– ANAIS –

5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VOLUME 5B: 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 5B – 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 5B / 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.

837p.: il.;
ISBN • 97890837148-44

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

VIRTUS IMPAVIDA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

UFCG
SUPRA OMNES LUX LUCIS
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
FUNTEF-PR

APOIO

FABHAT
FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ

ALTO TIETÊ

REVISTA ENSAIOS DE GEOGRAFIA
Pós Geo
Universidade Federal Fluminense

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

ProfÁgua

SUMÁRIO

32. Saneamento: Efluentes Sanitários e Industriais

REMOÇÃO DE ANTIBIÓTICOS EM MEIO AQUOSO POR RESINA POLIMÉRICA: INFLUÊNCIA DO pH, PROPRIEDADES SUPERFICIAIS E COMPORTAMENTO CINÉTICO ..17

EFICIÊNCIA DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NA DESCOLORAÇÃO DE EFLUENTES SINTÉTICOS CONTAMINADOS COM CORANTE TÊXTIL 25

REMOÇÃO DE NUTRIENTES PELO CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATORES COM MEMBRANA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA COM ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA 31

FOTOCATALISADORES DERIVADOS DE RESÍDUOS DE BATERIAS APLICADOS NA DEGRADAÇÃO DE CORANTES E EFLUENTES TÊXTEIS: ESTUDO BIBLIOMÉTRICO PRELIMINAR 40

TRATAMENTO DE EFLUENTES COSMÉTICOS RECALCITRANTES POR ELETROCOAGULAÇÃO: EFEITOS DA CONDUTIVIDADE NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO ...48

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE OLEOSO EM INDÚSTRIA METALÚRGICA.....55

DESEMPENHO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS E SUSTENTÁVEIS NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE TINTA.....63

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE NUTRIENTES EM SISTEMA DE LAGOA AERADA FACULTATIVA TRATANDO EFLUENTE KRAFT 70

COBRANÇA POR CARGA POLUIDORA NO SANEAMENTO PAULISTA: JUDICIALIZAÇÃO E DESAFIOS REGULATÓRIOS DO FATOR K 78

AVANÇOS NA APLICAÇÃO DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REFINO DE PETRÓLEO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA (2021–2026) 85

FORMAÇÃO DO LODO ATIVADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA - GO 91

ÁGUAS CINZAS EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS BRASILEIRAS: AVALIAÇÃO QUALIQUANTITATIVA E ESTUDO EXPERIMENTAL 97

BIOAUMENTACIÓN CON *Bacillus thuringiensis* INMOVILIZADO EN CÁSCARAS DE ARROZ PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE CELULOSA EN LAGUNA AIREADA FACULTATIVA A ESCALA PILOTO.....106

INFLUÊNCIA DE CHICANAS PERFURADAS NA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DE UM CONTACTOR MULTICANAIS DE OZÔNIO: UMA ANÁLISE COM FERRAMENTAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....112

AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE CORANTES EM EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO UTILIZANDO O FUNGO *Penicillium sp.*.....118

ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA DETECÇÃO DE MICROPLÁSTICOS POR ESPECTROSCOPIA RAMAN EM DIFERENTES MATRIZES.....126

SUCESSÃO ECOLÓGICA DA MICROFAUNA COMO INDICADOR DE DESEMPENHO DO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CELULOSE 134

DIAGNOSTICO E POTENCIAL DE GERAÇÃO E DE EFLUENTES LIQUIDOS DE LABORATORIOS UNIVERSITARIOS: ESTUDO DE CASO UNIOESTE/TOLEDO 141

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE RECOVERY OF HIGH-VALUE ALGINATE-LIKE EXOPOLYMERS (ALE) FROM ALGAL-BACTERIAL AEROBIC GRANULAR SLUDGE (ABGS) SYSTEMS....150

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE UM REATOR SBRIA EM ESCALA PILOTO PARA REMOÇÃO SIMULTÂNEA DE MATÉRIA ORGÂNICA, NITROGÊNIO E FÓSFORO....157

BIODEGRADABILIDADE DE EFLUENTES VINÍCOLAS GERADOS POR ELETRODIÁLISE: PERSPECTIVAS DE ECONOMIA CIRCULAR....165

APLICAÇÃO DE WETLANDS CONSTRUÍDAS PARA REMOÇÃO DE CAFEÍNA EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E TOXICIDADE EM SOLO....172

APLICAÇÕES DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA EM TECNOLOGIAS DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS....180

AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA RASC PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO POR MEIO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E DA ECOTOXICIDADE VISANDO REÚSO AGRÍCOLA....188

DESEMPENHO E CONTROLE DA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO EM REATOR DE LEITO ESTRUTURADO COM AERAÇÃO INTERMITENTE (SBRIA) MONITORADO POR SONDAS....196

CARACTERIZAÇÃO E BIODEGRADAÇÃO AERÓBIA UTILIZANDO MICROBIOTA AUTÓCTONE DE EFLUENTE DE BIOFÁBRICA....204

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE ÁGUA EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL....210

PARTIDA E MONITORAMENTO OPERACIONAL DE UMA LAGOA AERADA MECANICAMENTE NO TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS E INDUSTRIAL: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E RESPIROMÉTRICA....215

PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO COMBINANDO PIRITA E OZONIZAÇÃO NA REMOÇÃO DE CORANTE VERMELHO....221

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA TEWETLAND COMO SOLUÇÃO COLETIVA DE SANEAMENTO....228

ESTUDO CINÉTICO E DE EQUILÍBRIO DA ADSORÇÃO DE BENZENO EM HIDROCHAR DE LODO DE ESGOTO E BAGAÇO DE MALTE....234

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE FRIGORÍFICO DE SUÍNOS....242

EFEITO DO PRECURSOR NAS PROPRIEDADES E ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA DO g-C_3N_4 NA DEGRADAÇÃO DE DIURON....247

AVANÇOS RECENTES E APLICAÇÕES DE MFCs NA GERAÇÃO DE BIOENERGIA EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES....253

REUSO DE CARVÃO ATIVADO E ARGILA EMPREGADOS COMO ADSORVENTES NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CELULOSE KRAFT....261

AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DE MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA RECONDICIONADAS POR TRATAMENTO QUÍMICO OXIDATIVO PARA OBTENÇÃO DE MEMBRANAS DE ULTRA E NANOFILTRAÇÃO....269

33. Saneamento: Planejamento, Políticas Públicas e Legislação

O PAPEL DA REGULAÇÃO NA IMPLEMENTAÇÃO DOS DIREITOS HUMANOS À ÁGUA E AO SANEAMENTO NO BRASIL: DESAFIOS E PERSPECTIVAS A PARTIR DO CONTEXTO DA COVID-19....278

OUTORGA COMO INSTRUMENTO DE GESTÃO HÍDRICA: ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS INTERNOS DE UMA COMPANHIA ESTADUAL DE SANEAMENTO 284

DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA IMPLEMENTAÇÃO DA COMPOSTAGEM COMO POLÍTICA PÚBLICA NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS: UMA REVISÃO 292

GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE: UM ESTUDO DE CASO EM MUNICÍPIOS DO ESPÍRITO SANTO 300

DESIGUALDADES REGIONAIS NO ACESSO AO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL: UMA ANÁLISE ENTRE 2015 E 2024 305

PLANO DE CONTINGÊNCIA EM SANEAMENTO COMO ESTRATÉGIA CENTRAL DE RESILIÊNCIA URBANA: ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO EM PELOTAS/RS 311

COMUNIDADES QUILOMBOLAS NOS PLANOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO 317

INDICADORES PER CAPITA DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO URBANO: ESTUDO DE CASO E PROJEÇÕES PARA LIMEIRA-SP 333

POTENCIAL DE USO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF) COMO INSUMO AGRÍCOLA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 340

AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA (ISH) EM MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE DA MICRORREGIÃO DE ÁGUA E ESGOTO DO LITORAL NO ESTADO DA PARAÍBA 348

ASSOREAMENTO DAS CAIXAS DE CAPTAÇÃO PLUVIAL NA DRENAGEM URBANA: ESTUDO DE CASO EM CANOINHAS SANTA CATARINA 356

O PAPEL DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO NEXO ÁGUA-ENERGIA-INOVAÇÃO: BENEFÍCIOS SOCIOAMBIENTAIS DE UM ARRANJO MULTI-INSTITUCIONAL PARA O ODS 6 – ESTUDO DE CASO NO OESTE DO PARANÁ 364

O PAPEL DO MUNICÍPIO E O NOVO MARCO LEGAL SANEAMENTO 373

GOVERNANÇA HÍDRICA E CONFLITOS POR ÁGUA COMO DETERMINANTES DA VIABILIDADE DE REÚSO NA MINERAÇÃO 378

UNIVERSALIZAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL: TENDÊNCIAS, INVESTIMENTOS E DESAFIOS À LUZ DO MARCO LEGAL E DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 387

34. Saúde Pública Controle de Vetores e Salubridade Ambiental

PROBLEMAS AMBIENTAIS E RISCO VETORIAL À DENGUE: APLICAÇÃO DO PROTOCOLO PARU NO IGARAPÉ DO PASSARINHO - MANAUS (AM) 394

DISPOSIÇÃO INADEQUADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E A DENGUE: Análise espacial no Bairro Terra Nossa, Francisco Beltrão-PR 402

ENTRE SAÚDE E EXPOSIÇÃO: ANÁLISE DAS DOENÇAS DIARREICAS AGUDAS EM FLORIANÓPOLIS (2020-2025) 410

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA INCIDÊNCIA DE DENGUE NO SUL DO BRASIL: UM ESTUDO NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL 418

35. Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis

INTEGRAÇÃO DE RESERVATÓRIOS SOB PAVIMENTO PARA REUSO DE ÁGUA DE CHUVA EM ESCOLAS PÚBLICAS DO RECIFE-PE 425

TANQUE DE RETARDO COMO ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE ALAGAMENTOS: ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO NA ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO.....432

GESTÃO HÍDRICA URBANA: ANÁLISE COMPARATIVA DOS INDICADORES LEED ND v4 E SITES v2 APLICADOS AO BAIRRO URBITÁ, BRASÍLIA-DF 439

DINÂMICA DO DESENVOLVIMENTO DA BIOMASSA VEGETAL COMPARATIVA ENTRE JARDIM DE CHUVA E TRADICIONAL.....445

AVALIAÇÃO DO IMPACTO HIDROLÓGICO DA URBANIZAÇÃO E ESTRATÉGIAS DE MANEJO SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS PLUVIAIS NA QUADRA ARSO 51 EM PALMAS-TO 452

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA IOT COM SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DE UMIDADE DO SOLO EM JARDIM DE CHUVA 459

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO NO PERÍMETRO URBANO DE CUIABÁ-MT UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO E EDIÇÃO MATRICIAL 466

DECISÃO DE DIRETORIA 014/2023/E/C/I DA CETESB COMO POLÍTICA PÚBLICA DE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS (DMAPU) NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DE UM LOTEAMENTO NO ESTADO DE SÃO PAULO 470

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO POR MEIO DE MODELAGEM NO SWMM.....479

ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR DAS TÉCNICAS ADOTADAS NO MANEJO DAS ÁGUAS PLUVIAIS.....484

RIOS URBANOS SOB PRESSÃO: TENDÊNCIAS E DESAFIOS CIENTÍFICOS EM UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....492

ALAGAMENTOS EM ÁREA URBANA CONSOLIDADA: AUMENTAR O DIÂMETRO DAS TUBULAÇÕES É A SOLUÇÃO?.....499

DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DO SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL URBANA EM UMA BACIA URBANIZADA 507

DIAGNÓSTICO, DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE SISTEMA HIDRÁULICO DE CONTROLE DE CHEIAS COM POLDER E RESERVAÇÃO NO BAIRRO SÃO BENTO, DUQUE DE CAXIAS, RJ, COM BASE EM MODELAGEM HIDRODINÂMICA QUASI-2D.....514

MODELAGEM HIDROLÓGICA APLICADA À DRENAGEM URBANA PARA GESTÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM TAPEROÁ/PB.....522

CIDADES ESPONJAS COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL PARA MITIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS URBANOS EM UBERLÂNDIA: Revisão Sistemática da Literatura 530

APLICAÇÃO DE PYSWMM NA OTIMIZAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA EM SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA.....536

ADENSAMENTO URBANO E DIRETRIZES DO PDDU NA SUSCETIBILIDADE A ALAGAMENTOS: ANÁLISE ESPACIAL DO TRECHO URBANO DO RIO VERRUGA (BA) .544

36. SUSTENTABILIDADE DO AGRONEGÓCIO

DESEMPENHO DA CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (SCBA) NA PROTEÇÃO DE CONCRETOS CONTRA CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS: UMA REVISÃO 553

BALANÇO HÍDRICO HISTÓRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR COM USO DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS CLIMÁTICOS.....561

INTERAÇÃO ENTRE MICROPLÁSTICOS VIRGENS E GLIFOSATO: AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO, DESSORÇÃO E FITOTOXICIDADE EM *Lactuca sativa* 569

INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DO SOLO NA PRODUÇÃO PECUÁRIA: EFICÁCIA DE SISTEMAS SILVIPASTORIS 577

ADOÇÃO DE PRÁTICAS AGRÍCOLAS SUSTENTÁVEIS POR MULHERES EM ASSENTAMENTOS DE REFORMA AGRÁRIA 585

DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA DE 2,4D EM ESGOTO SANITÁRIO SINTÉTICO TRATADO EM REATOR ANAERÓBIO HORIZONTAL DE LEITO FIXO MODIFICADO (RAHLF) 591

AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO ABATE E DO DESEMPENHO DAS EXPORTAÇÕES DE CARNE BOVINA NO BRASIL (2014–2024): UMA ANÁLISE INTEGRADA DA SUSTENTABILIDADE DO AGRONEGÓCIO 597

ESTRUTURAS PARA O CONTROLE E MITIGAÇÃO DA POLUIÇÃO DIFUSA NA AGRICULTURA: APLICAÇÕES PRÁTICAS DOS ASPECTOS DE DRENAGEM E AMBIENTAIS 602

37. Tecnologias Verdes e Inovação Sustentável

PLANEJAMENTO DE APP PARA GESTÃO SUSTENTÁVEL DA APICULTURA FAMILIAR 612

IDENTIFICAÇÃO DE GRÃOS DE PÓLEN EM ANÁLISES DE MÉIS DA CIDADE DE UNISTALDA-RS 618

SUSTENTABILIDADE INTEGRADA: COMO A "ÁRVORE URBANA" ALIMENTA A TECNOLOGIA E COMBATE O CALOR COM A ÁGUA DA CHUVA 624

DEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS POR MEIO DE PROCESSO DE COMPOSTAGEM SUSPENSA 632

FLAMMABILITY LIMITS OF HVO UNDER SUB-ATMOSPHERIC CONDITIONS: SIGNIFICANT DEVIATIONS FROM FOSSIL DIESEL 639

EXTRATOS AQUOSO E SALINO DE SEMENTES DE *MORINGA OLEIFERA*: INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE LODO EM ÁGUA DE ALTA TURBIDEZ 645

BIODEGRADAÇÃO DE POLITERAFTALATO DE ETILENO (PET) MEDIADA POR FUNGOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DAS TENDÊNCIAS GLOBAIS 652

FITOTECNOLOGIAS APLICADAS AO SANEAMENTO: TELHADOS VERDES COMO ESTRATÉGIA PARA O CONTROLE DE GASES ODORANTES E DE EFEITO ESTUFA EMITIDOS POR SISTEMAS DE ESGOTO SANITÁRIO 660

AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS APLICADAS AO REÚSO DE ÁGUA: UMA ANÁLISE ESTRATÉGICA 667

CLARIFICAÇÃO DE EFLUENTES SIMULADOS DA MINERAÇÃO DE FERRO UTILIZANDO BIOPOLÍMEROS NATURAIS: AMIDO DE MILHO E QUITOSANA 675

TINGIMENTO DE ALGODÃO COM CORANTE NATURAL E REATIVO: AVALIAÇÃO DO MECANISMO DO PROCESSO E DO PERFIL DOS EFLUENTES GERADOS 683

PRODUÇÃO DE CELULASES FÚNGICAS A PARTIR DA FERMENTAÇÃO SEQUENCIAL DO BAGAÇO DE MALTE UTILIZANDO *Aspergillus* sp 691

PRODUÇÃO DE CELULASES POR FERMENTAÇÃO SEQUENCIAL UTILIZANDO *ASPERGILLUS JAPONICUS* URM5242 E PLANEJAMENTO FATORIAL 699

APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA A PREDIÇÃO DA ADSORÇÃO DO CORANTE RODAMINA B POR MESOCARPO DO COCO DO BABAÇU 707

PLACAS LAMINADAS DE PAPELÃO ONDULADO COMO MATERIAL CONSTRUTIVO SUSTENTÁVEL: INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO 712

O PANORAMA GLOBAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS HIDROLISADOS POR CELULASES FÚNGICAS: TENDÊNCIAS E LACUNAS 719

MAPEAMENTO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE A APLICAÇÃO DA QUITOSANA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS DE PROCESSO NA MINERAÇÃO DE FERRO 727

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM ARGAMASSAS: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL À SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO 735

PROPOSTA DE UM MODELO DE GESTÃO E PLANEJAMENTO SUSTENTÁVEL DE LABORATÓRIOS DE ENSINO E PESQUISA EM QUÍMICA: UMA ABORDAGEM BASEADA NOS PRINCÍPIOS DA *GREEN CHEMISTRY* 742

AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE GÁS DO EFEITO ESTUFA EM LAGOA COM MACRÓFITAS APLICADAS NO POLIMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS 748

RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) NA PAVIMENTAÇÃO: ANÁLISE MULTIESCALAR E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PARA APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL 754

INFRAESTRUTURA VERDE COMO ESTRATÉGIA DE ADAPTAÇÃO NO BIOMA CAATINGA: INTEGRAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO 761

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ETA SECOS E ÚMIDOS PARA FABRICAÇÃO SUSTENTÁVEL DE MATERIAIS CERÂMICOS 768

CONECTIVIDADE ECOLÓGICA POR MEIO DA INTEGRAÇÃO ENTRE ECOLOGIA DA PAISAGEM E ANÁLISE EM SIG NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BARTOLOMEU, DF/BRASIL 775

CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO EM APLICAÇÕES HIDRÁULICO-AMBIENTAIS 783

ECOTOXICIDADE DO EFLUENTE DE LAVAGEM DE HIDROCARVÃO DE *Acrocomia aculeata* 791

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE O DESEMPENHO TERMOACÚSTICO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE AGREGADOS NÃO CONVENCIONAIS 799

APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE TONALITO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS: ANÁLISE FÍSICO-MECÂNICA E AMBIENTAL 806

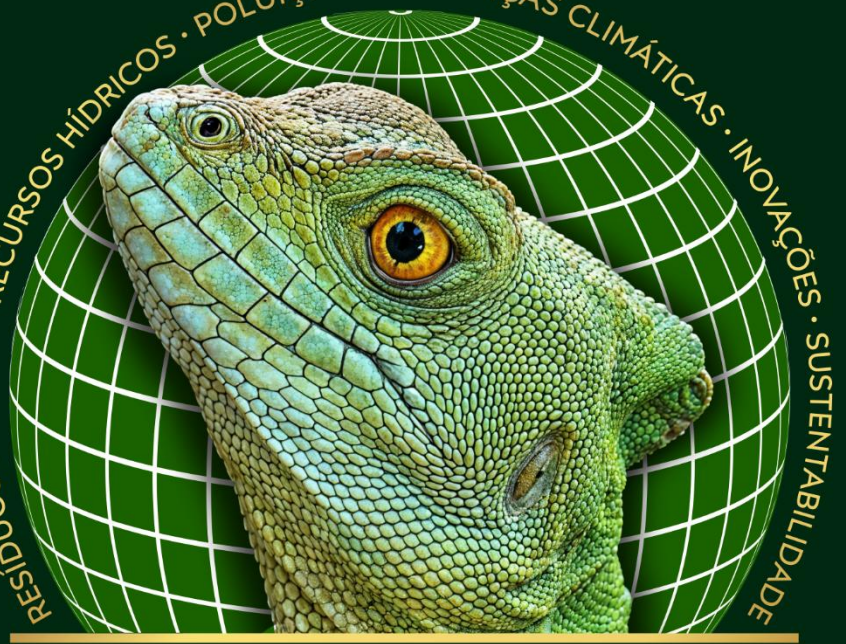
AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DE ANTIBIÓTICO NITROFURANTOÍNA POR BENTONITA CÁLCICA 814

VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE ARAMES NA PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO 819

BIOFILIA E BIOMIMÉTICA: REVISÃO E AVALIAÇÃO DOS CONCEITOS PARA EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS E EFICIENTES 826

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL 833

ARTIGOS COMPLETOS



5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

– EDIÇÃO LUSO-BRASILEIRA –

2026

ÁREA TEMÁTICA 32

SANEAMENTO: EFLUENTES SANITÁRIOS E INDUSTRIAIS

RESÍDUOS SÓLIDOS · RECURSOS HÍDRICOS · POLUIÇÃO · MUDANÇAS CLIMÁTICAS · INOVAÇÕES · SUSTENTABILIDADE

5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

REMOÇÃO DE ANTIBIÓTICOS EM MEIO AQUOSO POR RESINA POLIMÉRICA: INFLUÊNCIA DO pH, PROPRIEDADES SUPERFICIAIS E COMPORTAMENTO CINÉTICO

1 Milena Meireles Fernandes, 2 Renata Mello Giona, 3 Ismael Laurindo Costa Junior

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: milenafernandes@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: renatam@.utfpr.edu.br; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: ismael@utfpr.edu.br.

Palavras-chave: adsorção; contaminantes emergentes; resinas

Resumo

A presença de contaminantes emergentes (CE), especialmente antibióticos, em sistemas aquáticos tem sido amplamente reportada, representando um problema ambiental relevante devido à sua persistência, mobilidade e potencial de indução à resistência antimicrobiana. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a remoção dos antibióticos tetraciclina (TCR) e sulfametoxazol (SMZ) em meio aquoso utilizando a resina polimérica Amberlite XAD-7HP, investigando a influência do pH e das propriedades superficiais do material, a partir da determinação do ponto de carga zero (pH_{PCZ}), sobre o comportamento cinético do processo de adsorção. A caracterização da resina foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS), evidenciando morfologia esférica, superfície homogênea e predominância de carbono e oxigênio na composição. O pH_{PCZ} foi determinado como 7,5, indicando superfície com carga positiva em meio ácido e negativa em meio básico. Ensaios cinéticos em batelada foram conduzidos em pH 5,5; 7,5 e 9,5, com monitoramento da concentração dos antibióticos por espectrofotometria UV-Vis. Os resultados mostraram que a adsorção da TCR foi mais eficiente em meio ácido, apresentando maior dependência do pH e melhor ajuste ao modelo de Elovich, indicando superfície energeticamente heterogênea e participação de interações específicas. Em contraste, o SMZ apresentou maior capacidade de adsorção, com valores de até aproximadamente 2,6 mg g^{-1}, e menor sensibilidade ao pH, com melhor ajuste ao modelo de pseudo-primeira ordem, sugerindo predominância de mecanismos físicos e difusivos. Os resultados indicam que o processo de adsorção é governado pela interação entre propriedades superficiais do adsorvente, especiação dos contaminantes e condições do meio, destacando a importância do pH_{PCZ} na interpretação dos mecanismos envolvidos. Assim, a resina Amberlite XAD-7HP mostra-se uma alternativa promissora para a remoção de antibióticos em sistemas aquosos, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao tratamento de contaminantes emergentes.

Introdução

A ocorrência de contaminantes emergentes (CE) em sistemas aquáticos tem sido reportada nas últimas décadas, com destaque para os fármacos, que são continuamente introduzidos no ambiente por meio de efluentes domésticos, hospitalares e industriais (Küster; Adler, 2008; Lima; Afonso; Aquino Neto, 2017). Entre esses compostos, os antibióticos apresentam especial relevância devido à sua persistência no ambiente, mobilidade em matrizes aquosas e associação direta com o desenvolvimento de resistência antimicrobiana, configurando um problema de caráter ambiental e de saúde pública (Kraemer; Ramachandran; Perron, 2019). Além disso, há ocorrência desses compostos em diferentes compartimentos aquáticos, evidenciando sua relevância como CE de preocupação global (Roa; Boulett; Sánchez, 2026; Soldan *et al*., 2023).

Uma das principais rotas de disseminação dos CE em corpos hídricos em escala global são as estações de tratamento de esgotos, com variações associadas ao consumo regional e às condições operacionais dos sistemas de tratamento (Jiang *et al.,* 2024). Os sistemas convencionais de tratamento não são plenamente eficientes na remoção desses compostos, uma vez que tais processos foram projetados para a remoção de contaminantes como matéria orgânica, nutrientes e patógenos, enquanto os fármacos ocorrem tipicamente em níveis traço (µg L^{-1} a ng L^{-1}) (Le-Minh *et al.*, 2010; Bila; Dezotti, 2003; Jiang *et al.*, 2024). Como consequência, antibióticos são detectados em águas superficiais e subterrâneas, evidenciando a necessidade de desenvolvimento de tecnologias complementares mais eficientes para sua remoção (Lima; Afonso; Aquino Neto, 2017; Roa; Boulett; Sánchez, 2026).

Nesse contexto, os processos de adsorção são uma alternativa promissora para a remoção de contaminantes orgânicos, devido à sua elevada eficiência, simplicidade operacional e versatilidade (Nascimento *et al.*, 2014). Entre os materiais adsorventes, as resinas poliméricas apresentam características relevantes, como elevada área superficial, estabilidade química e presença de grupos funcionais capazes de interagir com diferentes espécies químicas em solução (Soldan *et al*., 2023). A resina Amberlite XAD-7HP, por exemplo, tem sido testada na remoção de compostos orgânicos farmacológicos em meio aquoso, apresentando desempenho associado à sua estrutura porosa e natureza parcialmente polar (Domínguez *et al*., 2011). A eficiência desses materiais está diretamente relacionada às interações adsorvente–adsorvato, incluindo forças eletrostáticas, ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas, especialmente em sistemas envolvendo antibióticos (Roa; Boulett; Sánchez, 2026).

Entretanto, embora a eficiência da adsorção de fármacos por materiais poliméricos já seja discutida na literatura, ainda são limitados os estudos que integram a influência das propriedades superficiais do adsorvente, especialmente o ponto de carga zero (pH_{PCZ}), com o comportamento cinético do processo. Considerando que o pH_{PCZ} define a carga superficial do material em função do pH do meio, sua relação com a especiação dos contaminantes pode influenciar diretamente os mecanismos de interação adsorvente–adsorvato, afetando tanto a taxa quanto a extensão do processo de adsorção (Domínguez *et al*., 2011; Roa; Boulett; Sánchez, 2026).

Dessa forma, a compreensão integrada entre pH, propriedades superficiais e cinética de adsorção torna-se fundamental para o desenvolvimento e otimização de sistemas de tratamento voltados à remoção de CE. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a remoção dos antibióticos tetraciclina (TCR) e sulfametoxazol (SMZ) em meio aquoso utilizando a resina polimérica Amberlite XAD-7HP, investigando a influência do pH e das propriedades superficiais do material, a partir da determinação do pH_{PCZ}, sobre a cinética de adsorção dos compostos.

Material e Métodos

A resina polimérica Amberlite XAD-7HP 20-60 mesh (Sigma-Aldrich) foi utilizada como material adsorvente, sendo empregada sem modificações químicas prévias (Figura 01a e 01b). Os antibióticos TCR $C_{22}H_{24}N_2O_8$.HCl, Sigma-Aldrich®) e SMZ ($C_{10}H_{11}N_3O_3S$, Sigma-Aldrich®), de grau analítico, foram utilizados como compostos modelo (Tabela 02). As soluções foram preparadas com água deionizada, e o ajuste de pH foi realizado com soluções de HCl e NaOH (0,01 mol L^{-1}).

