divulgação ESG se amplifica de forma estatisticamente expressiva. A regulação não age sozinha: intensifica pressões que já existem na estrutura acionária, tornando mais custoso para os gestores ignorar as demandas de transparência.

Azinogo e Erasmus (2025) direcionam a análise para o ambiente institucional externo às organizações. Na ausência de auditores governamentais qualificados e de marcos legais inequívocos, os mecanismos formais de governança corporativa tendem a perder efetividade prática. Com base em grupos focais realizados com especialistas em auditoria pública em Gana, Serra Leoa e África do Sul, os autores evidenciam que capacidade técnica, disponibilidade de recursos orçamentários e clareza de mandato legal constituem condições indispensáveis para o funcionamento efetivo da governança. Assim, ainda que existam estruturas formalmente instituídas, sua operacionalização demanda condições adicionais que extrapolam o plano normativo.

O argumento se completa com Cardillo e Basso (2025), que observaram, ao analisarem economias BRICS, que mesmo práticas centrais de governança podem não gerar impacto financeiro mensurável quando faltam condições institucionais que pressionem e recompensem as iniciativas. Para as PMEs industriais, a implicação é direta. Adotar mecanismos de governança sem respaldo regulatório e sem monitoramento externo efetivo tende a produzir efeitos limitados, independentemente da intenção declarada. A governança, como os demais pilares do ESG, só funciona quando o ambiente ao redor também funciona.

Metodologia

A pesquisa adota abordagem qualitativa, estruturada como estudo de caso único de caráter exploratório e descritivo (Gil, 2008; Yin, 2015). A empresa investigada está localzada em Novo Hamburgo/RS e pertence ao setor coureiro-calçadista. Para preservar a confidencialidade, é identificada pelo pseudônimo Empresa Delta. Sua seleção considerou relevância setorial, acesso aos dados internos e aderência ao perfil de pequena empresa industrial com práticas ESG em andamento.

Campo	Informação
Localização	Novo Hamburgo/RS
Ano de fundação	1997
Setor econômico	Coureiro-calçadista
Principais produtos	Bolsas femininas em couro
Número de funcionários	16
Percentual de vendas	98% mercado brasileiro / 2% mercado externo

Tabela 1 – Dados da Empresa Delta
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A coleta de dados foi realizada em abril de 2026 e combinou entrevistas semiestruturadas, levantamento documental e observação participante (Gil, 2008; Prodanov & Freitas, 2013). A entrevistada identificada como E1 foi selecionada em função do cargo, tempo de experiência e atuação direta nas dimensões ESG investigadas.

Cód.	Cargo	Instrumento	Idade	Experiência	Escolaridade/Sexo
E1	Analista Financeira	Quest. ESG — Q1 a Q12	30	14 anos	Ensino Médio / F

Tabela 2 – Perfil da entrevistada
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O instrumento de coleta organizou 12 questões abertas segundo as três dimensões ESG: ambiental, social e de governança, conforme a Tabela 3. O roteiro foi validado por especialista com título de doutor em Administração.

Dimensão ESG	Questões Orientadoras
Ambiental	Q1. Qual é a Política Ambiental da empresa? Q2. Quem é responsável pelo controle de registros/documentos do programa de gestão ambiental? Q3. Quais as principais iniciativas para reduzir o impacto ambiental no processo de fabricação? Q4. Vocês utilizam materiais sustentáveis ou recicláveis na produção? Q5. A empresa adota práticas para minimizar o desperdício de materiais? Q6. Como são gerenciados os resíduos industriais gerados? Q7. Quais ações de prevenção aos impactos ambientais foram adotadas nos últimos dez anos?
Social	Q8. Quais políticas garantem condições de trabalho seguras e justas? Q9. Como a empresa envolve as comunidades locais? Q10. A empresa investe em programas de capacitação dos funcionários?
Governança	Q11. Como a governança corporativa aborda a transparência e conformidade com padrões ambientais e sociais? Q12. Existe um comitê dedicado ao ESG?

Tabela 3 – Questionário ESG
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Soma-se às entrevistas a aplicação de um checklist de observação e levantamento documental com 12 itens distribuídos entre as dimensões ambiental, social e de governança, também validado pelo mesmo especialista. O tratamento dos dados textuais utilizou o software IRaMuTeQ, que gerou nuvem de palavras como evidência visual complementar. A análise qualitativa de conteúdo (Bardin, 2004) orientou a codificação e categorização, com triangulação entre entrevistas, documentos e registros de observação (Yin, 2015).

Análise e Discussão dos Resultados

1. Dimensão Ambiental do ESG

Os A dimensão ambiental é, entre os três pilares do ESG, aquela em que a Empresa Delta demonstra maior consistência de práticas. O ponto de partida, contudo, revela uma lógica específica: conformidade antes de estratégia. E1 é direta ao descrever a orientação que governa as ações ambientais da empresa: "a empresa orienta suas práticas ambientais em conformidade com as

exigências legais e normativas vigentes, adotando procedimentos como a segregação adequada de resíduos, especialmente aparas de couro, e o manejo responsável dos materiais gerados no processo produtivo" (E1, Q1). O que a lei exige, a empresa cumpre. O que vai além disso permanece em aberto.

O levantamento documental por meio do checklist de observação confirma parcialmente esse quadro. Dos sete itens verificados na dimensão ambiental, seis foram identificados com evidências presentes. O único item sem marcação foi a existência e divulgação formal de uma Política Ambiental, o que já antecipa a tensão que percorre toda a dimensão: práticas operacionais presentes, sistematização institucional ausente.

Há avanços concretos que merecem reconhecimento. A adoção do recouro como insumo produtivo articula lógica produtiva e responsabilidade ambiental. Conforme E1, "o recouro é considerado ecologicamente correto, pois sua composição é integralmente constituída por fibras de couro provenientes de sobras geradas nos curtumes" (E1, Q4). O material reincorporado à cadeia evita descarte e reduz pressão sobre recursos primários, expressão concreta de economia circular (Thompson-Bahm, Teixeira e Lobo, 2025). A gestão de resíduos segue lógica semelhante: "os resíduos industriais são segregados e armazenados em locais apropriados [...] sendo posteriormente encaminhados para a UTRESA" (E1, Q6).

A ressalva é pertinente. Sobre minimização de desperdícios, E1 reconhece que "a empresa não possui, até o momento, práticas estruturadas ou formalizadas especificamente voltadas à minimização sistemática de perdas no processo produtivo" (E1, Q5). Trata-se da diferença entre fim de tubo e prevenção, distinção que Khamisu et al. (2024) articulam ao demonstrar que o comprometimento ambiental mais robusto emerge de pressões regulatórias e de engajamento ativo de stakeholders, não apenas da resposta reativa a normas existentes.

A nuvem de palavras do Apêndice A confirma o diagnóstico: "ambiental", "resíduo", "conformidade" e "legal" dominam o campo semântico. O conjunto aponta para uma empresa em estágio intermediário: acima da mera indiferença, abaixo da integração estratégica.

2. Dimensão Social do ESG

A dimensão social ocupa posição periférica no discurso da Empresa Delta. Não se trata de ausência total de iniciativas. Trata-se de uma presença fragmentada, pontual e distante de uma política estruturada. E1 descreve as condições de trabalho: "a empresa pratica salários acima do piso da categoria [...] e oferece benefícios como plano de saúde integralmente custeado pela organização" (E1, Q8). São sinais concretos de valorização do trabalhador.

O cenário muda quando se examina o que vai além da relação contratual. Sobre envolvimento comunitário, E1 é objetiva: não há "ações estruturadas ou programas formais voltados ao engajamento com a comunidade local" (E1, Q9). O mesmo padrão se repete na capacitação: "a empresa não possui programas formais de capacitação ou desenvolvimento profissional para seus colaboradores" (E1, Q10). O levantamento documental confirma esse quadro: os três itens da dimensão social não receberam marcação positiva.