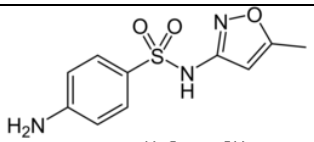
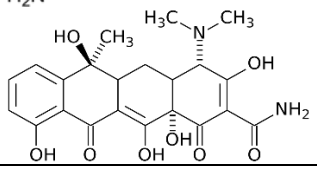
Fármaco	Fórmula molecular	Fórmula estrutural	Massa molar (g mol^{-1})	pK_a	Referência
SMX	$C_{10}H_{11}N_3O_3S$		253,28	1,6 5,6	Delagado-Vargas *et al. (*2022); Qiang; Adams (2004)
TCT	$C_{22}H_{24}N_2O_8$		444,43	3,3 7,7 9,7	Qiang; Adams (2004)

Tabela 01: Características dos antibióticos testados
Fonte: Autoria própria (2026)

A caracterização morfológica e elementar da resina foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada à espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS) em Microscópio Eletrônico de Varredura (Zeiss EVO-MA10). As amostras foram previamente secas, fixadas em suportes metálicos e metalizadas com uma fina camada de ouro, sendo analisadas em diferentes ampliações para avaliação da morfologia, textura superficial e composição elementar do material. O pH_{PCZ} foi determinado pelo método do pH em função da variação do pH inicial (ΔpH). Soluções de NaCl 0,1 mol L^{-1} tiveram o pH ajustado na faixa de 1 a 13, sendo posteriormente adicionados 0,05 g de resina a 25 mL de cada solução. As suspensões foram mantidas sob agitação de 150 rpm por 24 h à temperatura de 30 °C em incubadora shaker (modelo SL 221 – SOLAB), e o pH final foi medido em potenciômetro de bancada (Even, modelo pHS-3E).

O estudo de remoção foi realizado em duplicatas experimentais, utilizando soluções de TRC e SMZ com concentrações iniciais de 20 mg L^{-1}. Para a condução dos ensaios, foi adicionada a massa de 1 g de resina em 500 mL de solução de cada fármaco (mantendo-se assim a proporção de 0,05 g para 25 mL) em pH 5,5; 7,5 e 9,5, com agitação constante por 24 h a 150 rpm, por meio de agitadores magnéticos em temperatura de 30 °C. Foram colhidas alíquotas da fase aquosa nos tempos de 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 360, 720, 1440 min e determinada a concentração remanescente de cada antibiótico que foi usada no cálculo da quantidade adsorvida em função do tempo.

As determinações analíticas ocorreram espectrofotômetro de absorção molecular UV-Vis de varredura de feixe duplo (Thermo Scientific, Evolution 260 BIO), no intervalo de 200 a 400 nm, com resolução de 1 nm, e cubetas de quartzo com caminho óptico de 1 cm. Foram considerados os valores das bandas máximas de absorção de cada analito. A calibração ocorreu por meio de curva analítica na faixa de 0,5 - 20,0 mg L^{-1}. A quantidade adsorvida ao longo do tempo (q_t) foi calculada a partir da diferença entre as concentrações inicial e no tempo t, conforme a Equação (01) em que q_t(mg g^{-1}) é a quantidade adsorvida no tempo t, C_0e C_t(mg L^{-1}) são as concentrações inicial e no tempo t, respectivamente, V(L) é o volume da solução e m(g) é a massa de adsorvente.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)\cdot V}{m} \quad (01)$$

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PFO), pseudo-segunda ordem (PSO) e Elovich. O modelo de pseudo-primeira ordem é descrito pela Equação (02) em que q_e(mg g^{-1}) é a quantidade adsorvida no equilíbrio e k_1(min^{-1}) é a constante de velocidade do modelo.

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (02)$$

O modelo de pseudo-segunda ordem é representado pela Equação (03) em que k_2(g mg^{-1} min^{-1}) é a constante de velocidade do modelo.

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1+k_2 q_e t} \quad (03)$$

O modelo de Elovich é descrito pela Equação (04) em que α(mg g^{-1} min^{-1}) representa a taxa inicial de adsorção e β(g·mg^{-1}) está relacionado à extensão da cobertura superficial e à energia de ativação do processo.

$$q_t = \frac{1}{\beta}\ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta}\ln(t) \quad (04)$$

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e da concordância entre os valores experimentais e estimados.

Resultados e Discussão

A resina Amberlite XAD-7HP apresenta natureza polimérica acrílica de polaridade intermediária, composta por uma matriz predominantemente apolar associada a sítios polares, o que favorece sua aplicação na adsorção de compostos orgânicos em meio aquoso (Domínguez *et al*., 2011). Suas propriedades texturais, como elevada área superficial e volume de poros, indicam potencial significativo para processos adsortivos envolvendo moléculas de médio porte. A micrografia obtida por MEV (Figura 01c) evidencia partículas com morfologia predominantemente esférica, com distribuição relativamente uniforme de tamanhos e superfície contínua, apresentando discretas irregularidades associadas à sua estrutura porosa. Esse padrão morfológico favorece a difusão de moléculas orgânicas e o acesso aos sítios ativos internos, sendo característico de resinas macroporosas.

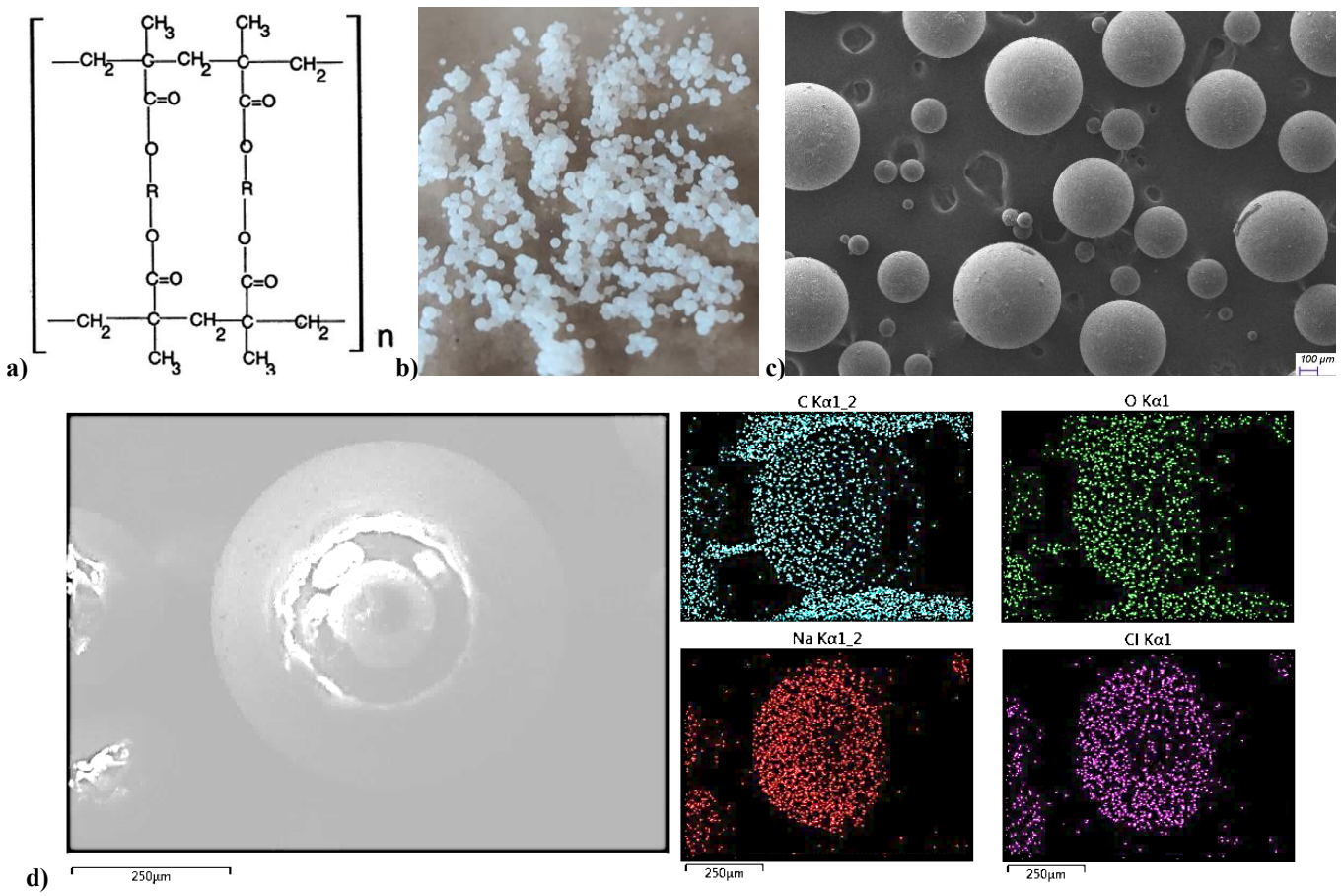


Figura 01: Resina Amberlite XAD-7HP a) estrutura polimérica. b) Aspecto macrosópico. c) micrografia (MEV). d) Mapeamento por EDS
Fonte: Autoria própria (2026)

O mapeamento elementar por EDS (Figura 01d) confirma a predominância de carbono e oxigênio na composição da superfície da resina, com distribuição homogênea desses elementos ao longo das partículas, além da presença de sódio e cloro associados ao umectante salino. A ausência de elementos metálicos relevantes indica que o processo de adsorção ocorre predominantemente por interações físico-químicas, como ligações de hidrogênio, dipolo-dipolo e interações hidrofóbicas, conforme discutido para sistemas envolvendo antibióticos em resinas poliméricas (Roa; Boulett; Sánchez, 2026).

Os espectros EDS obtidos antes e após os ensaios de adsorção (Figura 02a–c) evidenciam variações no teor relativo de carbono, indicando interação entre a superfície da resina e os compostos adsorvidos.

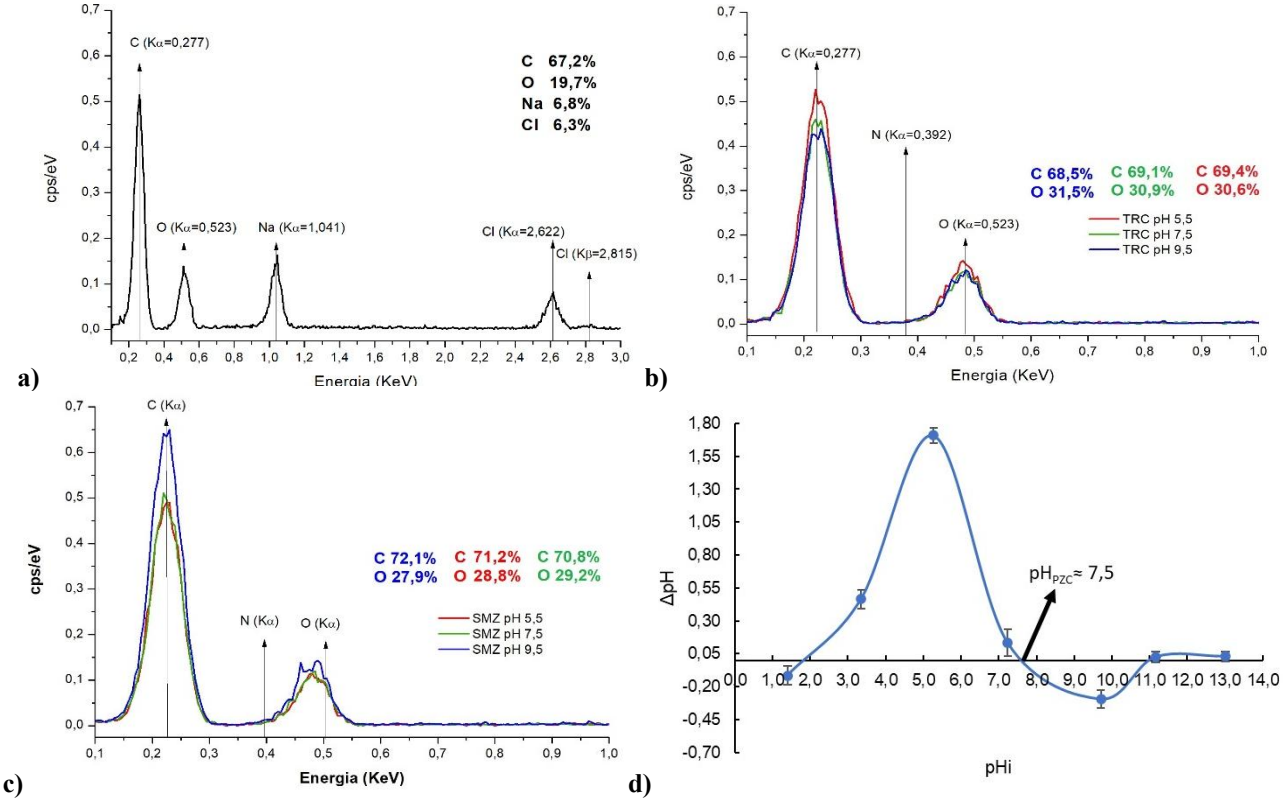


Figura 02: Espectros EDS da resina Amberlite XAD-7HP. a) antes do uso. b) após 24 h de contato com TRC. c) após 24 h de contato com SMZ. d) pH_{PCZ} da resina Amberlite XAD-7HP
Fonte: Autoria própria (2026)

A análise por EDS da resina antes do uso (Figura 02a) indicou predominância de carbono (67,2%) e oxigênio (19,7%), além da presença de sódio (6,8%) e cloro (6,3%), atribuídos ao umectante salino do material. Após os ensaios de adsorção (Figura 02b–c), observou-se variação no teor de carbono na superfície da resina, com valores entre 68,5% e 69,4% para a TRC e entre 70,8% e 72,1% para o SMZ, dependendo do pH do meio. Esse aumento relativo no teor de carbono indica a incorporação de espécies orgânicas na superfície do adsorvente, evidenciando a ocorrência de adsorção. A ausência de picos característicos de nitrogênio, embora presente na estrutura dos antibióticos, pode estar associada à baixa concentração superficial ou às limitações de detecção da técnica.

O pH_{PCZ}, determinado a partir da variação do pH inicial (Figura 02d), foi de aproximadamente 7,5 . Esse valor indica que a superfície da resina apresenta carga positiva em pH inferiores a 7,5 e negativa em pH superiores, sendo um parâmetro determinante para a compreensão das interações adsorvente–adsorvato. O valor obtido é superior ao reportado na literatura (~6,2), conforme Domínguez *et al*. (2011) e Yayayürük e Yayayürük (2019), possivelmente em função da presença de umectante salino na resina comercial, evidenciando a influência das condições de preparo do material sobre suas propriedades superficiais.

A interpretação dos resultados de adsorção pode ser aprofundada a partir da especiação ácido–base dos antibióticos, determinada por seus valores de pKa (Tabela 01). A TCR apresenta comportamento anfotérico, com múltiplos grupos ionizáveis (pKa 3,3; 7,7; 9,7), enquanto o SMZ apresenta caráter ácido fraco (pKa 1,6 e 5,6). Nas condições experimentais, em pH 5,5, a TCR encontra-se predominantemente em formas catiônicas e zwitteriônicas, favorecendo interações com a superfície positivamente carregada da resina. Em pH 7,5, próximo ao pKa intermediário, há coexistência de espécies neutras e aniônicas, enquanto em pH 9,5 predominam formas aniônicas, reduzindo a afinidade pela superfície. Para o SMZ, em pH 5,5 ocorre transição entre formas neutras e aniônicas, enquanto em pH 7,5 e 9,5 predomina a forma aniônica. Apesar da natureza aniônica do SMZ em pH elevado, a adsorção observada indica a predominância de interações não eletrostáticas, especialmente interações hidrofóbicas entre a porção apolar da molécula e a matriz polimérica da resina, além de possíveis ligações de hidrogênio e interações dipolo–dipolo com os grupos éster do material.

A influência do pH sobre a adsorção da TRC pode ser observada na Figura 03a, onde se verifica maior capacidade adsortiva em pH 5,5, seguida de pH 7,5 e pH 9,5. Em meio ácido, a superfície da resina apresenta carga positiva, favorecendo interações com as diferentes formas químicas da TRC, que possui caráter anfotérico. À medida que o pH aumenta, ocorre redução da adsorção, possivelmente em função do aumento da repulsão eletrostática e da menor afinidade entre adsorvente e adsorvato.

As curvas cinéticas (Figura 03b–d) indicam que o processo de adsorção da TCR ocorre rapidamente nas etapas iniciais, seguido por aproximação gradual ao equilíbrio, atingido em aproximadamente 12 h.

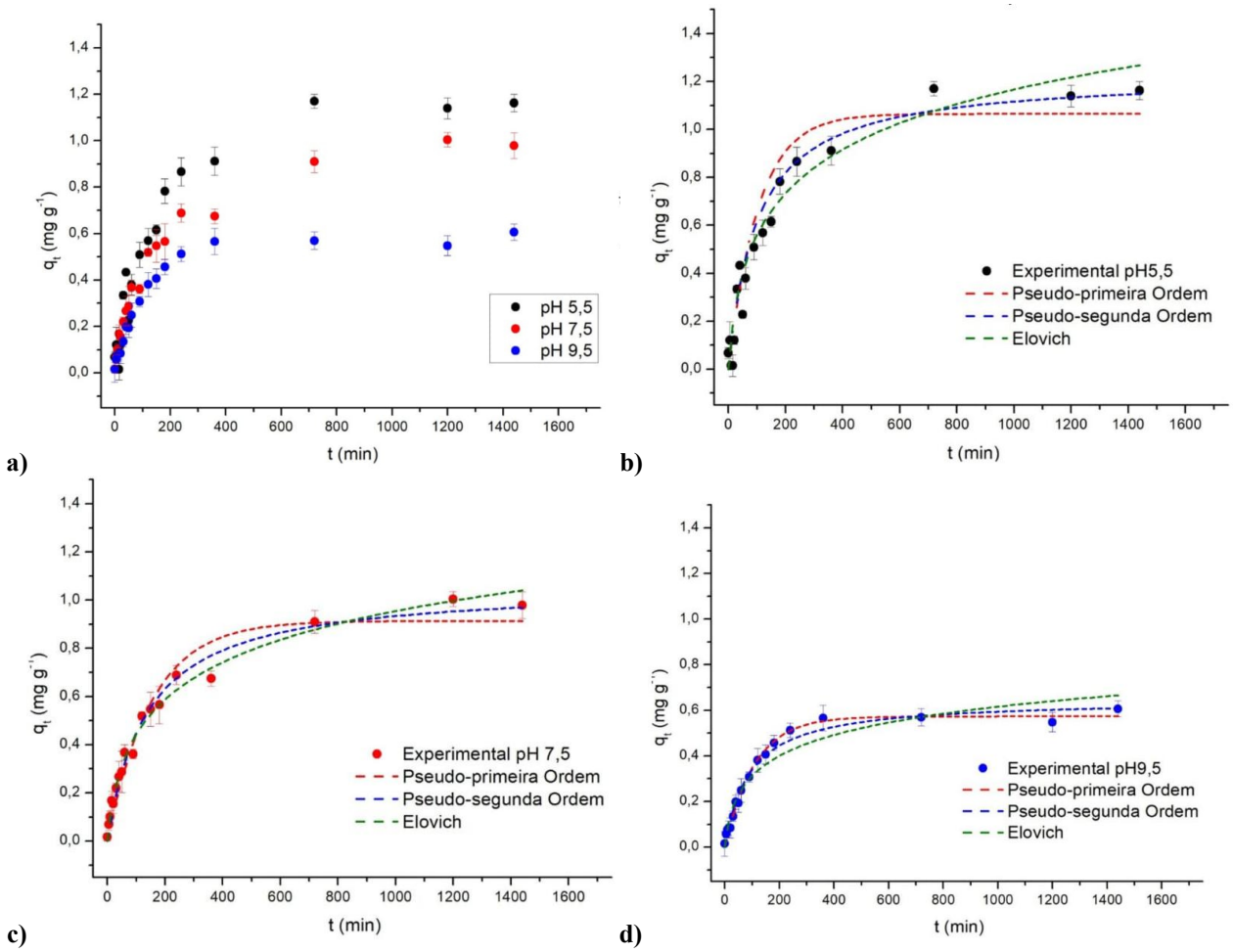


Figura 03: Resultados do ensaio cinético do TRC, com (a) variação do pH e ajustes cinéticos em (b) pH 5,5; c) pH 7,5 e (d) pH 9,5
Fonte: Autoria própria (2026)

Os ajustes cinéticos (Tabela 02) demonstram que o modelo de Elovich apresentou melhor desempenho, com coeficientes de determinação elevados (R^2 até 0,986), indicando que o processo ocorre em uma superfície energeticamente heterogênea. Esse comportamento é típico de sistemas nos quais há variação na energia dos sítios ativos, sendo compatível com a estrutura polimérica da resina e com a natureza multifuncional da TCR. A predominância do modelo de Elovich sugere a ocorrência de quimissorção, envolvendo interações específicas como ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas, em concordância com a literatura (Roa; Boulett; Sánchez, 2026).

Modelo/Parâmetro		TRC			SMZ		
		pH 5,5	pH 7,5	pH 9,5	pH 5,5	pH 7,5	pH 9,5
PFO	q_e (mg g^{-1})	1,1(±0,10)	0,9(±0,05)	0,6(±0,02)	2,2(±0,12)	2,2(±0,01)	2,4(±0,11)
	k_1 (min^{-1})	9,6x10^{-3} (±2,0x10^{-3})	6,6 x10^{-3} (±1,0x10^{-3})	9,2 x10^{-3} (±2,0x10^{-3})	10,3 x10^{-3} (±1,0x10^{-3})	12,6 x10^{-3} (±1,0x10^{-3})	14,2 x10^{-3} (±2,0x10^{-3})
	R^2	0,824	0,958	0,985	0,971	0,959	0,982
PSO	q_e (mg g^{-1})	1,2(±0,10)	1,1(±0,04)	0,6(±0,02)	2,7(±0,18)	2,7(±0,22)	2,8(±0,14)
	k_2 (min^{-1})	8,2x10^{-3} (±2,0x10^{-3})	6,9 x10^{-3} (±1,0x10^{-3})	16,9 x10^{-3} (±2,0x10^{-2})	3,4x10^{-3} (±6,0x10^{-3})	4,1 x10^{-3} (±8,0x10^{-3})	4,8 x10^{-3} (±1,0x10^{-3})
	R^2	0,854	0,979	0,984	0,966	0,956	0,985
Elovich	α (mg g^{-1} min^{-1})	0,02(±0,004)	0,01(±0,001)	0,01(±0,002)	0,03(±0,002)	0,02(±0,005)	0,05(±0,006)
	β (g mg^{-1})	0,72(±0,50)	0,42(±0,20)	0,36(±0,60)	1,4(±0,20)	1,4(±0,19)	1,4(±0,16)
	R^2	0,856	0,986	0,956	0,934	0,924	0,964

Tabela 02: Parâmetros cinéticos da adsorção da TRC e SMZ utilizando os modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e modelo de Elovich
Fonte: Autoria própria (2026)

Para o SMZ, observa-se comportamento distinto (Figura 04a), com maior adsorção em pH 9,5, seguida de pH 7,5 e pH 5,5, atingindo valores de até aproximadamente 2,6 mg g^{-1}. Esse comportamento está associado à natureza ácido-fraca do SMZ,

que em meio alcalino se encontra predominantemente na forma aniônica. Apesar da carga negativa da superfície da resina nessa condição, a adsorção é favorecida por interações não eletrostáticas, como interações hidrofóbicas e ligações de hidrogênio, evidenciando a complexidade do sistema.

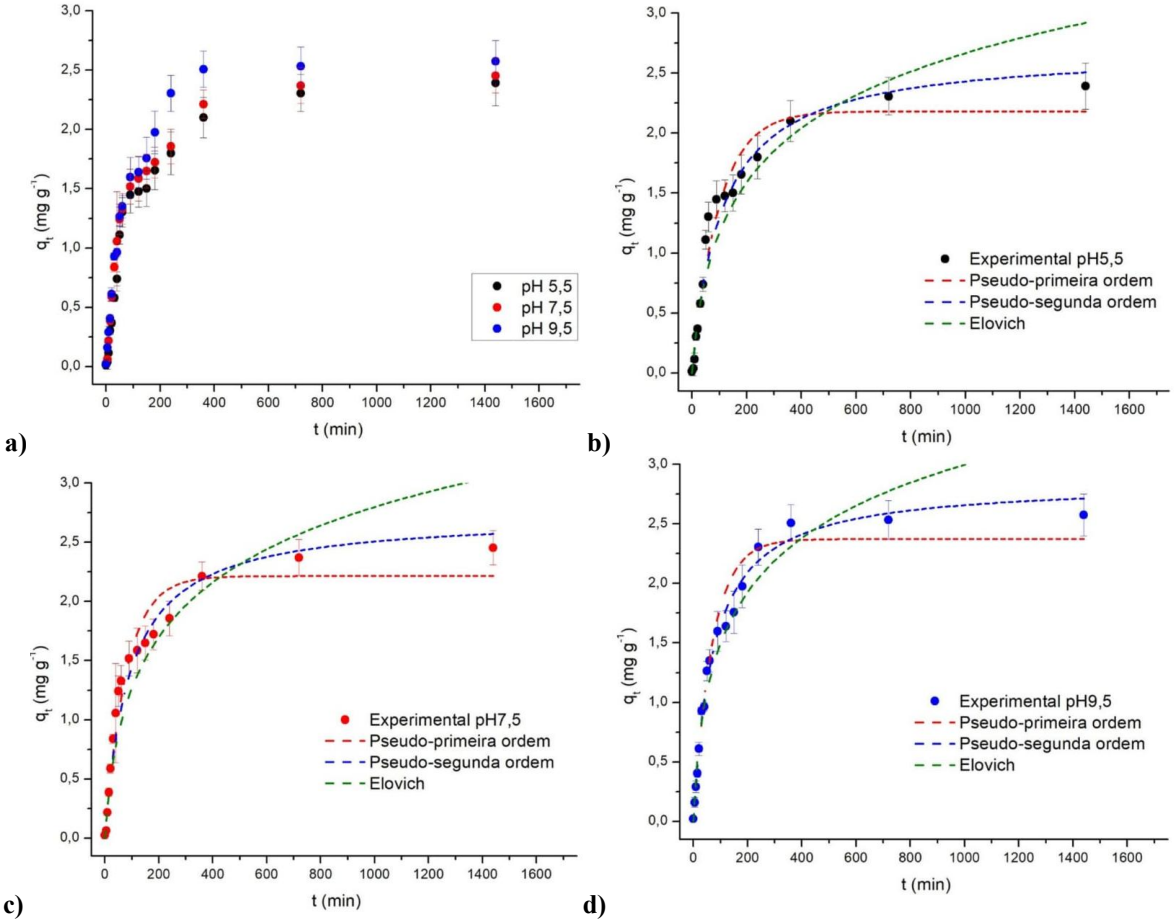


Figura 04: Resultados do ensaio cinético do SMZ, com (a) variação do pH e ajustes cinéticos em (b) pH 5,5; c) pH 7,5 e (d) pH 9,5
Fonte: Autoria própria (2026)

As curvas cinéticas do SMZ (Figura 04b–d) também indicam rápida adsorção inicial, seguida de estabilização em aproximadamente 12 h. Os ajustes cinéticos (Tabela 02) mostram que o modelo de pseudo-primeira ordem apresentou melhor desempenho (R^2 até 0,982), com valores próximos aos do modelo de pseudo-segunda ordem. Esse comportamento sugere que a cinética do processo é controlada predominantemente por mecanismos de difusão externa, associados a interações físicas, como forças de Van der Waals, embora não se possa descartar a contribuição de difusão intrapartícula, conforme discutido por Soldan *et al.* (2023).

De forma integrada, os resultados indicam que a adsorção da TCT é mais dependente do pH, sendo favorecida em condições em que a superfície da resina se encontra positivamente carregada (pH < pH_{PCZ}), o que intensifica interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio em uma superfície energeticamente heterogênea. Em contraste, o SMZ apresenta maior capacidade de adsorção e menor dependência do pH, sendo predominantemente controlado por mecanismos físicos e difusivos, com maior eficiência mesmo em condições de superfície negativamente carregada (pH > pH_{PCZ}).

Essa diferença evidencia que a remoção dos antibióticos não depende exclusivamente da carga superficial do adsorvente, mas resulta da interação entre propriedades do material, especiação dos contaminantes e condições do meio, reforçando a importância da análise integrada entre pH_{PCZ}, cinética e natureza química dos compostos no entendimento dos processos de adsorção em resinas poliméricas.

Do ponto de vista ambiental, a maior capacidade de adsorção observada para o SMZ indica potencial para a remoção de sulfonamidas, frequentemente detectadas em efluentes e águas superficiais. Já a maior dependência do pH observada para a TCT sugere que a eficiência do processo pode variar conforme as condições ambientais, destacando a importância do controle operacional em sistemas de tratamento.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstram que a resina Amberlite XAD-7HP é um material eficiente para a remoção dos antibióticos TCR e SMZ em meio aquoso, sendo o processo influenciado pelas propriedades superficiais do adsorvente e pelas condições do meio, especialmente o pH. A determinação do pH_{PCZ} mostrou-se fundamental para compreender o comportamento da superfície da resina e sua relação com os mecanismos de interação envolvidos na adsorção.

A adsorção da TCR apresentou maior dependência do pH, com maior eficiência em meio ácido e comportamento cinético compatível com superfícies heterogêneas, indicando a predominância de interações específicas. Em contraste, o SMZ apresentou maior capacidade de adsorção e menor sensibilidade ao pH, sendo predominantemente governado por mecanismos físicos e difusivos.

De forma integrada, o estudo sugere que a remoção de antibióticos por resinas poliméricas resulta da combinação entre características do adsorvente, especiação dos contaminantes e condições do meio, reforçando a importância da análise conjunta entre pH_{PCZ} e modelagem cinética para o entendimento e otimização de processos adsortivos aplicados ao tratamento de CE.

Esses resultados indicam que a aplicação de resinas poliméricas pode contribuir para a redução da carga de antibióticos em efluentes, auxiliando na mitigação da disseminação de CE e seus impactos ambientais associados.

Agradecimentos

À Fundação Araucária, (Nº 576/2022 Nº MUL2022201000058) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq (408343/2023-0) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. A Central Analítica Multiusuários da UTFPR Campus medianeira (CEANMED) e ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – LMEV da UNILA.

Referências Bibliográficas

BILA, D. M.; DEZOTTI, M. Fármacos no meio ambiente. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 523–530, 2003. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000400015.

DELGADO-VARGAS, C. A.; ESPINOSA-BARRERA, P. A.; VILLEGAS-GUZMAN, P.; MARTÍNEZ-PACHÓN, D.; MONCAYO-LASSO, A. An efficient simultaneous degradation of sulfamethoxazole and trimethoprim by photoelectro-Fenton process under non-modified pH using a natural citric acid source: study of biodegradability, ecotoxicity, and antibacterial activity. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 29, p. 42275-42289, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-021-17751-5.

DOMÍNGUEZ, J. R.; GONZÁLEZ, T.; PALO, P.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J. Removal of common pharmaceuticals present in surface waters by Amberlite XAD-7 acrylic-ester-resin: Influence of pH and presence of other drugs. **Desalination**, v. 269, n. 1-3, p. 231–238, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.065.

JIANG, T.; WU, W.; MA, M.; HU, Y.; LI, R. Occurrence and distribution of emerging contaminants in wastewater treatment plants: a globally review over the past two decades. **Science of the Total Environment**, v. 951, p. 175664, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175664

KRAEMER, S. A.; RAMACHANDRAN, A.; PERRON, G. G. Antibiotic pollution in the environment: from microbial ecology to public policy. **Microorganisms**, v. 7, n. 6, p. 180, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms7060180.

KÜSTER, A.; ADLER, N. Pharmaceuticals in the environment: scientific evidence of risks and its regulation. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, n. 1483, p. 1145–1155, 2008. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2051.

LE-MINH, N.; KHAN, S. J.; DREWES, J. E.; STUETZ, R. M. Fate of antibiotics during municipal water recycling treatment processes. **Water Research**, v. 44, n. 15, p. 4295–4323, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.020.

LIMA, D. R. S.; AFONSO, J. C.; AQUINO NETO, F. R**.** Fármacos e desreguladores endócrinos no ambiente aquático: implicações para a saúde humana. **Química Nova**, v. 40, n. 3, p. 285–293, 2017. DOI: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170023.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C**. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

QIANG Z.; ADAMS, C. Potentiometric determination of acid dissociation constants (pKa) for human and veterinary antibiotics. **Water Research**. v. 38, n. 12, p. 2874–90, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.03.014.

ROA, K.; BOULETT, A.; SÁNCHEZ, J**.** Exploring the potential of Amberlite IRA-402 in the adsorption of emerging pharmaceutical contaminants in aqueous solution. **Surfaces and Interfaces**, v. 80, p. 108198, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.108198.

SOLDAN, M. E. S.; LIED, E. B.; COSTA JUNIOR, I. L.; BITTENCOURT, P. R. S.; BARALDI, I. J.; GIONA, R. M.; TREVISAN, A. P.; PASSIG, F. H.; CARVALHO, K. Q. Optimizing ciprofloxacin removal using ion exchange resin: exploring operational parameters and assessing toxicity. **Chemical Engineering Science**, v. 282, p. 119317, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119317.

YAYAYÜRÜK, A. E.; YAYAYÜRÜK, O. Facile synthesis of magnetic iron oxide coated Amberlite XAD-7HP particles for the removal of Cr(III) from aqueous solutions: Sorption, equilibrium, kinetics and thermodynamic studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.7, p. 103145, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103145.

EFICIÊNCIA DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NA DESCOLORAÇÃO DE EFLUENTES SINTÉTICOS CONTAMINADOS COM CORANTE TÊXTIL

1 Luan Gabriel Xavier de Souza, 2 Neyliane Costa de Souza 3 Francisco Javier Cuba Teran; 4 Nádson Ricardo Leite de Souza, 5 Jarbas Nunes Ribeiro; 6 Renata Medici Frayne Cuba; 7 Deoclécio Francisco do Nascimento Filho; 8 Gaspar Moreira Braga Júnior

*1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: luan.gabriel@ufg.br; 2 Universidade Estadual da Paraíba, e-mail: neylianead@gmail.com; 3 Universidade Federal de Goiás, e-mail: paco@ufg.br**; 4** Universidade Federal da Paraíba, e-mail: nad_ric@hotmail.com; jarbasribeiro.direito@gmail.com 4 Universidade Federal de Goiás, e-mail: renatafrayne@ufg.br; 5 Universidade Federal do Oeste da Bahia, e-mail: jarbasribeiro.direito@gmail.com**;** 6; 7 Universidade Estadual da Paraíba, e-mail:deocleciofh@gmail.com; 8 Universidade Estadual de Goiás, e-mail:gasparmbjr@ueg.br*

Palavras-chave: Azul de Metileno; Tratamento de águas; POA.

Resumo

Este estudo avalia a remoção do corante azul de metileno de efluentes sintéticos têxteis utilizando Processos Oxidativos Avançados (POA), com ênfase na fotocatálise heterogênea com dióxido de titânio (TiO_2) e radiação ultravioleta (UV). Também foi investigado o efeito do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como potenciador da degradação. Os experimentos foram realizados em um reator de Batelada, variando parâmetros como pH, concentração de TiO_2, tempo de reação e intensidade de radiação. O sistema TiO_2/ H_2O_2/UV obteve uma remoção de 91,5%, superior à do sistema com TiO_2 e UV (55,1%). A presença de H_2O_2 aumentou a geração de radicais hidroxilas ($OH\cdot$), melhorando a eficiência da degradação. Os resultados indicam que os POA, especialmente com fotocatálise, são uma solução eficaz para tratar efluentes têxteis contaminados, embora análises adicionais sobre subprodutos e biotoxicidade sejam necessárias para avaliar a segurança ambiental a longo prazo.

Introdução

A crescente demanda por água para atender aos mais diversos usos, tem gerado tensões significativas entre os usuários, principalmente devido à disponibilidade em qualidade. Esse cenário agrava-se com a liberação de efluentes industriais, providos de substâncias tóxicas e de difícil mineralização, a exemplo dos corantes, usados na indústria têxtil. Quando não tratados adequadamente, esses efluentes podem provocar sérios impactos ambientais, como a contaminação de corpos d'água, que compromete a biodiversidade aquática e o ciclo natural da água. Desde a década de 1970, com o aumento das discussões sobre questões ambientais, a preocupação com os efluentes industriais tornou-se um tema central, especialmente aqueles provenientes de processos que utilizam corantes (Ayedi et al., 2023).

Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados (POA) têm se destacado como soluções promissoras para o tratamento de efluentes contaminados, devido à sua eficácia e potencial de sustentabilidade a longo prazo. Esses processos utilizam agentes oxidantes poderosos, como Ozônio (O_3) e Peróxido de hidrogênio H_2O_2), e/ou catalisadores, como o Ferro (Fe) e o Dióxido de titânio (TiO_2), na presença ou ausência de radiação. Com a geração de radicais hidroxilas ($OH\cdot$), esses processos são capazes de oxidar e mineralizar uma ampla gama de compostos refratários, tornando-os altamente eficazes para a eliminação de contaminantes complexos (Bajpai et al., 2026).

Entre os POA, a fotocatálise heterogênea, utilizando o Dióxido de titânio (TiO_2) como catalisador, tem se mostrado uma das mais promissoras. Essa tecnologia é amplamente utilizada devido à sua natureza heterogênea, que permite a reutilização do catalisador, além de sua capacidade de operar em uma ampla faixa de pH. O TiO_2 é um óxido metálico amplamente reconhecido por sua eficiência na degradação de uma variedade de contaminantes, incluindo os corantes têxteis, que representam um desafio significativo para os sistemas tradicionais de tratamento de águas (Mortezazadeh et al., 2025).

O corante azul de metileno, utilizado principalmente na indústria têxtil, é considerado um composto modelo para estudos de viabilidade no tratamento de efluentes aquosos contaminados. Classificado como corante básico, ele apresenta uma estrutura molecular aromática heterocíclica, sendo amplamente utilizado devido à sua estabilidade e facilidade de monitoramento durante os processos de tratamento de efluentes (Ahmadi et al., 2025).

Dessa forma, este trabalho pretende avaliar a remoção do corante azul de metileno por meio de POA, investigando variáveis como a dosagem de catalisador/oxidante, pH, tempo de reação e intensidade de radiação, a fim de otimizar o processo de descoloração em um reator de Batelada.

Materiais e Métodos

Desenvolvimento dos processos fotocatalíticos

Os experimentos e as análises de caracterização foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), localizado no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Os ensaios foram conduzidos em bateladas, com o efluente em um recipiente de vidro, sob agitação constante e radiação UV proveniente de lâmpadas de mercúrio (254 nm, 15 W) a 30 cm de distância. O procedimento iniciou com a adição de catalisador e/ou oxidante ao efluente, seguido de agitação por 30 minutos no escuro para equilibrar as partículas de corante, dióxido de titânio e peróxido de hidrogênio.

Preparação do efluente sintético:

O efluente foi sintetizado em água destilada, com uma concentração fixa de 150 mg/L, a partir de uma solução estoque de azul de metileno com concentração de 1.000 mg/L. A metodologia C/C_0 (sendo C_0 a concentração inicial e C a concentração instantânea do corante) foi utilizada, para a avaliação da descoloração ao longo do processo de oxidação (Ngo et al., 2026).

Curva de Calibração:

A curva de calibração foi construída utilizando uma solução padrão de azul de metileno com concentração inicial de 250 mg/L. A partir dessa solução, foram realizadas diluições sucessivas para obter concentrações variando de 0,25 mg/L a 26 mg/L. As medições de absorbância foram feitas em um espectrofotômetro SP 200 UV, utilizando o comprimento de onda de 664 nm, que é a máxima absorção do corante.

Etapas:

Para a degradação do corante selecionado, foram realizados ensaios com Dióxido de titânio em suspensão na presença e na ausência do peróxido de hidrogênio. Os experimentos foram subdivididos em duas etapas, como mostra o Quadro 1, abaixo:

Etapas	Constituintes*	Exposição UV
Primeira Etapa	TiO_2 + UV	90min e 240 min
Segunda Etapa	TiO_2 + H_2O_2 + UV	90min e 240 min

Quadro 1 - Etapas experimentais para degradação do corante azul de metileno. Legenda: *30min de equilíbrio para o sistema; TiO_2-dióxido de titânio; H_2O_2-peróxido de hidrogênio.
Fonte: Elaboração autoral (2026).

Variáveis estudadas:

Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para verificar o efeito do pH, os experimentos foram realizados em diferentes valores (3, 7 e 9), dessa forma, podendo compreender o funcionamento e a eficiência de remoção nos três tipos de meios. Antes do início dos testes de fotocatálise, o pH das amostras foi aferido aos valores pré-estabelecidos com soluções de ácido clorídrico (HCl) a 10% ou hidróxido de Sódio (NaOH) 0,1 mol/L.

Concentração do Dióxido de Titânio

Para a concentração do catalisador foi utilizado nas duas etapas o Dióxido de titânio (TiO_2) P25, Degussa (Anatase). As concentrações do catalisador nos experimentos foram de 1; 1,5; e 2 g/L no ensaio de duração de 90 minutos. Nos ensaios com duração de 240 minutos, foi selecionada a concentração que proporcionou melhor desempenho na remoção do corante na etapa de menor duração.

Tempo de irradiação

Para o tempo de irradiação, foram estabelecidos dois períodos. O primeiro, de 90 minutos, foi escolhido com base em estudos anteriores que indicam ser suficiente para avaliar a eficiência inicial do processo de descoloração (SILVA, R., 2022). O segundo, de 240 minutos, foi definido a partir de ensaios preliminares que mostraram que, após este período, o sistema atingiu a saturação, com a taxa de descoloração se estabilizando. Esses tempos foram selecionados para analisar tanto a resposta imediata quanto a evolução do processo ao longo do tempo. As amostras foram coletadas a cada 30 minutos durante os 90 minutos de irradiação e a cada 60 minutos durante os 240 minutos de exposição à radiação UV.

Intensidade de radiação

Para os experimentos com tempo de reação de 90 minutos, foram realizados ensaios com dois diferentes níveis de intensidade de radiação 14,40 mW/cm² (três lâmpadas) e 9,28 mW/cm² (duas lâmpadas), medidos através de um radiômetro RADALERT-100.

Adição de Peróxido de Hidrogênio

Para a realização do processo combinado foi utilizado uma concentração padrão de 0,5% w/w de Peróxido de hidrogênio (PA) a 20%. Para o término da reação do H_2O_2, utilizou-se uma solução de 2g/L de sulfito de sódio (Na_2SO_3), conforme estudos realizados por (LIU *et al.*, 2003).

Resultados e Discussão

No primeiro ensaio, o TiO_2 foi utilizado como fotocatalisador sob radiação UV, e a eficiência de descoloração do corante foi analisada em função de variáveis como pH, concentração de catalisador e tempo de exposição à luz. Embora o sistema TiO_2/UV tenha mostrado potencial de degradação do corante, os resultados iniciais indicaram uma baixa remoção (36%), sugerindo que a fotocatálise com TiO_2 e UV, isoladamente, não foi suficiente para uma descoloração eficaz em concentrações mais altas de corante. Os dados apresentados na Tabela 1 e na Figura 1A, indicam que a maior eficiência de descoloração, nesta etapa, foi alcançada com a combinação de TiO_2 em máxima intensidade de radiação UV, pH 7 e com a maior concentração de TiO_2 (2,0 g/L).

Este resultado sugere que uma maior concentração de catalisador proporciona uma superfície mais eficaz para a adsorção do corante, o que aumenta a interação entre o catalisador e o contaminante, além de aumentar o número de sítios ativos disponíveis na superfície do catalisador, especialmente quando associada a uma maior intensidade de radiação (14,40 mW/cm²). A dosagem do catalisador é fundamental para a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), que desempenham um papel crucial na degradação de poluentes, como apontado por Ahmed (2025).

Entretanto, na faixa de concentração entre 1,0 g/L e 1,5 g/L, foi observada uma leve diminuição ou estagnação na atividade fotocatalítica do TiO_2 em alguns ensaios. Este fenômeno pode ser atribuído ao aumento da agregação das partículas de TiO_2, o que dificulta a irradiação de luz e reduz a eficácia do processo. Este comportamento é caracterizado pelo fenômeno de espalhamento de luz e efeitos de blindagem, conforme discutido por Gohi et al. (2025).

CONCENTRAÇÃO DE TITÂNIO (g/L)	Duas Lâmpadas*(%)			Três Lâmpadas*(%)		
	pH			pH		
	3	7	9	3	7	9
1	93,6	82,02	86,09	87,41	67,04	73,2
1,5	86,09	79,05	82,2	87,16	70,05	75,92
2	95,54	78,54	74,59	87,79	64,79	67,01

Tabela 1 - Percentual residual do azul de metileno, após tratamento, com dióxido de titânio em suspensão - 90 min de reação. Legenda: * Intensidade luminosa de 9,8 mW/cm² ** Intensidade luminosa de 14,40 mW/cm² Fonte: Os autores (2026).

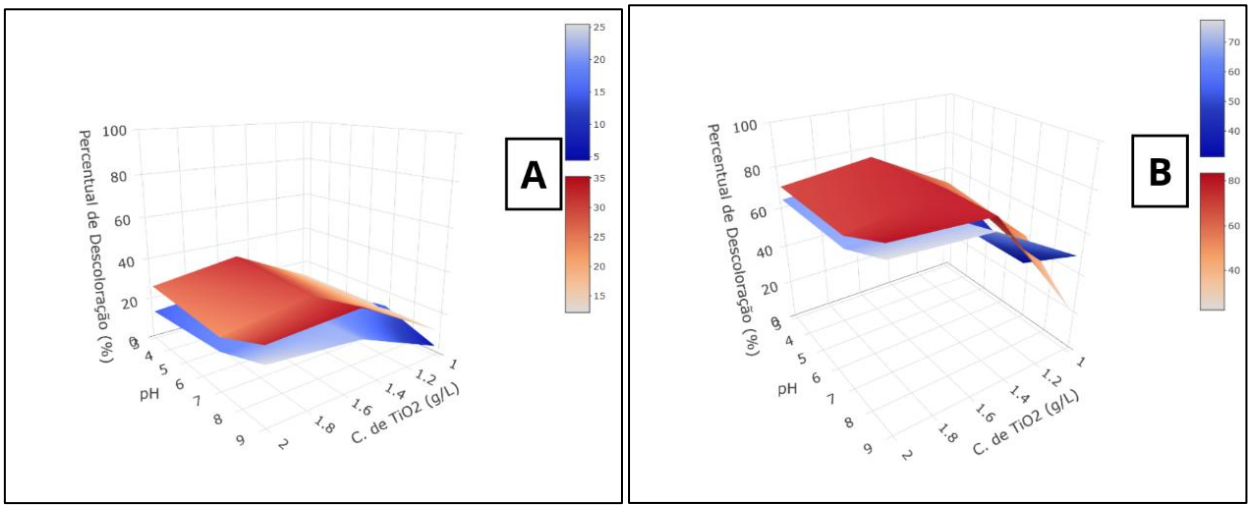


Figura 1A - Percentual de descoloração do efluente após tratamento com dióxido de titânio em suspensão por 90 minutos. Imagem A: sem peróxido de hidrogênio; Figura 1B: com peróxido de hidrogênio. Legenda: * Intensidade luminosa de 9,8 mW/cm² (Azul); ** Intensidade luminosa de 14,40 mW/cm² (Vermelho). Fonte: Os autores (2026).

Nos sistemas fotocatalíticos com TiO_2 e H_2O_2, os resultados indicaram que a presença de H_2O_2 favoreceu a geração de radicais hidroxilas (OH·), responsáveis por acelerar a descoloração do corante. As Tabela 2 e Figura 2 demonstram que a adição de peróxido de hidrogênio no processo TiO_2/H_2O_2/UV resultou em uma eficiência de remoção de até 91,5%. Tal descoloração possibilitou uma clara observação da transparência do efluente, conforme mostrado na Figura 3.

Este valor foi significativamente superior à taxa de remoção obtida no sistema sem H_2O_2. O aumento da eficiência pode ser atribuído à sinergia entre TiO_2 e H_2O_2, pois, sob radiação UV, ambos os reagentes geram radicais hidroxilas e radical superóxido ($O_2^{\cdot-}$), ambos altamente reativos e eficazes na descoloração dos corantes orgânicos.

CONCENTRAÇÃO DE TITÂNIO (g/L) -0,5% w/w (H_2O_2)	Duas Lâmpadas*(%)			Três Lâmpadas*(%)		
	pH			pH		
	47,3	31,31	34,99	47,3	23,69	28,66
1	68,61	31,92	32,5	53,87	19,42	26,99
1,5	50,27	25,57	22,57	77,88	19,41	16,49
2	47,3	31,31	34,99	47,3	23,69	28,66

Tabela 2 - Percentual residual do azul de metileno, após processo combinado, com 1,0 g/L (TiO_2) e 0,5% w/w (H_2O_2) - 90 min de reação. Legenda: * Intensidade luminosa de 9,8 mW/cm² ** Intensidade luminosa de 14,40 mW/cm² Fonte: Elaboração autoral (2026).

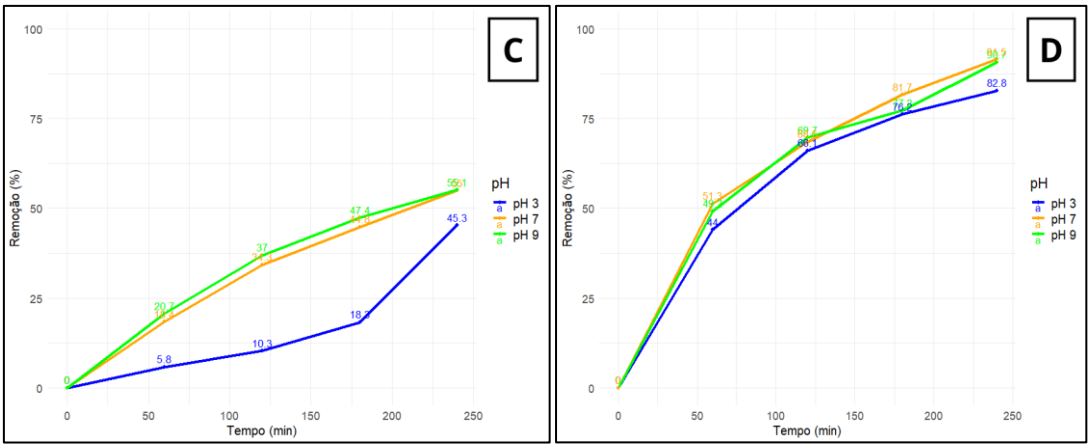


Figura 1C - Perfil temporal do percentual de descoloração do efluente nas condições de 2 g/L de TiO_2 e máxima intensidade de radiação de 14 mW/cm² por 240 min (sem peróxido de hidrogênio); Figura 2D (com peróxido de hidrogênio).
Fonte: Os autores (2026).

O processo fotocatalítico baseado em UV pode ser dividido em duas rotas de formação de radicais, uma induzida por UV e outra catalisada por UV. Nos processos de oxidação avançada (POA) induzidos por UV, como UV/H_2O_2, UV/cloro e UV/persulfato, a radiação UV ativa o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), gerando radicais hidroxilas (OH·) de forma direta (Eq. 1).

Como observado nos estudos de Zhang et al. (2022), nos processos fotocatalíticos catalisados por UV, o TiO_2, ao absorver a radiação UV superior à sua banda proibida, gera elétrons excitados (e^-) e buracos (h^+) com alta capacidade redutora e oxidante, respectivamente (Eq. 2). Os elétrons gerados reduzem o oxigênio, formando radicais superóxido ($O_2^{\cdot -}$), enquanto os buracos interagem com a água para formar radicais hidroxilas (OH·).

Dessa forma, a combinação dessas duas rotas de formação de radicais, tanto induzida por UV quanto catalisada, aumenta a eficácia do processo de degradação, como observado nos estudos de Sugha e Bhatti (2022) e Bajpai et al. (2026), promovendo uma descoloração mais eficiente do efluente (Zhang et al., 2022; Seifikar e Habibi-Yangjeh, 2024).

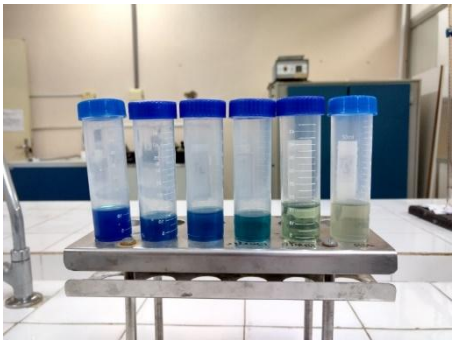


Figura 3 - Resultado do processo de descoloração em sistema combinado (TiO_2/ H_2O_2/ UV).
Fonte: Acervo autoral (2026).

$$H_2O_2 + UV \rightarrow 2\,OH\cdot \quad \text{Eq (01)}$$
$$TiO_2 + UV \rightarrow TiO_2 + h^+ + e^- \quad \text{Eq. (02)}$$

Influência da Radiação

A influência da intensidade da radiação UV foi também investigada, e os resultados mostraram que o aumento da intensidade de radiação de 9,8 mW/cm² para 14,40 mW/cm² resultou em um aumento significativo na taxa de descoloração, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2, este aumento na intensidade da radiação UV favoreceu a dispersão da luz e a geração de radicais, o que, por sua vez, potencializou a eficiência do processo fotocatalítico de descoloração do efluente.

Em relação à formulação pigmentada, Kardar et al. (2023) observaram que, em sistemas fotocatalíticos, a taxa de polimerização e a taxa de modificação final aumentaram com o incremento da intensidade de luz até 40 mW/cm². Embora a intensidade de 14,40 mW/cm² tenha demonstrado uma boa eficiência no presente estudo, é provável que a eficiência continue a aumentar caso a intensidade de radiação seja ainda mais elevada, sem atingir o ponto de saturação do sistema.

Estes resultados estão alinhados com estudos de fotocatálise que destacam a importância da radiação UV na ativação dos sistemas fotocatalíticos (Gohi et al., 2025; Bajpai et al., 2026). A utilização de radiação UV em processos oxidativos avançados tem se mostrado eficaz não apenas para a degradação do corante, mas também para a mineralização de outros

contaminantes. Como observado por Mortezazadeh et al. (2025), ao usar UV em processos combinados com H_2O_2, a eficiência de mineralização é consideravelmente maior, além de exigir uma dosagem menor de oxidante, tornando o processo mais eficaz.

Influência do potencial hidrogeniônico

Além disso, o pH da solução desempenhou um papel crucial na eficiência do processo fotocatalítico. Conforme mostrado nas Tabelas 1 e 2, tanto o pH neutro (7) quanto o pH básico (9) favoreceram a descoloração do corante azul de metileno, enquanto os ensaios realizados em condições ácidas (pH abaixo de 7) apresentaram menores taxas de remoção. Este comportamento pode ser atribuído à influência do pH na geração de radicais hidroxilas (OH·), que são os principais responsáveis pela degradação dos corantes. O pH também afeta a carga superficial do fotocatalisador, o que, por sua vez, impacta a adsorção do corante e a eficácia da fotocatálise.

O pH é um fator determinante na eficiência da fotocatálise, pois influencia diretamente a interação entre o fotocatalisador e os corantes. Em ambientes ácidos, os corantes aniônicos tendem a se adsorver mais facilmente em superfícies carregadas positivamente, facilitando a degradação. Porém, quando o pH é alcalino, a adsorção é prejudicada pela competição entre os grupos hidroxila e as moléculas do corante, além da repulsão causada pela carga negativa do fotocatalisador. Como apontado por Ramesh et al. (2024), essas flutuações no pH alteram a carga superficial do fotocatalisador, afetando seu desempenho de maneira significativa.

O azul de metileno, corante catiônico, interage de forma distinta com o dióxido de titânio (TiO_2), que apresenta um ponto de carga zero (PCZ) em torno de 7,18. Em pH abaixo de 7, o TiO_2 adquire carga positiva, enquanto em pH superior a 7, sua superfície se carrega negativamente (Kiwaan et al., 2020). O comportamento do TiO_2 também varia conforme sua forma cristalina, com o PCZ da anatase entre pH 5,8 e 6,3, e o do rutilo entre pH 5,5 e 6,2 (Kosmulski, 2002). Em pH neutro ou ligeiramente básico, a carga negativa do TiO_2 favorece a adsorção de corantes catiônicos como o azul de metileno, intensificando a interação entre o catalisador e o contaminante. A degradação fotocatalítica do corante é também facilitada pela formação de radicais hidroxilas (OH·), processo favorecido pela maior presença de íons hidroxila em ambientes alcalinos, como observado por Gohi et al. (2025), o que justifica os resultados obtidos durante os ensaios deste trabalho.