Esposito De Falco et al. (2021) argumentam que, em PMEs com estruturas enxutas, são os vínculos contratuais que sustentam o comportamento socialmente responsável. No caso da Empresa Delta, essa pressão opera de forma limitada. Cardillo e Basso (2025) observaram que a dimensão social não apresenta associação significativa com indicadores financeiros quando faltam condições institucionais que pressionem e recompensem as iniciativas. A empresa ilustra esse argumento: boas práticas existem, mas a ausência de registros impede que se convertam em compromisso ESG reconhecível. Na nuvem do Apêndice A, "social" aparece com peso visual sensivelmente inferior ao de "ambiental", evidência que converge com os achados qualitativos.

3. Dimensão Governança do ESG

A governança é o pilar mais incipiente dos três na Empresa Delta. E1 é precisa: "não foram identificados mecanismos estruturados ou formalizados de governança corporativa voltados especificamente à transparência e à conformidade sistemática com padrões ESG" (E1, Q11). A inexistência de comitê ESG reforça esse diagnóstico: "não há um comitê formal de ESG na estrutura organizacional. No entanto, observa-se uma preocupação pontual com o tema, ainda que de forma não sistematizada ou institucionalizada" (E1, Q12). Preocupação pontual e governança estruturada são categorias distintas.

O checklist confirma: dos dois itens verificados, apenas o relativo à conformidade legal recebeu marcação positiva. Nuhu e Alam (2024) demonstraram que, mesmo em grandes corporações de economias emergentes, apenas 37% atingem níveis adequados de divulgação ESG. Para PMEs, esse patamar tende a ser ainda mais baixo. As diretoras, proprietárias da empresa, demonstram comprometimento com obrigações trabalhistas e fiscais, mas não há pressão externa que induza a formalização: a empresa vende diretamente ao consumidor final, sem exigência de selos por parte de seus clientes. Sem pressão, sem estrutura. Cardillo e Basso (2025) são precisos: práticas de governança só produzem efeito quando o ambiente ao redor também exige e recompensa. Na nuvem do Apêndice A, "esg" e "responsável" figuram nas bordas, padrão que converge com os achados do checklist.

4. Análise da Nuvem de Palavras ESG

A nuvem de palavras gerada pelo software IRaMuTeQ a partir das entrevistas sobre ESG (Tabela 3) oferece uma representação visual da frequência e da centralidade dos termos mobilizados pelos entrevistados. Esse recurso não substitui a análise de conteúdo. Complementa-a. "Ambiental" é o termo de maior peso visual, ao qual se seguem "empresa", "resíduo", "prático", "gestão" e "processo". A predominância desse campo semântico confirma o que os blocos anteriores já indicavam: a dimensão ambiental não apenas concentra o maior volume de práticas, mas estrutura o próprio vocabulário com que a organização pensa e comunica sustentabilidade. Termos como "conformidade", "legal" e "técnica" reforçam que esse enquadramento é predominantemente normativo.



Figura 1 - Nuvem de Palavras ESG: Dimensões Ambiental, Social e de Governança
Fonte: Software IRaMuTeQ, versão 0.8 alpha 7 (2026).

A assimetria entre as três dimensões ESG torna-se visível na distribuição espacial da nuvem. "Social" aparece com peso visual reduzido. Ausentes do núcleo estão termos como "capacitação", "comunidade" ou "desenvolvimento". A governança ocupa a posição mais periférica: "esg" e "responsável" figuram nas bordas. Alta centralidade ambiental. Baixa institucionalização estratégica.

Considerações Finais

Este estudo analisou como uma pequena empresa industrial do setor coureiro-calçadista articula, na prática, o referencial ESG. A análise da Empresa Delta revela uma condição de incompletude estruturada: iniciativas coexistem com lacunas em sua formalização e consolidação.

Na dimensão ambiental, a empresa apresenta o conjunto mais consistente de práticas, energia solar, uso de recouro, segregação e encaminhamento de resíduos para a UTRESA. O problema não é o que existe. É o que falta ao redor: uma política ambiental formalizada, uma estratégia documentada de prevenção de perdas, um sistema de gestão que transforme iniciativas isoladas em compromisso institucional comunicável. Conformidade sem sistematização.

A dimensão social concentra-se nas condições básicas da relação de emprego, salários acima do piso e plano de saúde, sem avançar para capacitação ou engajamento comunitário formalizado. Esposito De Falco et al. (2021) apontam que, em PMEs enxutas, são os vínculos contratuais que sustentam o comportamento social responsável. A Empresa Delta confirma essa lógica: o que existe decorre da relação direta com os funcionários, não de uma política estruturada.

A governança é o pilar mais frágil. Inexistência de comitê ESG, conformidade restrita ao cumprimento das obrigações legais, ausência de pressão externa por certificação. O conjunto de evidências não indica postura negligente, mas revela uma organização que opera nos limites de suas condições estruturais.

Três limitações devem ser destacadas: o delineamento como estudo de caso único restringe a generalização; a coleta em um único momento impede a apreensão da dinâmica evolutiva; a ausência de dados financeiros limita a investigação da relação entre práticas ESG e desempenho econômico. Estudos futuros com múltiplos casos no setor, abordagens longitudinais em empresas em processo de certificação e investigações sobre o papel de entidades setoriais como indutoras de transformação constituem agendas relevantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX), que viabilizou a realização deste trabalho durante o curso de Mestrado em Qualidade Ambiental na Universidade FEEVALE.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VAREJO TÊXTIL (ABVTEX). Relatório Anual ABVTEX 2025. São Paulo: ABVTEX, 2025.

AZINOGO, B. K.; ERASMUS, L. Rise of sustainable corporate governance in emerging economies: perspective of government auditor capacity and legislation. Journal of Risk and Financial Management, v. 18, n. 11, 2025. https://doi.org/10.3390/jrfm18110654

AZMI, W.; HASSAN, M. K.; HOUSTON, R.; KARIM, M. S. ESG activities and banking performance: international evidence from emerging economies. Journal of International Financial Markets, Institutions and Money, v. 70, 2021. https://doi.org/10.1016/j.intfin.2020.101277

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo. 3. ed. Lisboa: Edições 70, 2004. 223 p. ISBN 9724412148.

BASHIR, Y.; ZHAO, Y.; QIU, H.; AHMED, Z.; YAU, J. T.-H. Environmental, social, and governance performance and value creation in product market. Journal of Risk and Financial Management, v. 16, n. 12, 2023. https://doi.org/10.3390/jrfm16120517

BAYONG, D.; BAWUAH, B.; AMOAH, E. Advancing environmental, social, and governance disclosure in emerging economies. SN Business and Economics, v. 5, n. 1, 2025. https://doi.org/10.1007/s43546-024-00766-8

BIJU, A.; GEETHA, S.; PRASAD, S.; SASIDHARAN, A.; JAYACHANDRAN, A. ESG-firm performance nexus: evidence from an emerging economy. Business Strategy and the Environment, v. 34, n. 3, p. 3469-3496, 2025. https://doi.org/10.1002/bse.4152

BURINSKIENĖ, A.; GRYBAITĖ, V.; LAPINSKIENĖ, G.; STASIUKYNAS, A. Exploring ESG impact on corporate profitability: insights from the industrials sector in Europe and USA. Journal of International Studies, v. 18, n. 3, p. 252-271, 2025. https://doi.org/10.14254/2071-8330.2025/18-3/13

CARDILLO, M. A. D. R.; BASSO, L. F. C. The ESG disclosure–performance paradox in BRICS. Sustainable Futures, v. 10, 2025. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101510

DAYAL, S.; SONI, T. K.; AGGARWAL, R.; HOTWANI, R. Linking ESG disclosure to firm performance and risk. Indian Journal of Finance, v. 18, n. 11, p. 36-55, 2024. https://doi.org/10.17010/ijf/2024/v18i11/174641

ESPOSITO DE FALCO, S.; SCANDURRA, G.; THOMAS, A. How stakeholders affect the pursuit of the ESG. Corporate Social Responsibility and Environmental Management, v. 28, n. 5, p. 1528-1539, 2021. https://doi.org/10.1002/csr.2183