Considerações Finais

Este estudo demonstrou a eficácia dos Processos Oxidativos Avançados (POA), com destaque para a fotocatálise heterogênea utilizando TiO_2, radiação UV e H_2O_2, no tratamento de efluentes têxteis contaminados com corante azul de metileno. O sistema TiO_2/ H_2O_2/UV obteve uma remoção de até 91,5%, significativamente superior aos 55,1% alcançados com TiO_2 e UV isolados. A presença de H_2O_2 foi determinante para o aumento da geração de radicais hidroxilas, essenciais para a degradação do corante. A otimização do processo foi fortemente influenciada por parâmetros como pH e intensidade da radiação UV, que mostraram impacto direto na eficiência de descoloração.

Estes resultados confirmam o potencial dos POA como uma solução eficaz para o tratamento de efluentes têxteis. No entanto, futuras investigações são necessárias para analisar os subprodutos da oxidação e a biotoxicidade dos efluentes tratados, garantindo que o processo não gere impactos ambientais indesejáveis. Além disso, a tecnologia pode ser expandida para o tratamento de outros contaminantes industriais, oferecendo uma alternativa promissora para a gestão de efluentes.

Referências Bibliográficas

AHMED, Harez Rashid. Heterogeneous catalysts in advanced oxidation processes: A comprehensive review on antibiotic removal from wastewater. Separation and Purification Technology, v. 374, 2025, p. 133670. ISSN 1383-5866. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133670. Acesso em: 24 mar. 2026.

AHMADI, Bahram; FALLAH, Akram; GHAMARPOOR, Reza; JAMSHIDI, Masoud. Methylene blue beyond the dye: A critical review on its role as a benchmark pollutant in photocatalyst design. Results in Chemistry, v. 18, 2025, p. 102910. ISSN 2211-7156. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102910. Acesso em: 24 mar. 2026.

AYEDI, K.; INNOCENZI, V.; MAZZIOTTI DI CELSO, G.; PRISCIANDARO, M. Water reuse in the textile industry with integrated treatments: membranes and advanced oxidation processes. Desalination and Water Treatment, 309, p. 158–164, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29875. Acesso em: 20 mar. 2026.

BAJPAI, M.; SEIDU, I.; GENGEC, E. A critical and updated review on advanced oxidation processes for micropollutants in aquatic systems: Insights into metal–organic frameworks, mixed metal oxides, effluent toxicity, and cost. Science of the Total Environment, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2026.181398. Acesso em: 24 mar. 2026.

BYRNE, C.; SUBRAMANIAN, G.; PILLAI, S. Recent advances in photocatalysis for environmental applications. Journal of Environmental Chemical Engineering, jul. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343717303846?via%3Dihu. Acesso em: 04 mar. 2026.

GOHI, Bi Foua Claude Alain; ZHU, Xuejun; ZHAO, Shiyong; LIAO, Ni; LI, Aicong; YU, Huajie; ZHANG, Yuting. Photocatalytic removal of methylene blue dye from aqueous solution via F-TiO2 dispersed on layered double oxide. Journal of

Molecular Structure, v. 1344, 2025, p. 142561. ISSN 0022-2860. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142561. Acesso em: 18 mar. 2026.

KARDAR, R. et al. The dependence of conversion rate and final conversion of UV-curable systems, pigmented and non-pigmented, on UV light intensity. Journal of Photochemical & Photobiological Sciences, v. 189, p. 12-19, 2023. ISSN 2405-2367. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jps.2023.12.005. Accessed on: Mar. 24, 2026.

KASIRI, M.B.; ALEBOYEH, H.; ALEBOYEH, A. Degradation of acid blue 74 using fe-zsm5 zeolite as a heterogeneous photo-fenton catalyst. Journal Catalysis B: Environmental, v. 84, p. 9–15, out. 2008.

KIWAAN, H.A.; ATWEE, T.M.; AZAB, E.A.; EL-BINDARY, A.A. Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide. Journal of Molecular Structure, v. 1200, p. 127115, 2020. ISSN 0022-2860. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127115. Acesso em: 24 mar. 2026.

KOSMULSKI, Marek. The significance of the difference in the point of zero charge between rutile and anatase. Advances in Colloid and Interface Science, v. 99, n. 3, p. 255-264, 2002. ISSN 0001-8686. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00080-5. Acesso em: 24 mar. 2026.

LIU, Wenjun; ANDREWS, S.A.; STEFAN, M.I.; BOLTON, J.R. Optimal methods for quenching H2O2 residuals prior to UFC testing. Journal Water Research, v. 37, p. 3697-3703, set. 2003. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12867337. Acesso em: 16 mar. 2026.

MORTEZAZADEH, Fatemeh; AHMADI NASAB, Mahdi; JAVID, Allahbakhsh; CHANGANI, Fazlollah; DEHGHANI, Mohammad Hadi. A review of UV-based advanced oxidation processes in wastewater treatment systems. Desalination and Water Treatment, v. 323, 2025, p. 101388. ISSN 1944-3986. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101388. Acesso em: 12 mar. 2026.

NGO, Vuong Ngoc-Nhat; PHAM, Nhin Van; HA, Tien My; LUONG, Thanh Huynh-Vu; CAO-LUU, Ngoc-Hanh; NGUYEN, Thanh Q.C.; DANG, Giao H. Preparation of Fe3O4/ZIF-9 as an efficient heterogeneous nanocatalyst for brilliant green dye removal via advanced oxidation processes. Journal of Physics and Chemistry of Solids, v. 209, 2026, p. 113265. ISSN 0022-3697. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2025.113265. Acesso em: 14 mar. 2026.

RAMESH, Nirosha et al. Progress in photocatalytic degradation of industrial organic dye by utilising the silver doped titanium dioxide nanocomposite. Heliyon, v. 10, n. 24, p. e40998, 2024. ISSN 2405-8440. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40998. Acesso em: 24 mar. 2026.

SEIFIKAR, Fatemeh; HABIBI-YANGJEH, Aziz. Floating photocatalysts as promising materials for environmental detoxification and energy production: A review. Chemosphere, v. 355, 2024, p. 141686. ISSN 0045-6535. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141686. Acesso em: 06 mar. 2026.

SILVA, Ruthilene Catarina Lima da. Remoção de azul de metileno de solução aquosa através de fotocatálise na presença de nanopartículas de TiO2 sob luz solar natural. Research, Society and Development, v. 11, n. 6, e50311628881, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i6.28881. Recebido: 05 abr. 2022; revisado: 16 abr. 2022; aceito: 04 mai. 2022; publicado: 07 mai. 2022. Disponível em: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.28881. Acesso em: 17 mar. 2026.

SUGHA, A.; BHATTI, M.S. Degradation of methylene blue dye by UV/H2O2 advanced oxidation process: reaction kinetics, residual H2O2 and specific energy consumption evaluation. Desalination and Water Treatment, v. 274, p. 297–307, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28943. Acesso em: 24 mar. 2026.

WIEDMER, David et al. Oxidative power of aqueous non-irradiated TiO2-H2O2 suspensions: Methylene blue degradation and the role of reactive oxygen species. Journal Catalysis B: Environmental, v. 198, out. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.05.036. Acesso em: 17 mar. 2026.

ZHANG, Yanan; ZHAO, Yang-Guo; MAQBOOL, Farhana; HU, Yubo. Removal of antibiotics pollutants in wastewater by UV-based advanced oxidation processes: Influence of water matrix components, processes optimization and application: A review. Journal of Water Process Engineering, v. 45, 2022, p. 102496. ISSN 2214-7144. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102496. Acesso em: 17 mar. 2026.

REMOÇÃO DE NUTRIENTES PELO CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATORES COM MEMBRANA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA COM ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

1 Renato Zimiani de Paula, 2 Eduardo Lucas Subtil, 3 Tatiane Araujo de Jesus

1 Universidade Federal do ABC, e-mail: zimiani.renato@aluno.ufabc.edu.br; 2 Universidade Federal do ABC, e-mail: eduardo.subtil@ufabc.edu.br; 3 Universidade Federal do ABC, e-mail: tatiane.jesus@ufabc.edu.br

Palavras-chave: Análise de Componentes Principais (PCA); fotobiorreatores com membrana (FBRMs); tratamento de efluentes

Resumo

O lançamento de nitrogênio (N) e fósforo (P) de estações de tratamento de esgoto é um dos principais impulsionadores da eutrofização. Fotobiorreatores com membrana (FBRMs) surgem como tecnologia promissora para remoção simultânea de nutrientes e produção de biomassa. Este estudo combina análise bibliométrica, revisão sistemática (2021–2026) e Análise de Componentes Principais (PCA) para investigar relações entre parâmetros operacionais (tempo de detenção hidráulica – TDH; tempo de retenção de sólidos – TRS; e microbiota) e o desempenho do tratamento. Uma busca na Scopus resultou em 92 artigos, dos quais 49 (53,2%) publicados nos últimos cinco anos, indicando crescimento recente da área. Espanha (15) e China (13) respondem por > 57% das publicações; nenhum estudo do Brasil foi encontrado. A PCA mostrou que os dois primeiros componentes principais explicaram 80–86% da variância total. O PC1 apresentou forte correlação positiva com a eficiência de remoção e produtividade, e forte correlação negativa com TRS (r = –0,64 a –0,83). O TDH teve correlações positivas moderadas (r = 0,50–0,70), exceto para remoção de N, onde foi mais relevante. Recomenda-se operar FBRMs com TRS < 15 dias e TDH entre 3 e 5 dias. A variância não explicada (14–20%) indica influência de fatores não controlados (luz, temperatura, composição do efluente).

Introdução

O despejo excessivo de nutrientes em corpos hídricos representa um dos grandes problemas associados à saúde de ambientes aquáticos, por impulsionar o fenômeno de eutrofização (Hei et al., 2025). Muitos estudos apontam as estações de tratamento de esgotos (ETEs) como uma das principais fontes artificiais de nutrientes como fósforo (P) e nitrogênio (N) nesses ambientes (Gao et al., 2025; Song et al., 2025), de forma que tornou-se imperativo o desenvolvimento de estratégias e tecnologias que permitam a remoção de nutrientes de efluentes, com destaque às soluções baseadas na natureza (SBN).

Nesse contexto, os fotobiorreatores com membranas (FBRM) surgem como uma tecnologia inovadora e promissora para o tratamento avançado de efluentes, aliando a remoção de nutrientes à produção de biomassa microalgal com potencial para recuperação de recursos. Os FBRMs integram o cultivo de microalgas em fotobiorreatores (FBRs) com sistemas de separação por membranas, permitindo superar as principais limitações dos sistemas convencionais de tratamento baseados em algas (Ángeles et al., 2020). Os FBRs convencionais, por não possuírem mecanismos de retenção da biomassa, requerem elevados tempos de detenção hidráulica (TDHs), geralmente superiores a três dias, para garantir a permanência das microalgas no reator. Isso resulta em grandes volumes reacionais, altos custos de implantação e operação, e viabilidade reduzida para o tratamento de esgoto em grande escala (Erbland et al., 2020).

Os FBRMs, então, possibilitam a separação da biomassa microalgal da fase líquida do efluente e, consequentemente, o desacoplamento entre o TDH e o tempo de retenção de sólidos (TRS), que, nos FBRs convencionais, são tratados como iguais. Essa característica permite operar com TDHs reduzidos (da ordem de dias ou até horas) enquanto se mantêm TRSs elevados, favorecendo o acúmulo de biomassa ativa no reator. Como resultado, é possível obter maiores concentrações celulares, maior eficiência de remoção de nutrientes e produtividade de biomassa superior, com volumes reacionais significativamente menores (Liao; Fatehi; Liao, 2024).

Além da separação física, os consórcios microbianos formados por microalgas e bactérias nos FBRMs atuam de forma sinérgica na remoção de poluentes. Processos complementares como assimilação biológica, precipitação de P (induzida pelo aumento do pH decorrente da fotossíntese), nitrificação e desnitrificação ocorrem simultaneamente, aumentando a eficiência global do tratamento (Arango et al., 2023; Segredo-Morales et al., 2023; Lima; Sueitt; Daniel, 2024; Cardozo et al., 2025; Pratt; Soares, 2025). Estudos reportam eficiências de remoção de nutrientes que variam de 40 a 60% em esgotos primários (Evans et al., 2021; Wang et al., 2024) a mais de 75% em efluentes secundários (Luo et al., 2019; James et al., 2023; Cardozo et al., 2025), dependendo da configuração do reator e das condições operacionais.

Apesar dos avanços e do potencial demonstrado, ainda não há consenso na literatura sobre as configurações operacionais ideais dos FBRMs para maximizar a remoção de nutrientes e a produtividade de biomassa. Parâmetros como TDH, TRS, espécie de microalga ou composição do consórcio microbiano e o tipo de membrana influenciam o desempenho de forma interdependente, e a diversidade de condições experimentais dificulta a generalização dos resultados.

Diante desse cenário, este estudo realiza uma análise bibliométrica e uma revisão sistemática da literatura dos últimos cinco anos (2021–2026), empregando a Análise de Componentes Principais (PCA) para identificar relações quantitativas entre as variáveis operacionais (TDH, TRS e composição da microbiota) e os desempenhos de remoção de nutrientes (N e P) e de crescimento de biomassa. O objetivo é mapear a produção científica recente e extrair relações sistemáticas que possam orientar o projeto e a operação de FBRMs, contribuindo para o avanço do tratamento de efluentes e a recuperação sustentável de recursos.

Metodologia

O presente estudo integrou análise bibliométrica a uma revisão sistemática quali-quantitativa e estatística da literatura recente sobre tratamento de águas residuárias por cultivo de microalgas em FBRMs. Os artigos foram selecionados pelo intervalo de publicação de 2021 a 2026, na plataforma Scopus, da Elsevier, a partir de uma busca pelas seguintes palavras-chave: "fotobiorreator", "biomassa de microalgas", "tratamento de efluentes" e "membranas", excluindo-se artigos de revisão e artigos de eventos, limitando-se somente a artigos com abordagem experimental. Também foram excluídos estudos que não destacaram claramente informações de taxas de remoção de P e de N, de produtividade da biomassa, espécies de microalgas adotadas e valores de TDH e TRS.

Buscou-se nos artigos informações sobre a geometria do reator (tubular/cilíndrico, placas planas e mistos), tipo de membrana, tipo de efluente tratado, fluxo da membrana, espécie de microalgas ou consórcio microbiano adotado, TDH, TRS, taxas de remoção de fósforo e nitrogênio totais, taxa de produtividade de biomassa, estratégia de colheita das microalgas e de controle de depósito da membrana *(fouling)*.

Estes dados foram compilados em uma tabela e tratados estatisticamente no *software* RStudio. Foi realizada a exclusão por pares e conversão de todas as variáveis não numéricas para tal. As espécies de microalgas mais frequentes receberam valores numéricos próprios, enquanto as menos frequentes foram classificadas como "Outras".

A fim de buscar padrões e associações entre conjuntos específicos de parâmetros operacionais e os resultados de tratamento desejados, três PCAs separadas foram realizadas utilizando o *software* em R. Cada PCA teve como variáveis ativas uma das três métricas de desempenho (remoções de P e N totais, e produtividade de biomassa). As variáveis explicativas em todas as análises foram TDH, TRS e as variáveis de espécie. Gráficos foram gerados para visualizar como os vetores das variáveis operacionais se relacionam com a dispersão dos estudos no espaço definido pelas componentes principais (PC1 e PC2), que capturam a maior variância dos dados de desempenho.

A partir dos dados bibliográficos da plataforma Scopus — exportados como arquivo .csv —, foi gerado um mapa cientométrico das palavras-chave no *software VOSviewer* (versão 1.6.20.0), por análise de co-ocorrência de todas os termos, num número mínimo de 10 vezes. O mapa foi utilizado para compreender o agrupamento dos termos em *clusters* de palavras-chave correlacionadas nos estudos de FBRMs.

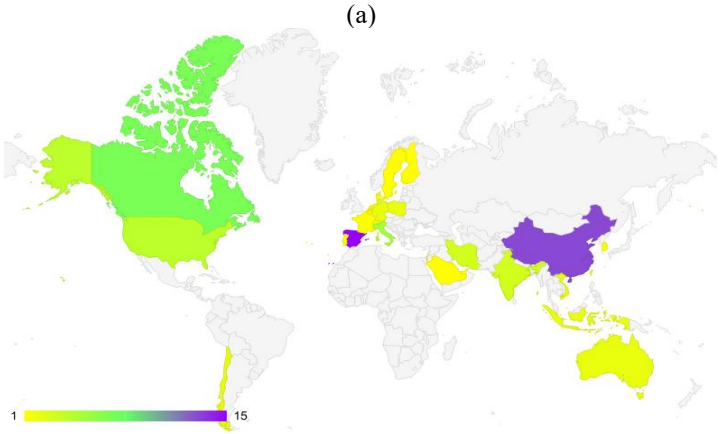
Resultados e discussão

Levantamento bibliométrico

A busca na plataforma Scopus por estudos relacionados ao uso de FBRMs no tratamento de águas residuárias resultou em 92 artigos científicos no total, sendo que aqueles que se encontram no recorte temporal deste estudo (2021 - 2026) totalizam 49 documentos, representando 53,2% de toda a produção acadêmica presente na plataforma Scopus associada às palavras-chave usadas na busca. Este dado sugere um crescimento expressivo e uma consolidação recente do campo de pesquisa, indicando que os FBRMs têm despertado interesse crescente da comunidade científica como alternativa tecnológica para o tratamento de efluentes e recuperação de recursos.

A Figura 1a apresenta a distribuição geográfica dos 49 artigos resultantes da busca, por país de origem dos estudos, e demonstra uma concentração de artigos oriundos da Espanha (15) e da China (13), correspondendo juntos a mais de 57% de toda a produção acadêmica no período analisado. Nota-se, ainda, a presença de países de economia emergente, como Índia, Irã, Indonésia, etc., além de uma diversidade geográfica quanto à origem das publicações, com contribuições em quase todos os continentes, à exceção do continente africano, o que sugere que os FBRMs são reconhecidos como uma tecnologia de interesse global, adaptável a diferentes contextos socioeconômicos e climáticos. Destaca-se, ainda, a ausência de estudos originários do Brasil, apesar do potencial do país para o cultivo de microalgas, devido às condições climáticas favoráveis proporcionadas pelo clima tropical (Cardozo et al., 2025). Isso representa uma lacuna de conhecimento na produção brasileira, especialmente considerando-se a baixa cobertura dos serviços centralizados de saneamento no país e a demanda crescente por tecnologias de tratamento descentralizado de esgotos, onde os FBRMs poderiam ser vantajosos, se adotados.

(a)



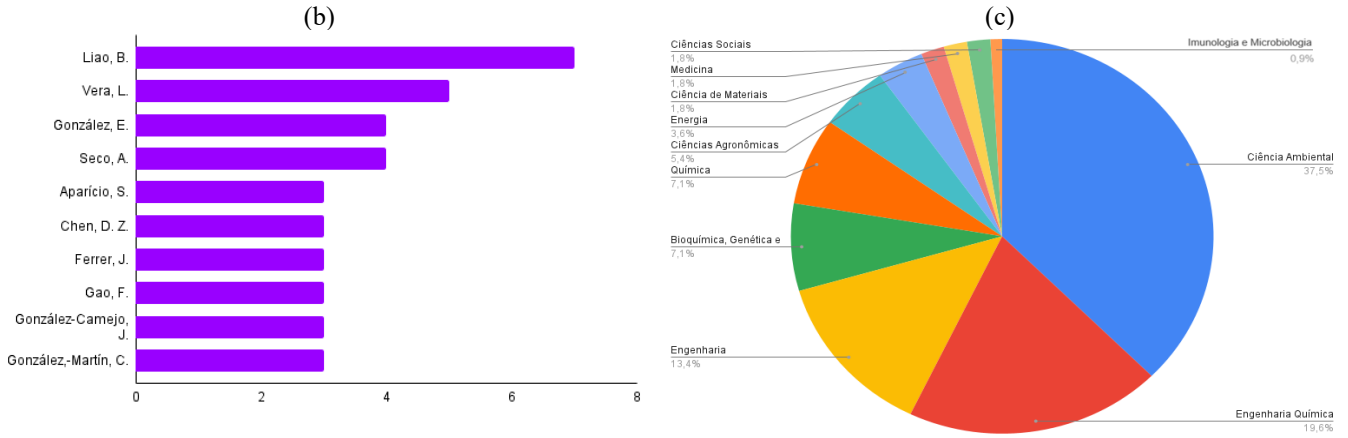


Figura 01: Distribuição dos artigos resultantes da busca (a) por país de origem; (b) entre os 10 principais autores; (c) por área do conhecimento
Fonte: Scopus (2026)

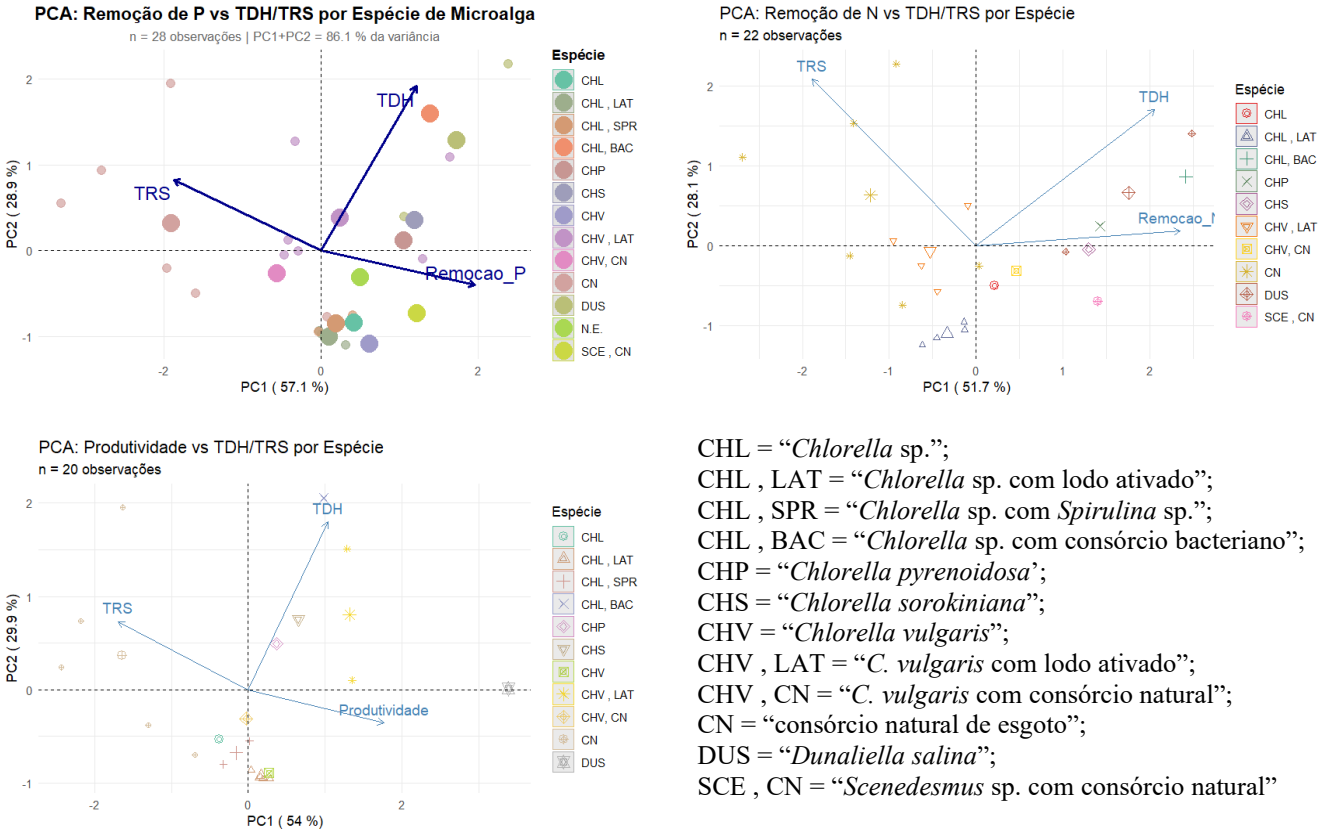
Já a Figura 1b apresenta os dez principais autores que publicaram trabalhos desse tema nos últimos 5 anos. Vê-se a predominância de autores espanhóis, o que dialoga com os resultados do levantamento apresentado na Figura 1a, entretanto não há muitos pesquisadores de universidades chinesas. Isso pode representar que, apesar de a China ser o segundo país que mais contribuiu com publicações correspondentes às palavras-chave da busca, seus autores não concentram um grande número de publicações em grupos individuais, o que sugere um maior número total de autores, enquanto na Espanha, os grupos de estudo são mais concentrados em figuras centrais. Isso é particularmente notável quando se analisa a filiação institucional dos autores, em que os seis autores espanhóis mais relevantes na busca pertencem a apenas duas universidades (Universidad de La Laguna e Universitat de València).

Do ponto de vista de redes de colaboração, a concentração da produção em poucos grupos de pesquisa sugere que o campo dos FBRMs ainda é relativamente emergente e desenvolvido por poucos laboratórios de excelência, o que representa uma oportunidade para a formação de novas redes e para a inserção de pesquisadores de países emergentes, como o Brasil, em colaborações internacionais que possam acelerar o desenvolvimento de competências locais.

Quanto às áreas do conhecimento as quais são englobadas pelos artigos da busca, observa-se uma abordagem interdisciplinar para o cultivo de microalgas em FBRMs para o tratamento de efluentes. A Figura 1c apresenta a distribuição das áreas do conhecimento abrangidas nos estudos que tratam de FBRMs, sendo a área predominante as Ciências Ambientais (42 artigos). A grande área das Engenharias e, particularmente, da Engenharia Química (22 artigos), evidenciam a forte componente de processos de separação (como as membranas), reatores e fenômenos de transporte envolvidos na operação dos FBRMs. A presença expressiva desta área indica que o desenvolvimento tecnológico e a otimização de parâmetros operacionais (TDH, TRS e configurações de membrana) são preocupações centrais da pesquisa com esta tecnologia. Outras áreas que merecem destaque são as Ciências Biológicas e Agronômicas, que demonstram que uma das preocupações centrais dos estudos com microalgas em FBRMs são voltados à composição bioquímica e aproveitamento da biomassa para fins de aplicações práticas, como no campo dos biocombustíveis e biofertilizantes.

Levantamento bibliográfico

As PCAs permitiram reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de associação entre as variáveis operacionais e de resultados dos FBRMs dos estudos (Figura 2). Em todos os casos, as duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2) explicaram aproximadamente 80% da variabilidade dos dados (no caso da análise para remoção de N) ou mais (para as PCAs para remoção de P e produtividade de biomassa) da variância total dos dados, o que indica que sua estrutura é bem representada no plano bidimensional.