FÜLÖP, M.; CIFUENTES-FAURA, J. Do ESG strategies drive green innovation in emerging economies? Business Strategy and the Environment, v. 35, n. 2, p. 2453-2468, 2026. https://doi.org/10.1002/bse.70296

GIL, Antonio C. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GJERGJI, R.; VENA, L.; SCIASCIA, S.; CORTESI, A. The effects of ESG disclosure on the cost of capital in SMEs. Business Strategy and the Environment, v. 30, n. 1, p. 683-693, 2021. https://doi.org/10.1002/bse.2647

GREGORY, R. P. The influence of firm size on ESG score. Journal of Sustainable Finance and Investment, v. 14, n. 1, p. 86-99, 2024. https://doi.org/10.1080/20430795.2022.2069079

GUPTA, H.; CHAUDHARY, R. An analysis of volatility and risk-adjusted returns of ESG indices. Risks, v. 11, n. 10, 2023. https://doi.org/10.3390/risks11100182

JAYACHANDRAN, A.; BIJU, A. V. N.; SASIDHARAN, A. Corporate ESG integration: a qualitative analysis of managerial perceptions and industry variations among emerging economy firms. Corporate Social Responsibility and Environmental Management, v. 33, n. 2, p. 2759-2782, 2026. https://doi.org/10.1002/csr.70324

JIN, C. Investigating the intersection of ESG investing, green recovery, and SME development in the OECD. Humanities and Social Sciences Communications, v. 12, n. 1, 2025. https://doi.org/10.1057/s41599-025-04873-1

KANG, A. S.; HEW, S. L. Sustainable ESG practices and smart manufacturing adoption readiness for SME operational agility. Sustainable Futures, v. 10, 2025. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101081

KHAMISU, M. S.; PALURI, R. A.; SONWANEY, V. ESG disclosure motives for environmentally sensitive industry. Cogent Business and Management, v. 11, n. 1, 2024. https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2322027

LAM, W.-F.; NIE, L.; CHAN, E. K. F. Firms' preferences for ESG policies: evidence from SMEs in Hong Kong. Business Strategy and the Environment, v. 34, n. 2, p. 2207-2221, 2025. https://doi.org/10.1002/bse.4100

NUHU, Y.; ALAM, A. Board characteristics and ESG disclosure in energy industry. Journal of Financial Reporting and Accounting, v. 22, n. 1, p. 7-28, 2024. https://doi.org/10.1108/JFRA-02-2023-0107

OKEKE, A. Decarbonizing supply chains in emerging economies. Global Journal of Emerging Market Economies, 2025. https://doi.org/10.1177/09749101251387365

ORIGEM SUSTENTÁVEL. Sobre. Novo Hamburgo: Abicalçados, 2022. Disponível em: https://www.origemsustentavel.org.br/sobre. Acesso em: 25 abr. 2026.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do Trabalho Científico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RAMOS, Júlio César; SCHREIBER, Dusan; BITELLO, Fernanda Furquim; OLIVEIRA, Giane Daniela de; SILVA, Bianca Kaline Ribeiro da. Evidenciação da adoção de práticas ESG em indústria coureiro calçadista no Brasil. In: XLV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2025, Natal. Anais [...]. Natal: ABEPRO, 2025. http://dx.doi.org/10.14488/ENEGEP2025_TN_ST_432_2120_48590

THOMPSON-BAHM, H.; TEIXEIRA, J. E.; LOBO, R. C. G. Enhancing sustainability and human centricity through emerging technologies from Industry 4.0 to Industry 5.0. Corporate Governance and Sustainability Review, v. 9, n. 3, p. 90-104, 2025. https://doi.org/10.22495/cgsrv9i3p7

WANG, L.; LI, P. Green factory certification and firms' ESG performance. International Review of Economics and Finance, v. 106, 2026. https://doi.org/10.1016/j.iref.2026.104904

YIN, Robert K. Estudo de caso: Planejamento e Métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZHOU, L.; RAHAT, B. How do ESG factors impact entrepreneurial finance? Evidence from European SMEs. International Journal of Entrepreneurial Behaviour and Research, p. 1-16, 2025. https://doi.org/10.1108/IJEBR-05-2025-0668.