CHL = "*Chlorella* sp.";
CHL , LAT = "*Chlorella* sp. com lodo ativado";
CHL , SPR = "*Chlorella* sp. com *Spirulina* sp.";
CHL , BAC = "*Chlorella* sp. com consórcio bacteriano";
CHP = "*Chlorella pyrenoidosa*';
CHS = "*Chlorella sorokiniana*";
CHV = "*Chlorella vulgaris*";
CHV , LAT = "*C. vulgaris* com lodo ativado";
CHV , CN = "*C. vulgaris* com consórcio natural";
CN = "consórcio natural de esgoto";
DUS = "*Dunaliella salina*";
SCE , CN = "*Scenedesmus* sp. com consórcio natural"

Figura 02: Análise de Componentes Principais para (a) remoção de P; (b) remoção de N; (c) produtividade da biomassa em função do tempo de detenção hidráulica (TDH) e do tempo retenção de sólidos (TRS)
Fonte: autoria própria

No caso da PCA que relaciona a remoção de P às variáveis operacionais dos FBRMs (Figura 2a), aPC1 apresentou forte correlação positiva com a remoção (r = 0,865) e forte correlação negativa com TRS (r = –0,825), além de correlação moderada positiva com o TDH (r = 0,535), que pode ser observado pelo sentido dos vetores associados a cada um dos parâmetros no gráfico, em que o vetor Remocao_P se apresenta quase diametralmente oposto ao vetor TRS e no mesmo sentido que o vetor TDH. Esse padrão indica que a PC1 representa essencialmente um gradiente de eficiência de remoção de P inversamente relacionado ao TRS. Tal comportamento relativo ao TRS pode ser visto também nas PCAs para remoção de N e produtividade da biomassa nos FBRMs. Este padrão sugere que a renovação frequente da biomassa microalgal nos reatores (TRS < 15 dias) favorece a remoção de nutrientes por esses organismos ao mesmo tempo que permite manter a produtividade de biomassa mais elevada. Isso se deve possivelmente ao fato da renovação das microalgas permitir a manutenção da biomassa na fase de crescimento exponencial, em que há maior consumo de recursos por parte dos organismos para manter o desenvolvimento celular em uma alta taxa de produtividade (Li et al., 2024). Além disso, sistemas com alta retenção de sólidos podem levar a efeitos de sombreamento, devido à obstrução da passagem de luz pelo meio líquido, que torna-se opaco pela grande quantidade de biomassa, levando a redução da atividade fotossintética e do metabolismo da biomassa, de forma que a captação de nutrientes e o crescimento dos organismos fica comprometido (Saccardo et al., 2025).

A contribuição positiva do TDH em todas as PCAs indica que tempos mais longos de contato entre efluente e biomassa (maiores que 3 dias) também estão associados à captação de nutrientes e produtividade do sistema de cultivo de microalgas. Destaca-se a correlação observada entre a remoção de N e o TDH (Figura 2b), em que o TDH apresentou quase a mesma correlação que a própria remoção dentro da PC1 (0,701 e 0,802, respectivamente), indicando que, a remoção deste nutriente está muito mais atrelada ao TDH que aos demais parâmetros. Já na Figura 2a, o TDH dominou a correlação em PC2 (r = 0,840), com contribuições muito baixas das outras variáveis (r = –0,175 para Remocao_P e 0,361 para TRS), de forma que esse componente representa um eixo de variação no TDH independente da eficiência de remoção, permitindo, em tese, que se diferencie espécies que requerem TDH elevado (acima de 3 dias) daquelas adaptadas a TDHs mais baixos (menores que 3 dias) através da observação do gráfico. Para confirmar a robustez dos resultados, as PCAs foram repetidas suprimindo valores extremos de TDH (valores >5 dias ou <1 dia) e de TRS (>30 dias ou <3 dias). As correlações entre as variáveis originais e os escores dos componentes principais (PC1) foram recalculadas após a remoção desses outliers. Em todas as três bases de dados (P, N e biomassa), as diferenças observadas nos coeficientes de correlação (r) foram inferiores a 0,05 em relação aos valores originais apresentados nas seções anteriores. Por exemplo, a correlação entre Remoção_P e PC1 passou de 0,865 para 0,857; a correlação entre Remoção_N e PC1 variou de 0,802 para 0,796; e a correlação entre Produtividade e PC1 alterou-se de 0,847 para 0,841. Essas pequenas variações

indicam que os padrões identificados não são induzidos por observações atípicas e que as conclusões são consistentes mesmo quando se restringe a faixa dos parâmetros operacionais. A análise de confiança demonstrou que os intervalos de confiança (95%) para os autovalores e para as cargas dos componentes principais são relativamente estreitos, não ultrapassando ±15% em torno dos valores observados. Todos os intervalos para as correlações das variáveis com PC1 (as mais relevantes para a interpretação) excluíram o zero, confirmando a significância estatística das relações identificadas – por exemplo, o IC para a correlação TRS–PC1 em P foi [-0,88; -0,77], e para Remoção_P–PC1 foi [0,81; 0,92]. Entretanto, vale ressaltar que o espaço amostral deste estudo não abarca número suficientemente grande de artigos com cada uma das espécies (algumas com n = 1 ou 2) para se fazer inferências estatísticas satisfatórias com base nas PCA. Ainda assim, espécies da linhagem *Chlorella* apresentaram alta eficiência de remoção de P mesmo em TDHs baixos. Este resultado pode indicar que espécies desse gênero de microalgas são indicadas para a operação de FBRMs compactos ou de alta vazão, que trabalham sob TDHs mais baixos. Entretanto, tal resultado pode também ser atribuído apenas à maior quantidade de estudos com microalgas deste gênero, sendo a taxonomia mais observada (38,4% dos estudos) no levantamento bibliográfico (Figura 3).

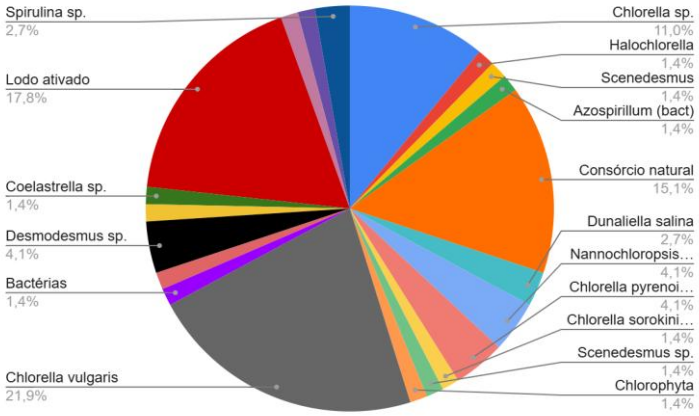


Figura 03: Distribuição das espécies na biomassa dos fotobiorreatores nos estudos levantados
Fonte: autoria própria

A prevalência de espécies do gênero *Chlorella* se destacou também no mapa de termos resultantes da busca pelos artigos na plataforma Scopus (Figura 4). Nele, observa-se que a única espécie de microalga que se destaca dentre os termos de busca foi a *Chlorella vulgaris*, de forma que pode-se inferir a predominância dessa linhagem de microalgas em estudos com FBRMs. A predominância desse gênero pode ser atribuída a sua alta produtividade de biomassa e alta tolerância a condições ambientais diversas, o que o torna preferível em estudos de cultivo de microalgas aliado ao tratamento de efluentes (Azizi et al., 2021).

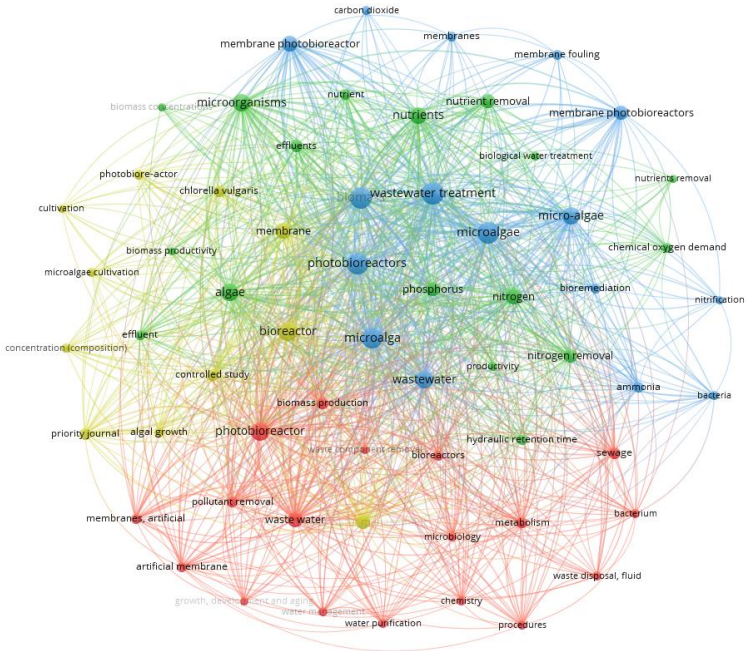


Figura 04: Mapa de termos resultantes da busca segundo suas interconexões
Fonte: autoria própria

O mapa cientométrico compilou as palavras-chave presentes nos artigos em grupos comuns (*cluster*) e os organizou segundo suas conexões. Os termos mais comuns nos artigos foram representados por balões maiores e termos que aparecem em estudos comuns são conectados por linhas curvas. O primeiro *cluster* (vermelho) agrupou termos relacionados à infraestrutura e operação dos sistemas ("membranas", "efluentes", etc.) e processos bioquímicos e microbiológicos ("metabolismo", "microbiologia", etc.) que ocorrem nos FBRs sendo o *cluster* mais abrangente, com termos desde a concepção dos reatores à remoção de poluentes e gerenciamento de água. O segundo *cluster* (verde) agrega termos referentes a parâmetros de projeto e desempenho dos sistemas, com termos como "tempo de detenção hidráulica", "demanda química de oxigênio", "remoção de nutrientes", etc. Estes termos, portanto, são associados à engenharia de processos aplicada à remoção de nutrientes por sistemas avançados de tratamento. O terceiro *cluster* (azul) combina aspectos biológicos e tecnológicos relacionados ao tratamento de águas residuárias, com termos associados, também, aos problemas operacionais dessas tecnologias, como "depósito de membrana". Este *cluster* reflete a interface entre a microbiologia e a tecnologia de membranas nos processos de tratamento por FBRMs. Já o quarto *cluster* (amarelo) centra-se nos termos associados ao cultivo de microalgas em biorreatores, com termos ligados à produtividade e composição de biomassa e, mesmo, espécies (refletido pela presença do termo "*Chlorella vulgaris*" neste grupo). A organização dos termos de busca nestes *clusters* permite, portanto, avaliar os núcleos de estudo relacionados aos FBRMs no tratamento de efluentes e como seus conceitos relacionam-se uns aos outros. Isso permite compreender o andamento dos estudos de cultivo de microalgas em FBRMs aliado ao tratamento de efluentes.

Como já apontado, uma limitação importante deste estudo decorre da heterogeneidade dos dados extraídos da literatura. Embora a PCA seja robusta a certas variações, os artigos analisados diferem significativamente em condições experimentais não controladas, tais como: intensidade luminosa (que variou de 50 a 500 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ entre os estudos), temperatura (15–35°C), pH inicial do efluente (6,5–8,5), composição do esgoto (primário vs. secundário vs. sintético), tipo de membrana (microfiltração vs. ultrafiltração) e regime de operação (batelada vs. contínuo). Essas diferenças introduzem ruído nos dados que a PCA não consegue eliminar completamente, contribuindo para os 14–20% de variância não explicada. Por exemplo, um estudo com alta intensidade luminosa pode superestimar a remoção de nutrientes em baixo TRS, enquanto outro com baixa luz pode subestimar o mesmo efeito. Recomenda-se que futuros estudos adotem protocolos padronizados mínimos (ex.: relatar intensidade luminosa em termos de irradiância média no reator, e não apenas na fonte) para permitir metanálises mais precisas.

Considerações finais

A PCA mostrou-se uma análise multivariada adequada para estudar o comportamento de sistemas de FBRMs visando a remoção de nutrientes de efluentes pelo cultivo de microalgas. A forte correlação negativa entre as eficiências (de remoção e produtividade) e TRS reforçam a importância de manter baixos TRS (menores que 15 dias) para sustentar altas taxas de desenvolvimento dos microrganismos. Já o TDH apresentou contribuição positiva, porém secundária, indicando que, embora tempos de contato mais longos (maiores que 3 dias) favoreçam a remoção de P e N, seu efeito é menos determinante que o do TRS. No entanto, TDHs muito elevados (maiores que 5 dias) podem levar a menores taxas de crescimento microbiano, devido a limitações operacionais, se não acompanhados de controle do TRS. Deve-se, portanto, levar seriamente ambos os parâmetros em consideração quando do dimensionamento de FBRMs. Além disso, os 14 – 20% de variância não explicada por PC1+PC2 em todos os casos analisados indicam que fatores não controlados (como luz, temperatura e pH) influenciam o desempenho dos FBRMs. Essa constatação reforça a necessidade de estudos futuros com delineamentos padronizados para a compreensão de tais efeitos.

Apesar das considerações fornecidas por esta análise multivariada da operação de FBRMs, não foi possível concluir a influência da composição da biota cultivada na remoção de nutrientes dos efluentes, devido ao baixo número de repetições. Assim, as limitações desta análise são que os dados são compilados de diferentes estudos, com variações nas condições experimentais (intensidade luminosa, temperatura e composição do meio) que não poderiam ser padronizadas e o baixo número de réplicas para a maioria das espécies (com exceção apenas de *Chlorella* spp., presente em cerca de 38% dos estudos), que não permite fazer inferências quanto à eficiência dos sistemas em função de sua composição biológica.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de mestrado para Renato Zimiani de Paula e à Universidade Federal do ABC (UFABC) pelo apoio à pesquisa.

Referências bibliográficas

Alam, M. M. et al. Community structure and function during periods of high performance and system upset in a full-scale mixed microalgal wastewater resource recovery facility. **Water Research**, v. 259, p. 121819, 2024.

Amini, M.; Mohamedelhassan, E.; Liao, B. The Biological Performance of a Novel Electrokinetic-Assisted Membrane Photobioreactor (EK-MPBR) for Wastewater Treatment. **Membranes**, v. 12, n. 6, p. 587, 2022.

Ángeles, R. et al. Strategies for N2 and O2 removal during biogas upgrading in a pilot algal-bacterial photobioreactor. **Algal Research**, v. 48, p. 101920, 2020.

Arango, J. et al. The potential of membrane-assisted microalgae-bacteria consortia for the treatment of real municipal sewage. **Journal of Water Process Engineering**, v. 56, p. 104527, 2023.

Azizi, S. et al. Nitrate and phosphate removal from treated wastewater by Chlorella vulgaris under various light regimes within membrane flat plate photobioreactor. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 40, n. 2, p. e13519, 2021.

Cardozo, G. S. et al. Impacts of tropical climate on outdoor treatment of anaerobically digested sanitary wastewater using native microalgae. **Heliyon**, v. 11, n. 2, p. e41848, 2025.

Dang, B.-T. et al. Effect of biomass retention time on performance and fouling of a stirred membrane photobioreactor. **Science of The Total Environment**, v. 864, p. 161047, 2023.

Dey, R. et al. Exploring advanced phycoremediation strategies for resource recovery from secondary wastewater using a large scale photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 391, p. 129986, 2024.

Díaz, O. et al. Recirculating packed-bed biofilm photobioreactor combined with membrane ultrafiltration as advanced wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 27, p. 69977-69990, 2023.

Díaz, V. et al. Effect of urban wastewater ratio in the influent of a membrane photobioreactor for microalgae cultivation and nutrient removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 112527, 2024a.

Díaz, V. et al. Effect of hydraulic retention time and treated urban wastewater ratio on progressive adaptation of an inoculated microalgae in membrane photobioreactors. **Journal of Environmental Management**, v. 371, p. 123005, 2024b.

Ding, M. et al. Enhanced nutrient removal and bioenergy production in microalgal photobioreactor following anaerobic membrane bioreactor for decarbonized wastewater treatment. **Bioresource Technology**, v. 364, p. 128120, 2022.

Erbland, P. et al. Design and performance of a low-cost, automated, large-scale photobioreactor for microalgae production. **Aquacultural Engineering**, v. 90, p. 102103, 2020.

Evans, L. et al. Effect of pot-ale enrichment on the treatment efficiency of primary settled wastewater by the microalga Chlorella vulgaris. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, p. 129436, 2021.

Ferrera, E. et al. Resources recovery from domestic wastewater by a combined process: anaerobic digestion and membrane photobioreactor. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 37, p. 49560-49573, 2024.

Gao, F. et al. Mixotrophic cultivation of microalgae coupled with anaerobic hydrolysis for sustainable treatment of municipal wastewater in a hybrid system of anaerobic membrane bioreactor and membrane photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 337, p. 125457, 2021.

Gao, J. et al. Water quality evaluation, pollution sources apportionment, and environment management strategies in plain reservoirs: A case study of Tianhe Lake, China. **Ecological Indicators**, v. 175, p. 113491, 2025.

Hei, P. et al. Unraveling eutrophication controversies: Innovative strategies and holistic perspectives. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 55, n. 3, p. 147-168, 2025.

Huang, K.-X. et al. Effect of external acetate added in aquaculture wastewater on mixotrophic cultivation of microalgae, nutrient removal, and membrane contamination in a membrane photobioreactor. **Journal of Environmental Management**, v. 349, p. 119391, 2024.

James, A. O. et al. Exploration of Microalgae-Activated Sludge Growth Performance in Lab-Scale Photobioreactors under Outdoor Environmental Conditions for Wastewater Biotreatment. **Phycology**, v. 3, n. 4, p. 484-502, 2023.

Li, K.-Y. et al. Signal molecule-mediated algae-bacteria interactions and membrane-enabled separation synergize wastewater bioremediation. **Chemical Engineering Journal**, v. 523, p. 168368, 2025.

Li, P. et al. Outdoor tubular photobioreactor microalgae-microorganisms biofilm treatment of municipal wastewater: Enhanced heterotrophic assimilation and synergistic aerobic denitrogenation. **Bioresource Technology**, v. 408, p. 131151, 2024.

Liao, Y.; Fatehi, P.; Liao, B. A Study of Theoretical Analysis and Modelling of Microalgal Membrane Photobioreactors for Microalgal Biomass Production and Nutrient Removal. **Membranes**, v. 14, n. 12, p. 245, 2024.

Lima, E. M. M. N.; Sueitt, A. P. E.; Daniel, L. A. Using correlation of variables to compare different configurations of microalgae-based wastewater treatment systems. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 5, p. 4957-4966, 2024.

Luo, Y. et al. A pilot trial-based life cycle assessment of self-forming dynamic membrane bioreactor (SFDMBR) and comparative analysis with conventional treatment processes. **Journal of Water Process Engineering**, v. 68, p. 106493, 2024.

Mirzaei, M. et al. Biodesalination of saline aquaculture wastewater with simultaneous nutrient removal and biomass production using the microalgae Arthrospira and Dunaliella in a circular economy approach. **Desalination**, v. 581, p. 117564, 2024.

Moglie, M. et al. Valorization of olive mill wastewater for Arthrospira platensis production. **Cell Reports Sustainability**, v. 1, n. 2, p. 100017, 2024.

Mora-Sánchez, J. F. et al. Towards Optimisation of Microalgae Cultivation through Monitoring and Control in Membrane Photobioreactor Systems. **Water**, v. 16, n. 1, p. 155, 2023.

Mousavi Farajzadeh, S. S.; Zamir, S. M. Enhanced desalination of real brackish wastewater from a power plant and production of value-added products using a photosynthetic microbial fuel cell. **Desalination**, v. 609, p. 118889, 2025.

Movahed, E. et al. Investigation of Two-Stage Membrane Bioreactor Potential of Activated Sludge and Microalgae in Municipal Wastewater Treatment. **Journal of Environmental Engineering**, v. 148, n. 12, p. 04022077, 2022.

Nguyen, M. T. et al. Removal of Nutrients and COD in Wastewater from Vietnamese Piggery Farm by the Culture of Chlorella vulgaris in a Pilot-Scaled Membrane Photobioreactor. **Water**, v. 14, n. 22, p. 3645, 2022.

Pratt, C.; Soares, A. New opportunities for biologically and chemically mediated adsorption and precipitation of phosphorus from wastewater. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 92, p. 103261, 2025.

Rojo, E. M. et al. Agricultural products from algal biomass grown in piggery wastewater: A techno-economic analysis. **Science of The Total Environment**, v. 887, p. 164159, 2023.

Saccardo, A. et al. Scaling-up information from high-throughput pulsed light data to predict microalgae growth dynamics in photobioreactors. **Algal Research**, v. 89, p. 104073, 2025.

Segredo-Morales, E. et al. Secondary wastewater effluent treatment by microalgal-bacterial membrane photobioreactor at long solid retention times. **Journal of Water Process Engineering**, v. 49, p. 103200, 2022.

Segredo-Morales, E. et al. Performance of a novel rotating membrane photobioreactor based on indigenous microalgae-bacteria consortia for wastewater reclamation. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 119, p. 586-597, 2023.

Segredo-Morales, E. et al. Novel vertical upflow multi-column configured membrane photobioreactor with a filtration control system for outdoor microalgae-bacteria cultivation, harvesting and wastewater reclamation. **Chemical Engineering Journal**, v. 482, p. 148799, 2024.

Song, Z. et al. Effects of wastewater on phosphorus, nitrogen, and nuisance benthic algae in nearshore regions of a large lake. **Science of The Total Environment**, v. 962, p. 178484, 2025.

Wang, Z. et al. Biological performance and membrane fouling of a microalgal-bacterial membrane photobioreactor for wastewater treatment without external aeration and carbonation. **Environmental Research**, v. 247, p. 118272, 2024.

Wang, Z. et al. A novel Fe(II) dosing strategy for a self-sustaining microalgal-bacterial membrane photobioreactor: Performance improvement and fouling mitigation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 225, p. 109932, 2026.

Xia, Z.; Ng, H. Y.; Bae, S. Synergistic microalgal-bacterial interactions enhance nitrogen removal in membrane-aerated biofilm photoreactors treating aquaculture wastewater under salt stress: Insights from metagenomic analysis. **Water Research**, v. 283, p. 123878, 2025.

Ye, T. et al. Spatiotemporal dynamics of algal-microbial interactions in a membrane photobioreactor for integrated nutrient remediation and microalgal resource recovery from shrimp aquaculture wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, v. 221, p. 109793, 2025.

Zhang, M. et al. Effects of solids retention time on the biological performance of a novel microalgal-bacterial membrane photobioreactor for industrial wastewater treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105500, 2021.

Zhang, M. et al. Evaluation of membrane fouling in a microalgal-bacterial membrane photobioreactor: Effects of SRT. **Science of The Total Environment**, v. 839, p. 156414, 2022.

Zhao, L. et al. A vertical-flow constructed wetland–microalgal membrane photobioreactor integrated system for treating high-pollution-load marine aquaculture wastewater: A lab-scale study. **Science of The Total Environment**, v. 919, p. 170465, 2024.

Zou, H. et al. Membrane Photobioreactor Applied for Municipal Wastewater Treatment at a High Solids Retention Time: Effects of Microalgae Decay on Treatment Performance and Biomass Properties. **Membranes**, v. 12, n. 6, p. 564, 2022.

FOTOCATALISADORES DERIVADOS DE RESÍDUOS DE BATERIAS APLICADOS NA DEGRADAÇÃO DE CORANTES E EFLUENTES TÊXTEIS: ESTUDO BIBLIOMÉTRICO PRELIMINAR

1 Maria Luíza Queiroga Lemos Souza Cavalcanti Costa, 2 Luísa Angelo dos Anjos, 3 Naomi Lahana Silvano 4 Fabrício Hemckmeier Borba, 5 Maria Eliza Nagel Hassemer 6 André Aguiar Battistelli

1 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail:eng.mariaqueiroga@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail:luisaangelo22@hotmail.com; 3 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail:naomilahana@gmail.com; 4 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: fabriciohb@outlook.com; 5 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: maria.eliza@ufsc.br; 6 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: andre.battistelli@ufsc.br

Palavras-chave: fotocatálise heterogênea; economia circular; logística reversa.

Resumo

O elevado impacto ambiental dos efluentes da indústria têxtil, aliado à crescente geração de resíduos eletroeletrônicos, estabelece um desafio que impulsiona a busca por alternativas sustentáveis. Nesse contexto, este estudo apresenta uma análise bibliométrica preliminar sobre a utilização de resíduos de pilhas e baterias como precursores para a síntese de fotocatalisadores aplicados na degradação de corantes e efluentes têxteis. A metodologia fundamentou-se no protocolo ProKnow-C e nas diretrizes PRISMA, resultando em um portfólio bibliográfico de 15 artigos científicos selecionados nas bases Scopus e Web of Science. Os resultados demonstram um crescimento exponencial nas publicações a partir de 2019, com uma forte liderança científica da China. A análise das palavras-chave revelou que o azul de metileno é o contaminante modelo mais estudado, enquanto o óxido de zinco e o grafite são os materiais mais recuperados. Identificou-se uma lacuna em estudos que utilizam efluentes têxteis reais em detrimento de soluções sintéticas, evidenciando uma oportunidade para pesquisas futuras que busquem validar a eficiência desses materiais em matrizes hídricas complexas. Conclui-se que o *upcycling* de baterias exauridas alinha-se aos princípios da economia circular e da logística reversa, transformando passivos ambientais em ativos tecnológicos de baixo custo para o tratamento de efluentes sintéticos contendo corantes têxteis.

Introdução

A contínua expansão da indústria têxtil nas últimas décadas, fortemente impulsionada pelo acelerado crescimento populacional e pelo fenômeno do *fast fashion*, elevou drasticamente a demanda global por consumo (Niinimäki, et al. 2020). Como consequência direta desse modelo produtivo, houve um aumento expressivo na geração de efluentes líquidos de alta complexidade, caracterizados por uma elevada carga orgânica e pela presença predominante de corantes sintéticos recalcitrantes (Samsami et al., 2020; Rasmussen et al., 2026).

Devido à sua alta estabilidade termodinâmica e estrutura molecular complexa, esses contaminantes resistem aos métodos convencionais de tratamento, persistindo no meio hídrico onde impedem a penetração da radiação solar, prejudicam a fotossíntese aquática e apresentam elevado potencial de toxicidade à biota, configurando um desafio crítico para a preservação dos ecossistemas (Lellis et al., 2019; Yadav et al. 2023).

Em paralelo, o constante avanço tecnológico elevou a demanda por dispositivos eletrônicos, gerando um volume crescente de resíduos eletroquímicos, como pilhas e baterias exauridas, cujo descarte inadequado estabelece um passivo ambiental severo devido à alta concentração de metais pesados (Chakraborty et al., 2025). Diante dessa problemática, a implementação de estratégias de logística reversa e economia circular torna-se necessária para reintegrar esses passivos ao ciclo produtivo como insumos de alto valor agregado (Saha et al. 2024).

Como uma alternativa tecnológica a esses desafios, os Processos Oxidativos Avançados (POAs), destacam-se pela capacidade de mineralizar moléculas orgânicas complexas (Miklos et al., 2018). Dentre os POA's, a fotocatálise heterogênea baseia-se na ativação de um material semicondutor por irradiação luminosa, promovendo a formação de espécies oxidantes, como radicais hidroxila (·OH) e superóxido ($O_2^{\cdot -}$), capazes de degradar os poluentes (Samsami et al., 2020). Ao integrar essa tecnologia ao *upcycling* de resíduos, estabelece-se uma sinergia entre remediação hídrica e a logística reversa, possibilitando a substituição de insumos químicos de alta pureza por metais recuperados de resíduos sólidos (Ahirwar;Tripathi, 2021). Assim, a utilização de resíduos eletroquímicos na síntese de fotocatalisadores, viabiliza o tratamento avançado de águas residuárias com redução de custos operacionais e ganhos ambientais (Yadav et al., 2023).

Apesar do potencial dessa integração, a conversão de resíduos eletroquímicos em materiais fotoativos ainda possui um caráter emergente (Yadav et al., 2023). Sendo necessário a realização de um mapeamento quantitativo da literatura para diagnosticar a maturidade da área e suas principais tendências. Tal levantamento permite evidenciar possíveis lacunas metodológicas que dificultam a escalabilidade da tecnologia, visto que a literatura preliminar sugere uma concentração de investigações em sistemas laboratoriais simplificados e poluentes sintéticos isolados, bem como à falta de padronização de rotas de síntese impulsionada pela heterogeneidade dos metais recuperados de diferentes sistemas eletroquímicos. (Miklos et al., 2018; Samsami et al., 2020).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo realizar um levantamento bibliométrico acerca da utilização de resíduos de pilhas e baterias como precursores para a síntese de fotocatalisadores aplicados na degradação de corantes e efluentes têxteis. A pesquisa fundamentou-se na aplicação conjunta do protocolo ProKnow-C e das diretrizes PRISMA, com escopo temporal delimitado entre 2015 e 2025. A partir dessa abordagem, buscou-se analisar as principais tendências bibliométricas sobre o tema, permitindo identificar padrões de evolução temporal, espacialidade e clusters temáticos. A consolidação deste panorama, fundamenta a continuidade da pesquisa, que compreenderá uma análise sistemática qualitativa detalhada e a subsequente validação experimental de fotocatalisadores sintetizados a partir de pilhas alcalinas no tratamento de efluentes têxteis.

Material e Métodos

A estratégia metodológica consistiu numa revisão bibliométrica da literatura centrada na aplicação de fotocatalisadores heterogêneos derivados de resíduos de pilhas e baterias para a degradação de corantes, abrangendo o recorte temporal de 2015 a 2025. A busca foi estruturada através da integração entre o método ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*) e as diretrizes do protocolo PRISMA 2020, assegurando a transparência e a reprodutibilidade do inventário. As buscas foram executadas simultaneamente nas bases de dados Web of Science e Scopus, utilizando uma *string* booleana complexa organizada em quatro eixos norteadores: o processo de tratamento, a origem e natureza do catalisador e o alvo específico do tratamento (corantes e efluentes têxteis)

Com os eixos definidos, estabeleceu-se a *string* de busca combinada:

("photocatalysis" OR "heterogeneous photocatalysis" OR "photoreduction" OR "photodegradation" OR "photooxidation") AND ("batter" OR "battery waste" OR "spent batter*" OR "waste batter*" OR "battery residue*" OR "battery-derived" OR "battery recycling") AND ("catalyst" OR "photocatalyst") AND ("dye*" OR "colorant*" OR "pigment*" OR "textile dye*" OR "synthetic dye*" OR "organic dye*" OR "colored compound*" OR "textile wastewater" OR "textile efluent*" OR "dye wastewater" OR "dye efluent*" OR "colored wastewater") AND NOT ("fenton").*

Foram aplicados filtros para contemplar exclusivamente artigos originais de pesquisa em língua inglesa que tivessem sido submetidos ao processo de revisão por pares, sendo excluídos documentos de revisão e capítulos de livros para garantir estudos de natureza estritamente experimental.

O processo de triagem e refinamento partiu de um banco bruto de 175 registos, dos quais 47 foram identificados como duplicados e removidos. A seleção subsequente ocorreu através da análise sucessiva de títulos e resumos, aplicando-se o critério de representatividade acumulada para a composição do portfólio. Este fluxo resultou num Portfólio Bibliográfico Final (PBF) de 15 estudos de elevado impacto, que foram submetidos à leitura integral para confirmação de elegibilidade e extração de dados. A análise quantitativa e o mapeamento de redes de conhecimento foram realizados com o suporte computacional do software VOSviewer e da biblioteca Bibliometrix em ambiente RStudio. Esta abordagem permitiu identificar padrões de evolução temporal, clusters geográficos de produção e as principais tendências temáticas, como a emergência de rotas de *upcycling* direto e a transição para o uso de efluentes reais.

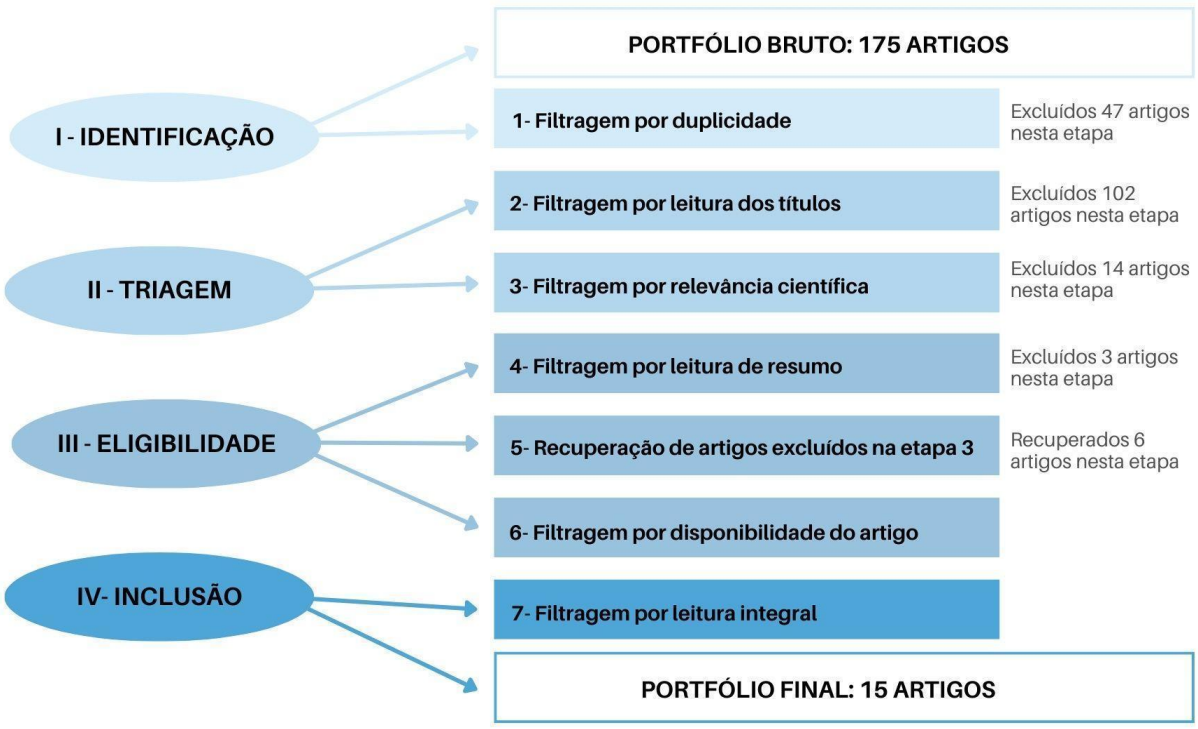


Figura 01: Fluxo de seleção dos artigos segundo o protocolo PRISMA 2020, adaptado à metodologia ProKnow-C. Fonte: autoria própria (2026)

Resultados e Discussão

O portfólio bibliográfico foi formado por 15 artigos obtidos a partir de buscas com as strings definidas e processos de filtragem. A organização dos artigos segue uma ordem decrescente de importância científica, determinada pelo número de citações de cada estudo (Tabela 01).

#	Autores	Título	País	N° de citações
1	A. Negash, S. Mohammed, H.D. Weldekirstos, A.D. Ambaye, M. Gashu (2023)	Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye using eco-friendly synthesized rGO@ZnO nanocomposites	Etiópia	134
2	S.H. Al-Ansari, H. Gomaa, R.D. Abdel-Rahim, A.M. Ali, A.M. Nagiub (2024)	Recycled gold-reduced graphene oxide nanocomposite for efficient adsorption and photocatalytic degradation of crystal violet	Egito	69
3	R. Behura, R. Sakthivel, N. Das (2021)	Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles from waste iron ore tailings and spent lithium ion batteries for photo/sono-catalytic degradation of Congo red	Índia	58
4	X.H. Yue, F.S. Zhang (2022)	Recycling spent LiFePO4 battery for fabricating visible-light photocatalyst with adsorption-photocatalytic synergistic performance and simultaneous recovery of lithium and phosphorus	China	50
5	S. Dhiman, B. Gupta (2021)	Co_3O_4 nanoparticles synthesized from waste Li-ion batteries as photocatalyst for degradation of methyl blue dye	Índia	38
6	M. Assefi, S., Maroufi, Y. Yamauchi, V. Sahajwalla (2019)	Core–Shell Nanocatalysts of Co_3O_4 and NiO Shells from New (Discarded) Resources: Sustainable Recovery of Cobalt and Nickel from Spent Lithium-Ion Batteries, Ni–Cd Batteries, and LCD Panel	Austrália	34
7	L. Xu, L. Liang, C. Chen, Z.H. Chen, Z.B. Lv, M.L. Fu, B. Yuan (2023)	Upcycling spent lithium battery cathodes into efficient PMS catalysts for organic contaminants degradation	China	27
8	H. Huang, W. Feng, Z. Niu, X. Qin, X. Liu, B. Shan, Y. Liu (2022)	Structural, optical and photocatalytic properties of magnetic recoverable Mn0.6Zn0.4Fe2O4@Zn0.9Mn0.1O heterojunction prepared from waste Mn–Zn batteries	China	21
9	S. Rawat, J. Singh (2022)	Synthesis of nZnO from waste batteries by hydrometallurgical method for photocatalytic degradation of organic pollutants under visible light irradiation	China	22
10	N. Bayat, S. Sheibani (2024)	Efficient photocatalytic activity of $ZnMn_2O_4$ nanopowder synthesized by mechano-thermal recycling of alkaline and Zn/C spent batteries	Irã	14
11	L.M. Boasquevisque, A.A.L. Marins, E.J.B. Muri, M.F.F. Lelis, M.A. Machado, M.B.J.G. Freitas (2024)	Synthesis and evaluation of electrochemical and photocatalytic properties of rare Earth, Ni and Co mixed oxides recycled from spent Ni–MH battery anodes	Brasil	12
12	C. Han, F.L. Liu, Q. Tao, Y. Liu, Q.K. Jing, H.R. Stock, G.X. Wang, N. Ma (2025)	Recovery of CdS photocatalyst from spent Ni–Cd batteries using a thiosulfate leaching system and UV photolysis precipitation	China	6
13	N.S. Moalej, A. Saadati, S. Sheibani, M. Mokmeli (2025)	NiO/CdO/Co_3O_4 nanocomposite as an efficient visible-light photocatalyst for photodegradation and water splitting synthesized by recycling spent Ni–Cd batteries	Irã	3
14	W.A. Jabbar, M.F. Abdul Jabbar (2024)	Modification Graphite of Waste Batteries by Phosphotungstic Acid and Using as Photocatalyst for Methylene Blue Degradation	Iraque	1
15	M.A.H. Suvo, C. Raiyath, S.I. Liba, S. Barua, M.A. Bhuiyan (2025)	Waste battery-derived GO/mesoporous TiO_2 nanocomposites for visible-light photocatalytic degradation of crystal violet	Bangladesh	3

Tabela 01: Portfólio bibliográfico acerca da aplicação de fotocatalisadores heterogêneos derivados de resíduos de pilhas e baterias para a degradação de corantes e efluentes têxteis no período de 2015-2025. Fonte: autoria própria (2026)

Os artigos analisados apresentam taxa de crescimento anual de 16,99%, evidenciando o aumento do interesse pelo tema. Verificou-se, ainda, que possuem idade média de 2,13 anos e recebem, em média, 21,6 citações cada. Embora a produção antes de 2020 tenha sido modesta, observa-se um crescimento progressivo a partir de 2021, com um pico de produção em 2024 (Figura 2). Esse padrão sugere uma fase de expansão inicial da área, compatível com o padrão descrito por Price para temas emergentes, mas ainda não alcança um crescimento robusto sustentado ao longo de uma década completa (Price, 1963).

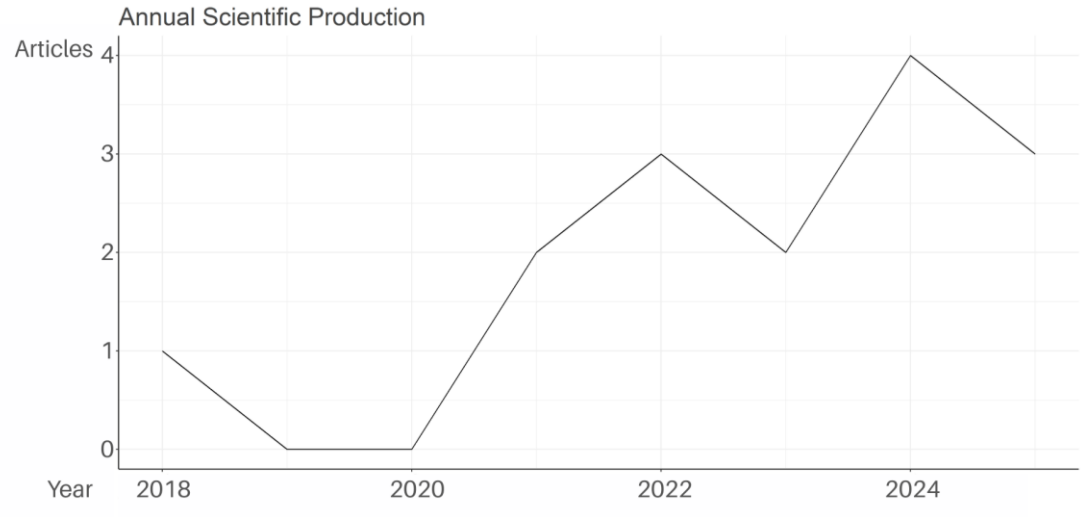


Figura 02: Produção científica anual do tema.
Fonte: autoria própria por meio do Bibliometrix e Canva (2026)

Geograficamente, observa-se uma forte concentração de publicações na Ásia, especialmente na China, que lidera com nove artigos e se destaca visualmente pelo tom mais intenso no mapa (Figura 3). Bangladesh e Índia aparecem em seguida, ambos com quatro publicações, reforçando o protagonismo asiático no desenvolvimento dessa linha de pesquisa. Países como Austrália, Brasil, Egito, Etiópia e Irã contribuem de forma moderada, cada um com duas publicações, enquanto Iraque e África do Sul apresentam participações pontuais.

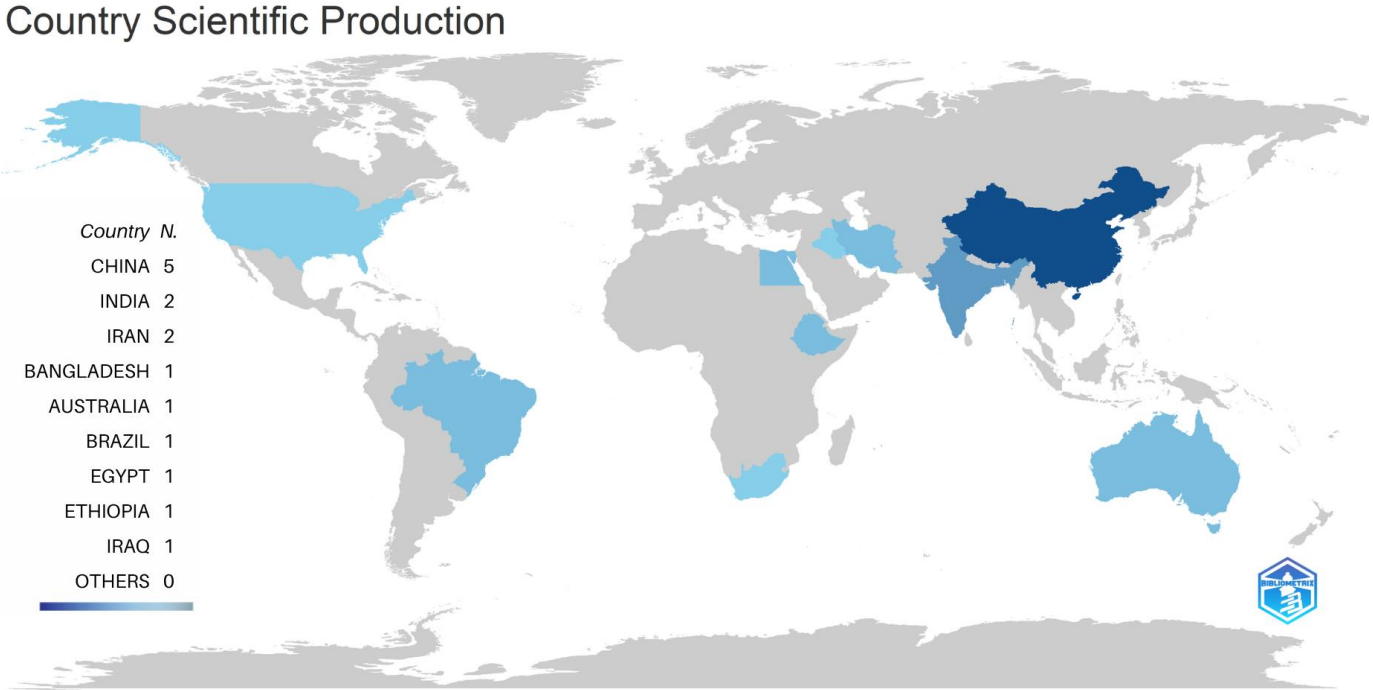


Figura 03: Distribuição espacial das produções científicas.
Fonte: autoria própria por meio do Bibliometrix e Canva (2026)

A predominância asiática pode refletir tanto a disponibilidade de resíduos eletroquímicos quanto o interesse regional em tecnologias de remediação ambiental de baixo custo e alto impacto (Chakraborty et al., 2025; Herat, 2021). Já a presença de países de diferentes continentes indica que o tema possui relevância global, embora a intensidade da produção ainda seja desigual.

Em conjunto, o mapa evidencia que a pesquisa sobre o reaproveitamento de resíduos de baterias para fotocatálise ambiental está em expansão internacional, mas com polos de desenvolvimento claramente concentrados.

Em relação a distribuição de produtividade entre autores mostra um campo de pesquisa ainda relativamente disperso, sem uma concentração marcante de liderança por grupos ou indivíduos específicos. Yue Liu e Shervin Sheibani destacam-se como os autores mais produtivos do portfólio, com dois documentos publicados cada. Eles são seguidos por uma rede de pesquisadores com contribuições singulares.

A análise da nuvem de palavras (Figura 5) evidencia uma forte convergência entre a economia circular e os processos oxidativos avançados. A centralidade de termos como "*photodegradation*" e *"photocatalysis"* confirma que o foco predominante da literatura é a aplicação desses materiais na remediação ambiental, enquanto a proeminência de *"waste batteries", "recycling"* e *"lithium-ion batteries"* destaca a transição de um modelo de descarte para o *upcycling* de passivos ambientais.

Destaca-se também na figura, a importância das técnicas de caracterização na consolidação do conhecimento sobre esses novos materiais. Termos como *"scanning electron microscopy*" (MEV) e *"X-ray diffraction"* (DRX) aparecem com destaque, demonstrando que a investigação da morfologia superficial e da pureza das fases cristalinas é fundamental para explicar o desempenho fotocatalítico. A correlação entre esses termos e conceitos como *"energy gap"* e *"surface area"* reforça que a discussão científica gira em torno de como a origem do resíduo influencia as propriedades eletrônicas do catalisador final.

No que tange aos contaminantes alvo, a forte presença do termo *"methylene blue"* indica que este corante ainda serve como o principal modelo para a validação inicial de novos catalisadores devido à sua estabilidade e facilidade de monitoramento por espectroscopia. A coexistência de termos como *"crystal violet", "congo red"* e *"azo dyes"* sinaliza uma evolução nas pesquisas, que buscam testar a eficiência desses materiais em moléculas mais complexas e persistentes. Contudo, observa-se uma lacuna e, consequentemente, uma oportunidade de pesquisa no tratamento de matrizes complexas de efluentes reais, essencial para validar a aplicabilidade técnica desses fotocatalisadores em cenários operacionais de escala real.

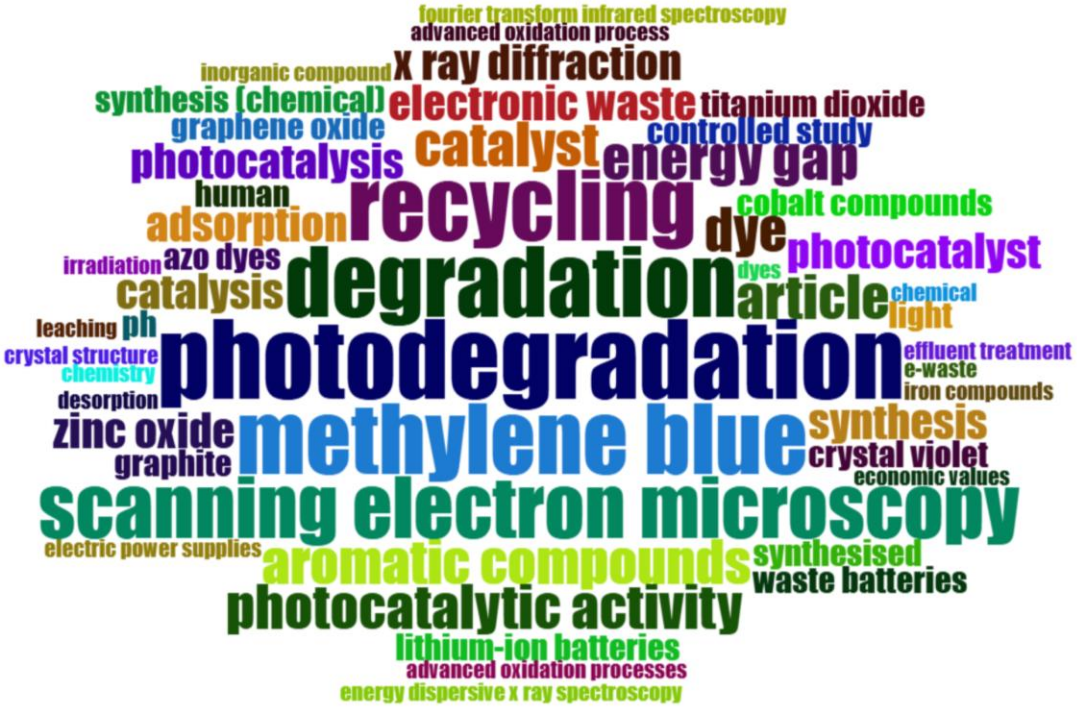


Figura 04: Nuvem de palavras do portfólio.
Fonte: autoria própria por meio do do Blibliometrix (2026)

Complementando essa percepção, a análise de co-ocorrência de palavras-chave (Figura 6) revela a estrutura intelectual do campo através da formação de clusters que sintetizam a dinâmica da pesquisa atual. Observa-se um agrupamento voltado à síntese e caracterização, onde termos como *"zinc oxide", "synthesis"* e *"scanning electron microscopy*" apresentam forte interconexão e um segundo cluster voltado na performance e mecanismos, unindo *"photodegradation", "energy gap"* e *"recycling"*. A disposição central de termos como "photocatalysis" e "degradation" funciona como uma ponte entre esses domínios, evidenciando uma articulação coesa entre os métodos de recuperação química das baterias e sua aplicação final. Entretanto, a posição periférica de termos relacionados a efluentes reais na rede de co-ocorrência reforça a necessidade de avançar para além dos corantes modelo, consolidando o caráter preliminar deste estudo bibliométrico e fundamentando a transição para ensaios experimentais com matrizes hídricas de maior complexidade.

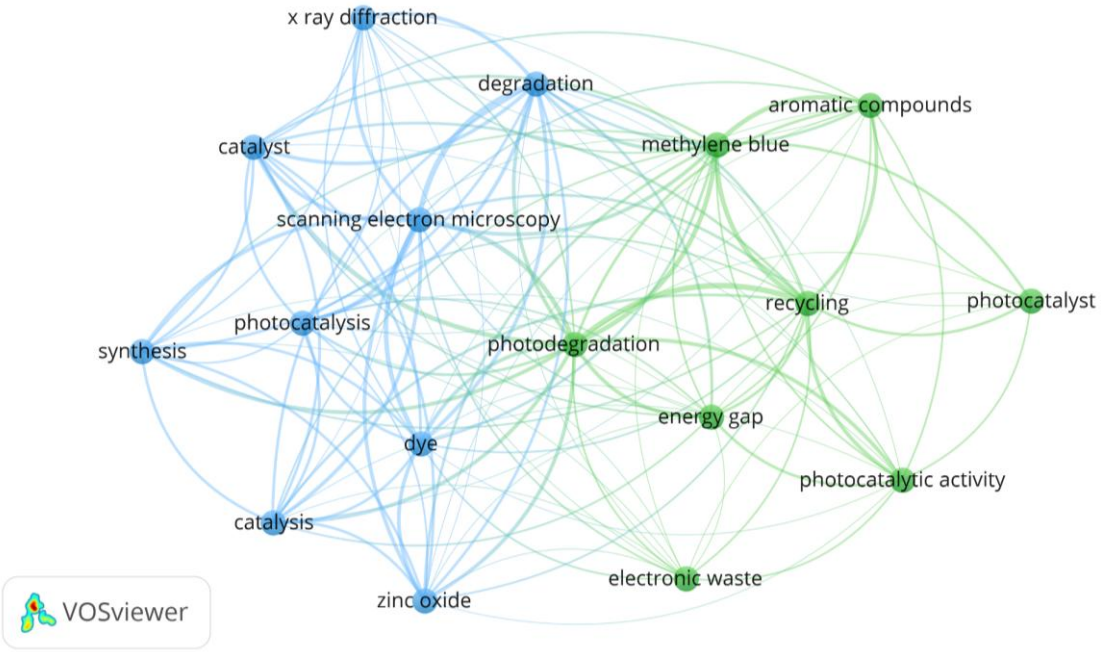


Figura 05: Análise de co-ocorrência do portfólio.
Fonte: autoria própria por meio do Vosviewer (2025)

A literatura recente reforça esse direcionamento. Revisões abrangentes sobre fotocatálise aplicada à degradação de corantes destacam que a tecnologia heterogênea tem se consolidado como uma alternativa eficiente aos métodos convencionais de tratamento de água, especialmente pela formação de radicais altamente oxidativos que promovem a decomposição de moléculas de corantes complexos (Khan et al., 2024; Saeed, 2021; Anwer et al., 2019), coerente com a centralidade de termos como photodegradation e methylene blue. Contudo, uma vertente claramente emergente é aquela que articula a reciclagem de resíduos tecnológicos (pilhas e baterias) como insumo para a síntese de fotocatalisadores. Embora esta vertente ainda não atinja a mesma densidade que os estudos com materiais convencionais, ela possui tendência de crescimento e representa um movimento inovador na literatura, orientado pela busca de soluções que integrem desempenho, baixo custo e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, o estudo de Quirino et al. (2025) demonstra que catalisadores produzidos a partir de resíduos de pilhas do tipo Zn–Mn e Zn–C apresentam comportamento fotocatalítico promissor sob radiação solar, com destaque para a influência do pH na eficiência de degradação do azul de metileno.

Em síntese, a análise do portfólio de 15 artigos evidenciou que, embora a produção científica apresente um crescimento anual de 16,99%, o tema ainda possui um caráter emergente e polos de desenvolvimento nitidamente concentrados na Ásia, especialmente na China. As redes de conhecimento demonstraram que a literatura está consolidada no que tange à caracterização nanotecnológica e à validação da eficiência em sistemas simplificados, utilizando predominantemente o azul de metileno como contaminante modelo. Contudo, a análise revelou uma lacuna crítica: a escassez de estudos voltados ao tratamento de efluentes têxteis brutos em cenários operacionais de maior complexidade.

Considerações Finais

O estudo bibliométrico revelou um campo em expansão para o *upcycling* de pilhas e baterias na fotocatálise, embora ainda restrito a poluentes sintéticos. Conclui-se que a conversão destes resíduos eletroquímicos em fotocatalisadores é uma estratégia de economia circular robusta, transformando passivos ambientais em ativos tecnológicos para a remediação hídrica. Este panorama preliminar fundamenta uma revisão sistemática e qualitativa em fase de elaboração, que será complementada por ensaios experimentais com efluentes têxteis reais, visando transpor os limites identificados e consolidar tecnologias de remediação de baixo custo e alto impacto para o setor de saneamento e tratamento de efluentes industriais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), Edital 14/2025 e ao Laboratório de Reúso de Águas (LaRA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AHIRWAR, R.; TRIPATHI, A. K. E-waste management: a review of recycling process, environmental and occupational health hazards, and potential solutions. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 15, p. 100409, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100409.

AL-ANSARI, S. H.; GOMAA, H.; ABDEL-RAHIM, R. D.; ALI, G. A. M.; NAGUIB, A. M. Recycled gold-reduced graphene oxide

nanocomposite for efficient adsorption and photocatalytic degradation of crystal violet. **Scientific Reports**, v. 14, p. 4379, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-024-54580-1.

ANWER, S.; LI, C.; NIU, F.; KARIM, S.; WANG, D. Photocatalysts for degradation of dyes in industrial effluents: opportunities and challenges. **Nano Research**, v. 12, n. 8, p. 1698–1746, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12274-019-2287-0.

ASSEFI, M.; MAROUFI, S.; YAMAUCHI, Y.; SAHAJWALLA, V. Core–shell nanocatalysts of Co3O4 and NiO shells from discarded resources: sustainable recovery of cobalt and nickel from spent batteries. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, p. 19005–19014, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04618.

BAYAT, N.; SHEIBANI, S. Efficient photocatalytic activity of ZnMn2O4 nanopowder synthesized by mechano-thermal recycling of alkaline and Zn/C spent batteries. **Ceramics International**, v. 50, n. 9, p. 14757–14772, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.01.390.

BEHURA, R.; SAKTHIVEL, R.; DAS, N. Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles from waste iron ore tailings and spent lithium-ion batteries for photo/sono-catalytic degradation of Congo red. **Powder Technology**, v. 386, p. 519–527, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.066.

BOASQUEVISQUE, L. M.; MARINS, A. A. L.; MURI, E. J. B.; LELIS, M. F. F.; MACHADO, M. A.; FREITAS, M. B. J. G. Synthesis and evaluation of electrochemical and photocatalytic properties of rare earth, Ni and Co mixed oxides recycled from spent Ni–MH battery anodes. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 41, e01036, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01036.

CASTILLO-SUÁREZ, L. A.; SIERRA-SÁNCHEZ, A. G.; LINARES-HERNÁNDEZ, I.; MARTÍNEZ-MIRANDA, V.; TEUTLI-SEQUEIRA, E. A. A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13762-023-04810-2.

CHAKRABORTY, P.; REX K, R.; SYED, J. H.; CHANDRA, S.; HANDE, S.; POKHREL, B.; ISLAM, E.; HALIM MIAH, M. A. Electronic waste recycling in South Asia: overview of associated risks from a cocktail of micro-pollutants and recommendations for sustainable e-waste management. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 18, p. 100715, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100715.

DHIMAN, S.; GUPTA, B. Co3O4 nanoparticles synthesized from waste Li-ion batteries as photocatalyst for degradation of methyl blue dye. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, art. 101765, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101765.

HAN, C.; LIU, F.-L.; TAO, Q.; LIU, Y.; JING, Q.-K.; STOCK, H.-R.; WANG, G.-X.; MA, N. Recovery of CdS photocatalyst from spent Ni–Cd batteries using a thiosulfate leaching system and UV photolysis precipitation. **Rare Metals**, v. 44, n. 6, p. 4241–4254, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12598-024-03185-8.

HOSSAIN, K. M. I. Climate resilient wastewater solutions for the textile industry (2020–2025): a systematic review. **Journal of Scientific Reports**, 2025. DOI: https://doi.org/10.58970/jsr.1102.

JABBAR, W. A.; ABDUL JABBAR, M. F. Modification graphite of waste batteries by phosphotungstic acid and use as photocatalyst for methylene blue degradation. **Ecological Engineering & Environmental Technology**, v. 25, n. 8, p. 297–307, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.12912/27197050/190070.

JAMAL, R.; AL ALAM, M. A.; SAYEED, K. A.; AHMED, S. A.; HAQUE, N. Patching sustainability loopholes within the lead-acid battery industry of Bangladesh: an environmental and occupational health risk perspective. **Sustainable Production and Consumption**, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.030.

KISHOR, R.; PURCHASE, D.; SARATALE, G. D.; SARATALE, R. G.; ROMANHOLO FERREIRA, L. F. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012.

KHAN, S.; NOOR, T.; IQBAL, N.; YAQOOB, L. Photocatalytic dye degradation from textile wastewater: a review. **ACS Omega**, v. 9, p. 21751–21767, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00887.

LELLIS, B.; FÁVARO-POLONIO, C.; PAMPHILE, J.; POLÔNIO, J. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 3, n. 2, p. 275–290, 2019. Disponível em:

https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001.

MELCHOR-MARTÍNEZ, E. M.; MACIAS-GARBETT, R.; MALACARA-BECERRA, A.; IQBAL, H. M. N.; SOSA-HERNÁNDEZ, J. E. Environmental impact of emerging contaminants from battery waste: a mini review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100104.

MIKLOS, D. B.; REMY, C.; JEKEL, M.; LINDEN, K. G.; DREWES, J. E.; HÜBNER, U. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – a critical review. **Water Research**, v. 139, p. 118–131, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.042.

MOALEJ, N.; SAADATI, A.; SHEIBANI, S.; MOKMELI, M. NiO/CdO/Co3O4 nanocomposite as an efficient visible-light photocatalyst synthesized by recycling spent Ni–Cd batteries. **Materials Chemistry and Physics**, v. 337, art. 130626, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130626.

NEGASH, A.; MOHAMMED, S.; WELDEKIRSTOS, H. D.; AMBAYE, A. D.; GASHU, M. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye using eco-friendly synthesized rGO@ZnO nanocomposites. **Scientific Reports**, v. 13, art. 22234, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-023-48826-7.

NIINIMÄKI, K.; PETERS, G.; DAHLBO, H.; PERRY, P.; RISSANEN, T.; et al. The environmental price of fast fashion. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 189–200, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9.

QUIRINO, A. G. C.; SILVA, A. R.; COSTA, J. M.; SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, L. F. Characterization and application of spent battery-based catalysts for photocatalytic degradation of textile dyes under solar radiation. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 30, e20250040, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1413-415220250040.

RASMUSSEN, K. H.; SETIAWATI, M. D.; KHAJURIA, A. Synthetic dyes: a barrier to circular economy within the textile industry? **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 78, p. 101604, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cosust.2025.101604.

RAWAT, S.; SINGH, J. Synthesis of nZnO from waste batteries by hydrometallurgical method for photocatalytic degradation of organic pollutants under visible light irradiation. **Journal of Environmental Management**, v. 318, art. 115518, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115518.

SAHA, K.; DEY, P. K.; KUMAR, V. A comprehensive review of circular economy research in the textile and apparel industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 444, p. 141252, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141252

SAMSAMI, S.; MOHAMADIZANIANI, M.; SARRAFZADEH, M.; RENÉ, E.; FIROOZBAHR, M. Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: overview and perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 143, p. 138–163, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034.

SHI, J.; HUANG, W.; ZHU, H.; XIONG, J.; BEI, H.; WEI, X.; WANG, S. Modified TiO2 particles for heterogeneous photocatalysis under solar irradiation. Materials Letters, v. 279, p. 128472, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128472.

SUVO, M. A. H.; RAIYATH, C.; LIBA, S. I.; BARUA, S.; BHUIYAN, M. A. Waste battery-derived GO/mesoporous TiO2 nanocomposites for visible-light photocatalytic degradation of crystal violet. **Solid State Communications**, v. 406, art. 116190, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ssc.2025.116190.

XU, L.; LIANG, L.; CHEN, C.; CHEN, Z.; LV, Z.; FU, M.; YUAN, B. Upcycling spent lithium battery cathodes into efficient PMS catalysts for organic contaminants degradation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, art. 111605, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111605.

YADAV, G.; YADAV, N.; SULTANA, M.; AHMARUZZAMAN, M. A comprehensive review on low-cost waste-derived catalysts for environmental remediation. **Materials Research Bulletin**, v. 164, p. 112261, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112261.

YUE, X.-H.; ZHANG, F.-S. Recycling spent LiFePO4 battery for fabricating visible-light photocatalyst with adsorption–photocatalytic synergistic performance and simultaneous recovery of lithium and phosphorus. **Chemical Engineering Journal**, v. 450, art. 138388, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138388.

TRATAMENTO DE EFLUENTES COSMÉTICOS RECALCITRANTES POR ELETROCOAGULAÇÃO: EFEITOS DA CONDUTIVIDADE NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO

1 Nathalia Oliveira Tavares, 2 Julia Roberta Candido, 3 Natan de Oliveira Ferreira, 4 Amanda Leticia Silva Santos, 5 Alana Francischini Ferreira, 6 Ana Rubia De Carvalho Bonilha Silva, 7 Amanda Finger, 8 Luanna Mênithen Souza e Silva.

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: nathalia.tavares@sou.ufmt.br; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: julia.candido@sou.ufmt.br; 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: natan.ferreira@sou.ufmt.br; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: amanda.santos9@sou.ufmt.br; 5 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: alana.ferreira@sou.ufmt.br; 6 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: ana.silva1@ufmt.br; 7 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: amandafinger.ufmt@gmail.com; 8 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: lmenithen@gmail.com.

Palavras-chave: Tratamento eletroquímico; Remoção de DQO; Efluentes de baixa condutividade.

Resumo

O aumento da geração de efluentes contendo elevada carga orgânica e presença de compostos recalcitrantes têm intensificado a demanda por tecnologias eficientes de tratamento, especialmente em atividades urbanas como salões de beleza. Nesse contexto, este estudo avaliou a eficiência do processo de eletrocoagulação no tratamento de efluente proveniente deste tipo de atividade.

O efluente bruto foi caracterizado quanto aos parâmetros físico-químicos, incluindo demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio ($DBO_{5,20}$), turbidez, cor aparente, pH e condutividade elétrica. Em seguida, os ensaios de tratamento foram conduzidos em reator eletrolítico de bancada, considerando diferentes condições operacionais, com ênfase na variação do tempo de reação e da condutividade elétrica do meio.

Os resultados obtidos evidenciaram elevada eficiência do processo, com remoção de até 94% da DQO, além de reduções significativas nos valores de turbidez e cor aparente. A análise da relação entre DQO e DBO indicou baixa biodegradabilidade do efluente, sugerindo a presença de compostos orgânicos recalcitrantes, o que reforça a relevância do uso de processos físico-químicos no tratamento desse tipo de resíduo.

Adicionalmente, verificou-se que a condutividade elétrica desempenha papel fundamental na eficiência do processo, influenciando diretamente a formação de espécies coagulantes e, consequentemente, a remoção dos contaminantes. Os resultados também indicam a existência de condições ótimas de operação, com desempenho otimizado em torno de 1000 $\mu S\ cm^{-1}$ e tempo de reação de 15 minutos.

Dessa forma, conclui-se que a eletrocoagulação demonstrou elevado potencial como alternativa tecnológica para o tratamento de efluentes com alta carga orgânica e baixa biodegradabilidade, podendo ser aplicada como etapa principal ou complementar em sistemas de tratamento, com contribuições relevantes para a mitigação de impactos ambientais.

Introdução

A intensificação das atividades urbanas tem contribuído significativamente para o aumento da geração de efluentes líquidos contendo elevada carga orgânica e diversidade de compostos químicos, muitos dos quais apresentam baixa biodegradabilidade. Entre essas atividades, destacam-se os salões de beleza, cujos efluentes são compostos por substâncias como corantes, surfactantes, óleos, solventes e outros compostos sintéticos, capazes de provocar impactos ambientais relevantes quando descartados.

A complexidade desses efluentes está associada não apenas à diversidade de contaminantes, mas também à presença de compostos recalcitrantes, que limitam a eficiência de processos biológicos convencionais. Nesse contexto, a demanda por tecnologias alternativas e mais eficientes tem se intensificado, especialmente aquelas capazes de promover a remoção de poluentes por mecanismos físico-químicos.

Dentre as tecnologias emergentes, destaca-se a eletrocoagulação, um processo eletroquímico que se baseia na dissolução de eletrodos metálicos e a consequente formação de espécies coagulantes *in situ*, promovendo a agregação e remoção de partículas coloidais e substâncias dissolvidas (HASHIM et al., 2020). Essa técnica apresenta vantagens relevantes na remoção de contaminantes e menor necessidade de adição de reagentes químicos, quando comparada a métodos convencionais.

Entretanto a eficiência da eletrocoagulação está diretamente relacionada a variáveis operacionais, como tempo de reação, intensidade de corrente e condutividade elétrica do meio, as quais influenciam a formação de hidróxidos metálicos e, consequentemente, a remoção dos poluentes. Apesar dos avanços na aplicação dessa tecnologia, ainda existem lacunas relacionadas à otimização dos parâmetros em efluentes com baixa condutividade elétrica e elevada carga orgânica, como aqueles provenientes de atividades cosméticas.

Considerando a elevada carga orgânica e a baixa biodegradabilidade associadas aos efluentes provenientes de salões de beleza, torna-se relevante investigar a aplicação de tecnologias alternativas capazes de promover seu tratamento eficiente. Nesse sentido, a avaliação de parâmetros como demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio ($DBO_{5,20}$)

permite compreender a natureza da matéria orgânica presente e a eficiência dos processos aplicados, especialmente em sistemas onde predominam compostos de difícil degradação.

Diante deste cenário, este estudo avaliou a eficiência do processo de eletrocoagulação no tratamento de efluente proveniente de salão de beleza, com ênfase na remoção de parâmetros físico-químicos e na redução da carga orgânica.

Materiais e Métodos

O estudo foi conduzido a partir da coleta de efluente gerado em um salão de beleza localizado na região central do município de Cuiabá-MT, caracterizado por atender público de médio a alto padrão, com serviços voltados para o público adulto e infantil. Os dias de funcionamento compreendem de terça-feira a sábado, com horário integral das 08:00h até 20:00h.

A seleção do empreendimento considerou a possibilidade de obtenção de efluente exclusivamente proveniente das atividades de lavagem capilar, sem interferência de efluentes sanitários ou de cozinha.

Antes da amostragem, realizou-se a drenagem e limpeza total da caixa de passagem responsável por encaminhar o efluente dos lavatórios de cabelos à rede coletora municipal. Tal procedimento fora necessário para a remoção das sujidades acumuladas ao longo do tempo, como restos de cabelo, areia e material orgânico. A coleta foi realizada ao longo de três dias consecutivos (terça a quinta-feira), no período das 08:00h às 18:00 h.

O sistema de coleta foi composto por temporizador, bomba elétrica (lavador de para-brisa), mangueiras e recipientes de polietileno com capacidade de 60 L. A amostragem foi realizada de forma intermitente, com ciclos de 15 minutos (1 minuto de bombeamento e 14 minutos de intervalo), coletando-se aproximadamente 3 L de efluente por ciclo. As amostras foram homogeneizadas, acondicionadas e encaminhadas ao laboratório para análise.

De modo a garantir a preservação das características das amostras do efluente, do momento da amostragem até sua análise, foram utilizados os processos de conservação conforme as recomendações da NBR 9898 (ABNT, 1987) e do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (CETESB, 2011).

A caracterização física e química do efluente bruto foi conduzida no Laboratório de Análises Físico-Químicas de Águas e Resíduos (LAFQAR-UFMT). Foram determinados parâmetros como cor (aparente e real), turbidez, condutividade elétrica, sólidos (totais, fixos, voláteis e sedimentáveis), pH, óleos e graxas, alcalinidade total e cloretos. A carga poluidora foi quantificada através da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), permitindo o cálculo da razão de biodegradabilidade do efluente. Os procedimentos adotados seguiram protocolos de espectrofotometria, potenciometria e gravimetria, conforme normas técnicas vigentes. As determinações dos parâmetros encontram-se descritas nas Tabelas 01 e 02, respectivamente, juntamente com as unidades usuais e os limites estabelecidos pela Resolução nº 430/2011.

Parâmetros	Unidades	CONAMA nº 430/2011	Metodologia Analítica / NBR
Cor real	mg Pt-Co L^{-1}	-	Espectrofotometria
Cor aparente	mg Pt-Co L^{-1}	-	Espectrofotometria
Condutividade elétrica	µS cm^{-1}	-	Potenciometria / NBR 14340:1999
Turbidez	UNT	-	Método Nefelométrico
Sólidos totais	mg L^{-1}	≤ 500	Gravimétrico / NBR 10664:1989
Sólidos fixos	mg L^{-1}	-	Gravimétrico / NBR 10664:1989
Sólidos voláteis	mg L^{-1}	-	Gravimétrico / NBR 10664:1989
Sólidos sedimentáveis	mL L^{-1}	1	Cone Imhoff / NBR 10561:1988

Tabela 01: Parâmetros físicos analisados, limites estabelecidos e metodologias analíticas.
Fonte: Autoria Própria (2026)

Parâmetros	Unidades	Metodologia Analítica / NBR
PH	-	Potenciometria/ NBR 7353:2014
DBO5,20	mg O2 L^{-1}	Incubação à 20°C e 5 dias/ NBR 12614:1992
DQO	mg O2 L^{-1}	Refluxo fechado/ NBR 10357:1998
NTK	mg N-NTK L^{-1}	Kjeldahl/NBR 13796:1997
Nitrogênio Amoniacal	mg N-NH3 L^{-1}	Kjeldahl/NBR 13796:1997
Nitrogênio orgânico	mg N L^{-1}	Kjeldahl/NBR 13796:1997
Fósforo total	mg PO4-3 L^{-1}	Espectrofotometria/NBR 12772:1992
Óleos e graxas	-	NBR 13348:2016

Tabela 02: Parâmetros químicos analisados, limites estabelecidos e metodologias analíticas.
Fonte: Autoria Própria (2026)

Após a realização dos ensaios de eletrocoagulação, verificou-se a determinação da eficiência da utilização ou não dos eletrólitos suportes a partir dos resultados físico químicos do efluente tratado, tais como o pH, condutividade elétrica, cor aparente, turbidez e demanda química de oxigênio. Os resultados obtidos nesta etapa da pesquisa foram confrontados com os limites e padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA n. 430/2011.

Os ensaios de eletrocoagulação foram realizados em reator eletrolítico de bancada, operando em regime batelada, composto por béquer de vidro com volume útil de 500 mL. Foram utilizados eletrodos de alumínio de grau comercial, com espessura de 1,5 mm e área superficial efetiva de 98 cm², posicionados com espaçamento de 2,0 cm e altura de lâmina líquida de 8,6 cm, conforme pode ser observado na Figura 01.

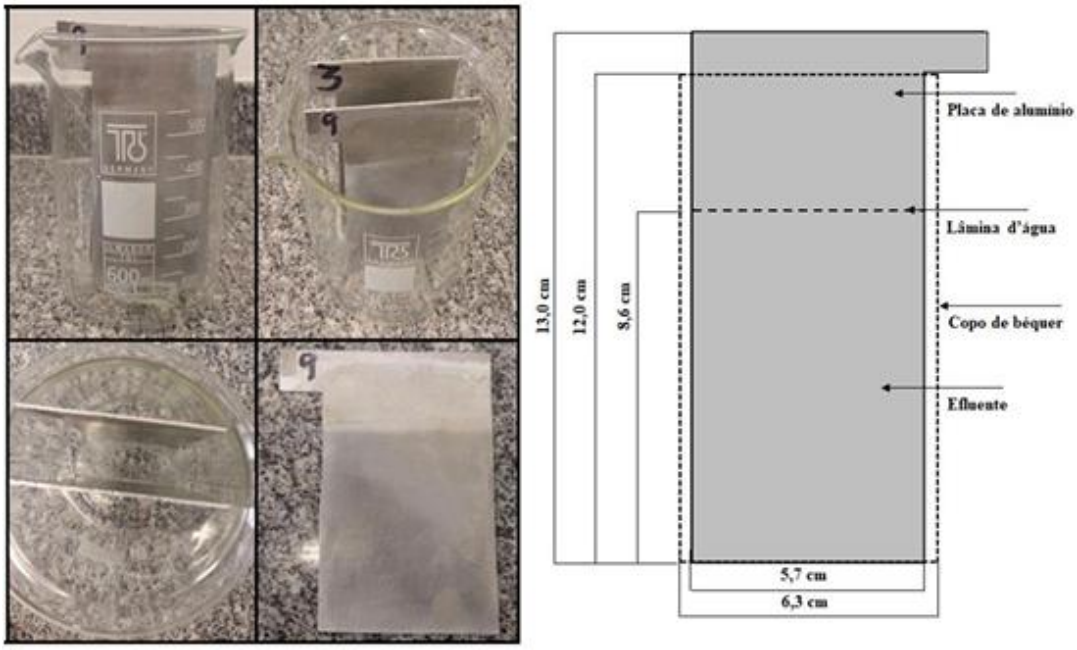


Figura 01: Reator eletrolítico desenvolvido para os ensaios laboratoriais composto por copo de béquer de vidro com capacidade para 500 mL e duas placas de alumínio como eletrodos.
Fonte: Autoria Própria (2026)

O fornecimento de energia ao sistema foi provido por uma fonte de corrente contínua regulável, conectada aos eletrodos em arranjo monopolar. Durante os ensaios, a tensão foi mantida constante em 3 Volts, enquanto a corrente elétrica variou em função da condutividade do meio, devido à baixa condutividade apresentada pelo efluente bruto do salão de beleza. Pode-se observar na Figura 02 esquematicamente a fonte alimentadora ligada ao reator eletroquímico.

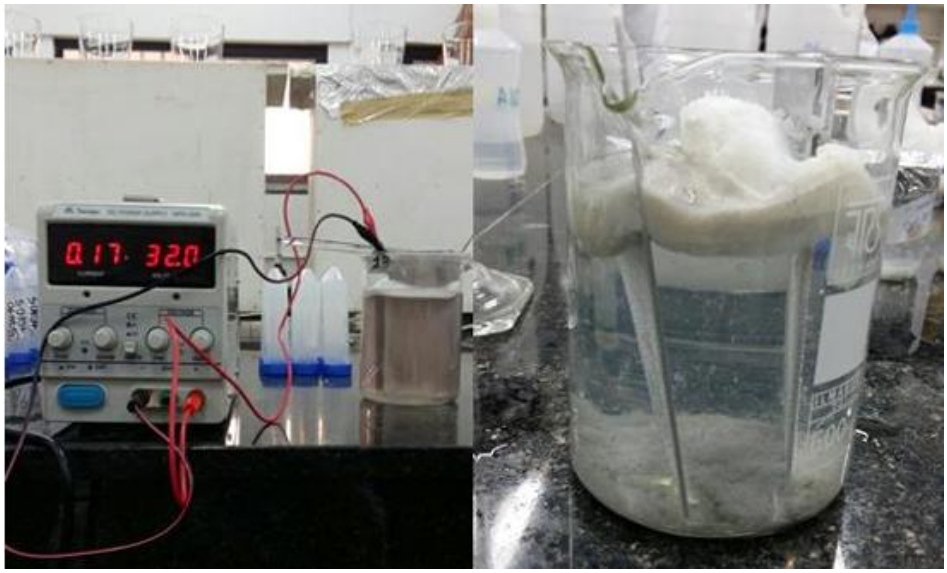


Figura 02: Fonte alimentadora de energia acoplado ao reator eletrolítico composto por um béquer de vidro e placas monopolares de alumínio utilizado para o tratamento do efluente por eletrocoagulação.
Fonte: Autoria Própria (2026)

A reprodutibilidade dos ensaios de eletrocoagulação foi assegurada por um rigoroso protocolo de preparação das superfícies anódicas e catódicas. Os eletrodos de alumínio foram submetidos à escarificação mecânica com abrasivo de granulação 400, visando a remoção de camadas de óxidos e a uniformização da área de contato iônico. Após o lixamento, as placas foram submetidas a um ataque ácido em solução de HNO_3 por 24 horas, seguido de lavagem com água destilada e secagem em estufa (105 °C). Este procedimento, repetido antes e após cada bateria de testes, garantiu a ausência de contaminantes residuais e a integridade das reações eletroquímicas. Após a eletrólise, o efluente permaneceu em decantação por 30 minutos, procedendo-se à coleta do clarificado via pipetagem lateral, com o descarte da escuma sobrenadante para evitar interferências nas análises de DQO, cor e turbidez.

O delineamento experimental considerou variação do tempo de eletrólise (5, 15 e 30 minutos) e da condutividade elétrica, ajustada por adição de eletrólitos suporte, definindo-se quatro condições experimentais: (i) controle, sem adição de eletrólito; (ii) adição de NaCl para condutividade de 500 µS cm^{-1}; (iii) adição de NaCl para 1000 µS cm^{-1}; e (iv) adição de $Ca(OH)_2$ (13,58 mg L^{-1}). A definição dos tempos de ensaio baseou-se em testes preliminares, que indicaram estabilização da eficiência após 30 minutos. A avaliação da eficácia do sistema baseou-se no cálculo das eficiências de remoção e na verificação do enquadramento do efluente tratado aos padrões da Resolução CONAMA nº 430/2011.

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$), com intervalo de confiança de 95%, a fim de identificar diferenças significativas entre os tratamentos e tempos de exposição, bem como a interação entre os fatores analisados.

Resultados e discussões

A caracterização do efluente bruto revelou características típicas de efluentes provenientes de atividades cosméticas, com elevada carga orgânica e composição química complexa. Os valores médios de cor aparente (196,6 mg Pt-Co L^{-1}) e turbidez (95,4 NTU) indicaram elevada concentração de partículas suspensas e compostos cromóforos no efluente.

A condutividade elétrica média foi de 247,2 µS cm^{-1}, valor considerado baixo para a condução eficiente de corrente elétrica em processos eletroquímicos, o que justifica a necessidade de adição de eletrólitos suporte para otimização do tratamento por eletrocoagulação. Tal parâmetro exerce influência direta na eficiência do processo, uma vez que está relacionado à transferência de corrente no meio reacional.

No que se refere à carga orgânica, a demanda química de oxigênio (DQO) apresentou valor médio de 1.476,00 mg O_2 L^{-1}, evidenciando elevada concentração de matéria orgânica no efluente. A demanda bioquímica de oxigênio ($DBO_{5,20}$), por sua vez, apresentou valor médio de 335,2 mg O_2 L^{-1}. A relação DQO/DBO (~6,2) indicou baixa biodegradabilidade, evidenciando a predominância de compostos orgânicos recalcitrantes, típicos de efluentes cosméticos (BOWERS, 2000).

Além disso, parâmetros como sólidos totais, alcalinidade e concentração de íons, como cloretos, contribuem para a complexidade da matriz do efluente, podendo influenciar os mecanismos envolvidos no tratamento. A diversidade de compostos está diretamente relacionada às diferentes etapas dos procedimentos realizados em salões de beleza.

Esses resultados confirmam o elevado potencial poluidor do efluente e a limitação de processos biológicos convencionais, reforçando a necessidade de tecnologias físico-químicas mais eficientes. Ademais, os valores observados indicam a não conformidade com padrões usualmente estabelecidos para lançamento de efluentes em corpos receptores, conforme diretrizes da Resolução CONAMA nº 430/2011. Nesse contexto, a eletrocoagulação apresenta-se como alternativa promissora para o tratamento do efluente, dada sua capacidade de remoção simultânea de matéria orgânica, cor e partículas suspensas.

A caracterização físico-química do efluente após o tratamento por eletrocoagulação permitiu avaliar a eficiência do processo na remoção de parâmetros relevantes, como cor aparente, turbidez, pH, condutividade elétrica e demanda química de oxigênio (DQO). Os ensaios foram conduzidos sob diferentes condições operacionais, incluindo variação do tipo de eletrólito suporte e do tempo de reação (5, 15 e 30 minutos), possibilitando a análise comparativa do desempenho do sistema.

A análise dos resultados evidenciou redução significativa da cor aparente e da turbidez do efluente após o tratamento. A remoção dos parâmetros está associada à desestabilização de partículas coloidais e à adsorção de compostos cromóforos pelos hidróxidos metálicos formados durante o processo eletroquímico.

Os dados apresentados na Figura 03 correspondentes aos resultados experimentais, demonstram que a eficiência de remoção aumenta com o tempo de tratamento, sendo mais expressiva na condição de 15 minutos. Para essa condição, observou-se remoção de aproximadamente 90% da cor aparente e 83% da turbidez quando utilizado cloreto de sódio como eletrólito suporte em condutividade de 1000 µS cm^{-1}.

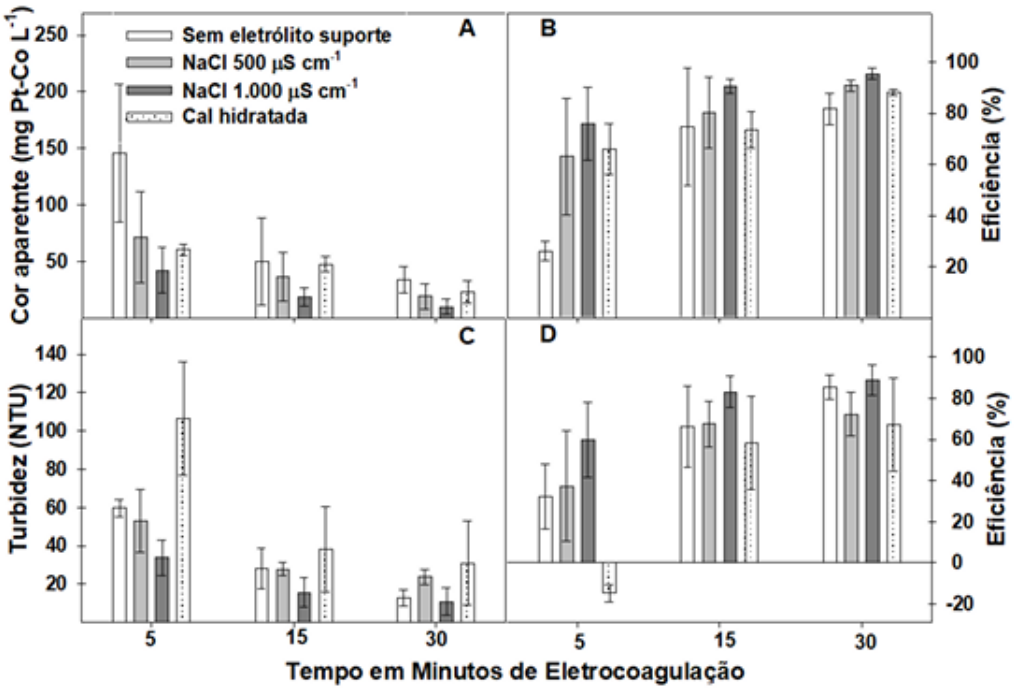


Figura 03: Resultados das eletrocoagulações- A, cor aparente (mg Pt-Co L^{-1}) - B, eficiência de remoção de cor aparente (%) - C, turbidez (NTU)- D, eficiência de remoção de turbidez (%). Para os tratamentos sem eletrólito suporte, com eletrólito suporte de NaCl suficiente para 500 µS cm^{-1}, com NaCl suficiente para 1.000 µS cm^{-1}, e com solução de cal hidratada nos tempos de eletrólise de 5, de 15 e de 30 minutos.
Fonte: Autoria Própria (2026)

A redução da turbidez indica a remoção eficiente de partículas suspensas, enquanto a diminuição da cor reflete a remoção de compostos orgânicos responsáveis pela coloração do efluente. Os resultados (Figura 03) indicam aumento da eficiência de remoção com o tempo de eletrólise até 15 minutos, sugerindo a aproximação do equilíbrio do processo. Esse desempenho é comparável aos valores reportados na literatura, nos quais as remoções de DQO variam entre 70% e 95% em processos de eletrocoagulação (KOBYA et al., 2003; EMAMJOMEH; SIVAKUMAR, 2009; CHEN, 2004).

Os valores de pH do efluente pós-tratado apresentaram variações moderadas ao longo dos ensaios, não apresentando variações significativas que interferissem na eficiência do processo. Tal comportamento está relacionado às reações eletroquímicas que ocorrem nos eletrodos, envolvendo a formação de hidróxidos metálicos e a liberação de espécies iônicas no meio.

A condutividade elétrica exerceu influência direta na eficiência do processo, uma vez que valores mais elevados favoreceram a transferência de carga e a formação de espécies coagulantes. O melhor desempenho foi observado em torno de 1000 µS cm^{-1}, indicando a existência de uma condição ótima para maximização da eficiência do sistema.

Condutividade	5 minutos	15 minutos	30 minutos
Sem eletrólito suporte	300,0 ± 32,1	264,3 ± 14,4	236,3 ± 11,6
500 µS cm^{-1}	508,7 ± 32,6	489,5 ± 53,8	455,2 ± 78,6
1.000 µS cm^{-1}	1.006,0 ± 15,4	996,5 ± 35,6	945,0 ± 54,0
Cal hidratada	1.218,7 ± 26,4	676,2 ± 249,5	511,3 ± 102,9

Tabela 03: Valores de condutividade do efluente pós-tratado por eletrocoagulação em diferentes tempos de tratamento.
Fonte: Autoria Própria (2026)

Os resultados indicam que valores intermediários de condutividade proporcionam melhor desempenho do sistema, uma vez que possibilitam maior eficiência nas reações eletroquímicas sem comprometer a estabilidade do processo.

A análise dos parâmetros relacionados à carga orgânica do efluente evidenciou a elevada eficiência do processo de eletrocoagulação na remoção de contaminantes. Após o tratamento por eletrocoagulação, observou-se redução significativa da DQO, com remoção de até 94% sob condições ótimas de operação (15 minutos e 1000 µS cm^{-1}). De acordo com a Figura 04, o resultado demonstra a elevada eficiência do processo na remoção de compostos orgânicos, incluindo aqueles de difícil degradação.

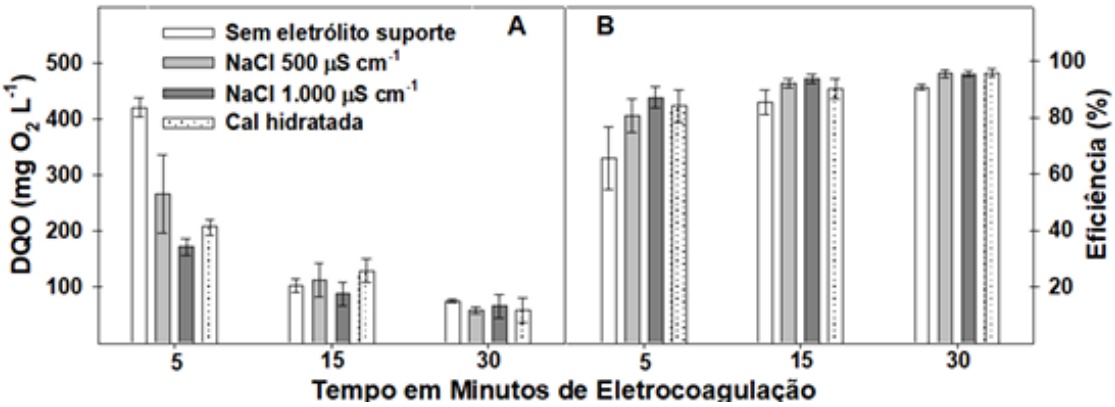


Figura 04: Resultados das eletrocoagulações- A, DQO em mg O2 L^{-1}- B, eficiência de remoção dos tratamentos (%). Para os tratamentos sem eletrólito suporte, com eletrólito suporte de NaCl suficiente para condutividade de 500 µS cm^{-1}, com NaCl suficiente 1.000 µS cm^{-1} e com solução de cal hidratada nos tempos de eletrólise de 5, de 15 e de 30 minutos.
Fonte: Autoria Própria (2026)

O valor médio de DQO do efluente bruto de salão de beleza foi de 1.476,00 mg O2 L^{-1}, verificando que o menor valor de eficiência foi de 66% para eletrocoagulação sem eletrólito suporte com o tempo de 5 minutos de tratamento, sendo que todos os tratamentos apresentaram eficiências superiores a 90% para o tempo de exposição de 30 minutos. Em relação à demanda bioquímica de oxigênio ($DBO_{5,20}$), o efluente bruto apresentou valor médio de aproximadamente 335,2 mg O_2 L^{-1}. A relação entre DQO e DBO, com valores de até 6,2, indica baixa biodegradabilidade do efluente, evidenciando a predominância de compostos orgânicos recalcitrantes.

Considerando a elevada eficiência observada na remoção da DQO pelo processo de eletrocoagulação, infere-se que houve redução da carga orgânica total do efluente, incluindo a fração biodegradável. No entanto, devido à natureza predominantemente físico-química do processo. A menor remoção relativa da DBO está associada ao caráter predominantemente físico-químico do processo, que atua preferencialmente sobre compostos não biodegradáveis.

O comportamento está associado ao mecanismo de atuação da eletrocoagulação, que promove principalmente a remoção de compostos orgânicos não biodegradáveis, por meio da formação de hidróxidos metálicos responsáveis pela coagulação e separação dos contaminantes. Dessa forma, parte da matéria orgânica biodegradável pode permanecer no efluente tratado.

Assim, os resultados indicam que a eletrocoagulação apresenta elevada eficiência na redução da carga orgânica global, configurando-se como alternativa promissora para o tratamento desse tipo de efluente, podendo ser associada a etapas complementares para otimização da remoção da fração biodegradável.

Adicionalmente, observou-se que o aumento do tempo de reação contribui para a maior remoção da DQO até determinado limite, sendo que tempos superiores a 15 minutos não resultaram em ganhos expressivos, indicando a ocorrência de um ponto de saturação do processo.

Os dados experimentais obtidos foram submetidos à análise estatística por meio de análise de variância (ANOVA), com o objetivo de avaliar a influência das variáveis operacionais, como tempo de reação e condutividade elétrica, sobre a eficiência do processo de eletrocoagulação. Adotou-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$), permitindo a identificação de diferenças estatisticamente significativas entre as condições experimentais avaliadas.

A aplicação da análise estatística possibilitou verificar que determinadas condições operacionais apresentaram desempenho superior em relação às demais, especialmente no que se refere à remoção de demanda química de oxigênio, turbidez e cor aparente. Os resultados reforçam a importância da otimização dos parâmetros operacionais, uma vez que pequenas variações podem influenciar significativamente a eficiência do processo.

Além disso, a análise estatística contribuiu para a validação dos resultados experimentais, conferindo maior confiabilidade aos dados obtidos e permitindo uma interpretação mais robusta dos fenômenos envolvidos. Portanto, os resultados apresentados não apenas evidenciam tendências observadas experimentalmente, mas também demonstram consistência estatística, fortalecendo as conclusões do estudo.

Considerações finais

Os resultados deste estudo confirmam o alto potencial da eletrocoagulação como solução tecnológica para efluentes de salões de beleza, tipicamente complexos e de baixa biodegradabilidade. A eficácia da técnica foi ratificada pela remoção expressiva de poluentes, atingindo o patamar de 94% de redução da DQO, além de quedas drásticas na turbidez e na cor aparente, o que demonstra a capacidade do processo em tratar simultaneamente diversas classes de contaminantes.

A análise das variáveis operacionais revelou que o desempenho não é linear, sendo estritamente dependente da sinergia entre o tempo de reação e a condutividade elétrica. O equilíbrio identificado em condições intermediárias — especificamente em torno de 1000 µS cm^{-1} durante 15 minutos — destaca a importância da otimização paramétrica. Esse ajuste é crucial não apenas para a qualidade do efluente final, mas também para a viabilidade econômica do sistema através da racionalização do consumo energético.

A robustez estatística aplicada aos dados validou as discrepâncias entre os cenários experimentais, garantindo que as eficiências observadas sejam cientificamente consistentes. Diante da versatilidade demonstrada, a eletrocoagulação posiciona-se como uma alternativa estratégica para empreendimentos de pequeno porte ou locais com infraestrutura limitada para sistemas biológicos convencionais. Como perspectivas, sugere-se a transição para escalas piloto e a investigação de sistemas híbridos, combinando a eletrocoagulação com tratamentos biológicos para maximizar o polimento do efluente.

Agradecimentos

Os autores expressam sua profunda gratidão à Universidade Federal de Mato Grosso e a todos os técnicos dos laboratórios envolvidos, cujo suporte e infraestrutura foram os pilares que tornaram esta pesquisa possível. Por fim, agradecemos aos amigos que estiveram ao nosso lado: o apoio de vocês transformou as horas de laboratório em momentos de leveza e tornou esta jornada acadêmica muito mais feliz.

Referências Bibliográficas

APHA – **AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9898: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

BOWERS, A. R**. Water and wastewater treatment: a guide for the nonengineering professional.** Boca Raton: CRC Press, 2000.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 maio 2011.

CHEN, G**. Electrochemical technologies in wastewater treatment.** ***Separation and Purification Technology***, v. 38, n. 1, p. 11–41, 2004.

EMAMJOMEH, M. M.; SIVAKUMAR, M. **Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes.** *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 5, p. 1663–1679, 2009.

HASHIM, K. S. et al. **Electrocoagulation as a sustainable technology for wastewater treatment: a review.** *Science of the Total Environment*, v. 746, p. 140–167, 2020.

HOLT, P. K.; BARTON, G. W.; MITCHELL, C. A. **The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology.** *Chemosphere*, v. 59, n. 3, p. 355–367, 2005.

KOBYA, M. et al. **Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes.** ***Journal of Hazardous Materials***, v. 100, n. 1–3, p. 163–178, 2003.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D. L.; Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 114, p. 199-210, 2004.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE OLEOSO EM INDÚSTRIA METALÚRGICA

1 Thais Cristina Patyk, 2 Maria Eduarda Galiciolli, 3 João Marcos Medeiros
1 UNIENSINO, e-mail: thaispatyk2@gmail.com; 2 UNIENSINO, e-mail: mariagaliciolli@gmail.com; 3 UTFPR-CT, e-mail: joaomarcos@alunos.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Processos Industriais; Metalurgia; Óleo; Tratamento de Efluente.

Resumo

Atualmente a água ainda é muito utilizada nos processos industriais, e após o uso, gera efluente líquido. Todo efluente deve ser tratado antes de ser descartado em corpo hídrico, visando evitar contaminação da água e solo. Quando o efluente líquido é oleoso, precisa de um tratamento específico para atender os parâmetros necessários para esse descarte sem gerar impacto ambiental. O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do processo de tratamento de efluente oleoso através do processo de ultrafiltração por membranas cerâmica, em de uma indústria metalúrgica situada em Araucária-PR. Foram estudados bases de dados, documentos internos da empresa, e realizadas visitas técnicas na estação de tratamento para obtenção desta análise. Durante a pesquisa, foram coletadas amostras representativas do efluente antes e após o tratamento, e os dados obtidos revelaram uma redução significativa nos níveis de óleos e graxas, bem como de outras impurezas presentes no efluente. O objetivo desse estudo de caso foi alcançado, sendo comprovado que o tratamento através de membranas cerâmicas para efluente oleoso é eficaz.

Introdução

O uso de recursos naturais como a água em processos industriais ainda é abundante. Esse uso é oriundo do processo para fabricação de produtos e/ou funcionamento dos equipamentos. Uma boa gestão de uso dos recursos faz a diferença no combate ao desperdício da água, sendo que, 70% da retirada de água no Brasil é para uso setoriais (aproximadamente 65 trilhões de litros ao ano), e dentro desta porcentagem, o uso industrial representa 9,7%.

Conforme a base metadados referente a Água na Indústria – Uso e Coeficientes Técnicos, disponível no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SINIRH, publicado em 2017, a indústria de transformação representa o terceiro maior uso consecutivo de água no território nacional. No mesmo boletim de dados em seu apêndice A, que diz respeito aos coeficientes técnicos para a indústria de transformação, estima-se que o consumo de água por indústrias do ramo siderúrgico (eixo que enquadra a metalurgia), representa 25,9% do consumo de água na indústria de transformação (SINIRH, 2017).

Conforme dados da Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (REGET, 2016), o despejo em corpos hídricos, desses efluentes, tanto industriais quanto domésticos, têm ligação especial com a definição de sustentabilidade. Produzido e tratado corretamente para não degradar a biota da região, e não interferir na saúde da comunidade.

A Resolução CONAMA nº 430/2011 traz diretrizes para a gestão do tratamento e lançamento de efluentes em corpos hídricos. Para possível despejo em corpo hídrico, é necessário levar em consideração: capacidade de suporte do corpo receptor, concentração de efluente no corpo receptor, fator de toxicidade, nível trófico, parâmetro de qualidade do efluente, zona de mistura, entre outras diretrizes. A Resolução cita ainda a necessidade ao órgão ambiental definir no licenciamento da atividade ou empreendimento, a carga poluidora máxima para o lançamento desse efluente no corpo hídrico receptor. Contudo, são definidos os parâmetros e testes de amostragens para acompanhamento do atendimento desse licenciamento/outorga.

Como em qualquer processo industrial, a siderurgia produz 700kg de resíduos por hora de aço produzido, e, em termos de vazão, os descartes de efluentes líquidos de uma indústria siderúrgica nos emissários brasileiros, chegam a vazões superiores a 25 m³ a cada tonelada de aço produzida (OLIVEIRA E SILVA, 2022). Além da geração de resíduos, o ramo industrial metalúrgico gera efluentes com altas concentrações de compostos corrosivos e tóxicos, que podem causar sérios danos a vida aquática. Fluidos de corte e óleos hidráulicos provenientes das indústrias metalmecânica são fontes de contaminação presentes no efluente oleoso. O óleo residual dos processos industriais relacionados a petroquímicas e metalurgia comprometem a qualidade da água de diferentes maneiras (ALZAHRANI & MOHAMMAD, 2014). Entre os contaminantes estão boro, cromo, ferro e zinco, e compostos como ácido sulfúrico, hidróxido de potássio, biocidas, entre outros. (MONTEIRO, 2006).

Dentro da metalurgia ocorre o processo de laminação a frio, que é uma das etapas responsáveis pela geração de óleos provenientes da lubrificação dos cilindros dos laminadores, estes que contaminam a água industrial utilizada no resfriamento do maquinário, fazendo necessário o tratamento de efluente oleoso. (OLIVEIRA; SILVA, 2022).

Todo efluente gerado em um processo produtivo deve ser destinado, ou tratado. Se tratando de efluente oleoso, os tipos de processos de tratamentos dependem principalmente da sua composição e estados das emulsões, bem como dos parâmetros a serem atingidos com o tratamento. Os processos de quebra de emulsões podem dividir-se em físicos e químicos, além da combinação dos dois processos. Os estágios desse processo são: quebra de emulsão, separação do óleo e tratamento da fase aquosa. (MONTEIRO, 2006).

Além de realizar o tratamento correto para o efluente, no Estado do Paraná as indústrias precisam realizar a Declaração de Carga Poluidora (DCP), através do portal do Instituto Água e Terra (IAT). A DCP é uma ferramenta que consiste no automonitoramento dos efluentes líquidos gerados por diversas atividades poluidoras. Essa obrigatoriedade ocorre em toda indústria que o efluente gerado no processo é lançado em um corpo hídrico, seja este utilizado para abastecimento público ou não, e o reporte é anual. (INSTITUTO ÁGUA E TERRA, 2023).

A indústria de estudo está situada em Araucária-PR, é do ramo metalúrgico e tem como principal atividade o beneficiamento de bobinas de aço. Geradora de resíduos como plástico, papel, madeira, óxido de ferro, sólidos contaminados, e efluentes líquidos. Foi escolhida para o desenvolvimento do estudo por ser uma empresa sólida e bem-conceituada, e possuir a geração de efluente oleoso, sendo este tratado pelo método de ultrafiltração por membranas cerâmicas.

As indústrias devem racionalizar o uso de água em seus processos, e buscar alternativas de processos de tratamentos evitando o impacto ambiental. A Constituição Federal de 1988, e a instituição da Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) foram marcos importantes na fundamentação conceitual de que a água é também um recurso econômico e que deve possuir gestão integrada (MONTEIRO, 2006).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) também estabelece legislação ambiental para regulamentar tipos de tratamento para os resíduos antes destes serem alocados no solo ou água, com o intuito de minimizar danos maiores à natureza. A Resolução CONAMA 430, refere que cada tipo de resíduo possui um padrão máximo de poluente permitido, e a instituição/indústria que não cumprir está sujeito a penalidades, sendo multas ou até mesmo prisão (CONAMA, 2011).

O tratamento eficiente do efluente, seja industrial ou doméstico, é de extrema importância para a preservação do meio ambiente, melhoramento das condições de vida dos seres vivos e a manutenção dos recursos não renováveis. (NASCIMENTO, 2019).

Existem diversas formas de tratar o efluente industrial, de acordo com o efluente gerado e quais os parâmetros a serem controlados, estabelecidos pelo órgão ambiental. Podemos citar os processos físicos, que são capazes de remover a matéria orgânica e inorgânica em suspensão coloidal e reduzir/eliminar a presença de microrganismos; processos de peneiramento onde as malhas retém sólidos com diâmetros superiores a 1mm; processos de separação da água x óleo, podendo ocorrer por diferença de densidade ou filtração; além de processos de sedimentação, flotação, lodo ativado, processos químicos, entre outros. (GIORDANO, 2015).

Os sistemas de tratamento de efluentes basicamente consistem na transformação dos poluentes (sejam esses dissolvidos, suspensos ou sedimentáveis) e em sequência a separação das fases sólidas e líquidas. A Lei de Lavoisier que refere a conservação da matéria, aplica-se perfeitamente sobre o processo de tratamento, observando que ao remover as substâncias ou materiais do efluente bruto, transforma o tratado em materiais ambientalmente estáveis (GIORDANO, 2015).

É necessário um tratamento prévio dos efluentes antes do descarte em corpos hídricos, pois estes geram diversos tipos de alterações ambientais, tais como: aumento da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e da Demanda Química de Oxigênio (DQO) na água; o que ocasiona a formação de uma película de lipídios que impedem que a penetração da luz solar, alterando a quantidade de oxigênio dissolvido no meio hídrico, consequentemente aumenta a temperatura da água e concentração de sólidos solúveis, além da possibilidade da proliferação de doenças e dificultar o tratamento de águas.

Os fatores determinantes para o melhor tipo de tratamento do efluente são: origem do resíduo, área para implantação do sistema de tratamento, qualidade final do efluente tratado, legislação ambiental (outorgas, licenças) e viabilidade técnica econômica. (MENDES et al., 2005). Nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), o efluente passa por alguns processos até eliminar ou diminuir a matéria poluente presente nessa água residuária do processo industrial, o processo de tratamento de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) convencional (NASCIMENTO, 2019), comporta quatro etapas conforme quadro 1:

Etapas	Processo de cada etapa
Tratamento Preliminar ou Pré-Tratamento	O efluente passa por gradeamento, desengorduramento e desarenação; gerando a remoção grosseira dos sólidos, areias, pedras, plásticos e fibras.
Tratamento Físico-Químico	Adição de produtos químicos para equalização e neutralização da parte orgânica presente no efluente, em seguida passa por processo de floculação onde as partículas se agrupam para remoção das matérias suspensas. Em seguida, o efluente passa por decantação primária, separando o lodo da água.
Tratamento Biológico	Nessa etapa do tratamento, o efluente pode sair da ETE com 95% de eficiência do tratamento. Pode ser realizado de duas maneiras, dependendo do tipo de efluente: Em processos anaeróbicos a ação de micro-organismos realiza a degradação das partículas em suspensão, onde se alimentam da matéria orgânica e convertem em gás carbônico e água; esse processo ocorre em lagoas anaeróbicas ou tanques sépticos. Para processos aeróbicos, são utilizados micro-organismos que necessitam de oxigênio para sua sobrevivência, e ocorre em lagoas aeróbicas ou filtros biológico
Decantação	O efluente passa pelos tanques decantadores com o objetivo de clarificar, mantendo o resquício de sólidos no fundo do tanque, formando um lodo mais concentrado. Dependendo do processo industrial, o efluente gerado pode ser oleoso, e esse óleo pode apresentar-se de forma dispersa ou dissolvia.

Quadro 1: Processos de tratamento de ETE.
Fonte: Adaptado Nascimento (2019).

A preocupação sobre tratar corretamente o efluente oleoso se deve ao elevado potencial de contaminação devido a facilidade de dispersar esses resíduos oleosos na água, podendo levar ao aumento de toxicidade e turbidez, redução das trocas gasosas, e diminuindo assim, o potencial de autodepuração desses corpos hídricos. (MARCELINO et al., 2013).

Conforme Strathmann (1981), o processo de tratamento através das membranas, funciona como uma espécie de interface possibilitando a permeabilidade da água para o próximo processo, e impedindo a passagem do soluto (óleo). Giordano (2015) refere que a filtração é o processo de passagem do efluente através de um meio poroso (filtro) ou membranas cerâmicas, onde ocorre a retenção de sólidos e do óleo presente nesse efluente.

As membranas cerâmicas podem ser utilizadas em processos de filtração, microfiltração, ultrafiltração, nano filtração e diálise (SOUZA, 2014). Conforme Nascimento (2019), o baixo consumo de energia, fácil operação e alta eficiência para a separação de misturas água/óleo, trazem destaque ao uso de membranas cerâmicas para o tratamento de efluentes oleosos.

O tratamento de efluente industrial oleoso através das membranas cerâmicas tem como objetivo substituir os métodos convencionais de tratamento, por um método que indica melhor desempenho, retendo entre 85% e 98% de óleos e graxa, TSS (sólido suspenso total) e turbidez (ABADI, 2011).

O óleo residual na água pode ser encontrado em quatro diferentes formas: emulsificado, dissolvido, livre e disperso. O que diferencia é o tamanho do diâmetro das gotículas: em sua forma livre, diâmetro superior a 150 µm; dispersa quando o diâmetro dessas gotículas está entre 50 e 150 µm, e para valores abaixo de 50 µm, considera-se forma emulsificada (PINTOR et al., 2016).

O formato das membranas cerâmicas pode ser de módulos tubulares, de fibra oca, módulo quadro/placa. A escolha do melhor formato vai depender do processo industrial, uniformidade dos poros da membrana, área da membrana x volume do módulo, espessura e diâmetro mínimo dos poros, facilidade de limpeza desse módulo, controle de fluxo e custos, além da hidrodinâmica necessária no processo (SOUZA, 2014).

Souza (2014) refere ainda, que, a configuração do escoamento desse sistema de tratamento por membranas cerâmicas é um item de grande importância para o bom funcionamento. Esse escoamento pode ocorrer na sistemática de fluxo cruzado (Cross Flow) que também é conhecido por escoamento tangencial, e o chamado escoamento perpendicular (dead-end). Entre as duas modalidades de escoamento, o Cross Flow apresenta menor proporção de acúmulo de soluto devido ao arraste das partículas, sendo a operação de escoamento mais utilizada em estações de tratamentos industriais (SOUZA, 2014).

Sendo assim, o intuito deste estudo é avaliar a eficiência desse processo do tratamento de efluente oleoso, garantindo que o efluente tratado não prejudique a saúde do corpo hídrico receptor, além de atender aos parâmetros estabelecidos na licença ambiental e outorga para lançamento de efluentes.

Material e Métodos

Para esse estudo, foi realizado um estudo de caso com o objetivo de avaliar a eficiência do processo de tratamento do efluente oleoso em indústria metalúrgica localizada no município de Araucária/PR, tendo uma base de dados consistente. Conforme Yin (2005), o estudo de caso é uma estratégia que visa compreender e abranger abordagens específicas, coletas e análise de dados, tornando-se uma ferramenta de pesquisa útil em um estudo.

Foram estudados artigos científicos já publicados, sites de revistas, bases de dados, normas e resoluções vigentes aplicáveis, processo da estação de tratamento de efluentes da empresa, assim como os dados dos laudos laboratoriais das amostragens do efluente final, que é lançado em um ribeirão.

Também foram analisados documentos internos da empresa concedente para o estudo, e, visitas técnicas aos locais geradores do efluente, bem como na estação de tratamento para averiguar a eficiência do processo e atendimento a legislação.

Para desenvolver a análise da eficiência da estação de tratamento de efluente oleoso, foram estudados os dados obtidos no referencial teórico, outorga para lançamento de efluentes da indústria metalúrgica, cruzando com os dados referente ao efluente oleoso (borra oleosa) e os laudos técnicos referentes as análises laboratoriais do efluente final, verificando assim a eficiência de todo esse processo.

Os documentos internos da empresa, foram disponibilizados pelo gestor do departamento de Meio Ambiente e as visitas à estação de tratamento de efluentes tiveram acompanhamento pelo líder da área de Utilidades (responsável pelo processo).

Resultados e Discussões

O processo de tratamento de efluentes na empresa focal do estudo é realizado através das etapas de ultrafiltração por membranas cerâmicas (efluente oleoso), físico-químico e biológico. Ao final dessas três etapas, o efluente tratado é desaguado no Ribeirão Cachoeira. De acordo com a instrução operacional do processo de ultrafiltração (UF), o efluente oleoso passa pelo separador, em seguida é deslocado para um filtro de papel da UF, e na sequência é bombeado com pressão contra as membranas cerâmicas para o processo de separação mecânica retendo as menores partículas de óleo (0,1 mícron). Após, esse efluente filtrado é destinado a etapa de tratamento físico-químico, responsável pela neutralização dos efluentes industriais e pela retirada de seus contaminantes químicos, e na sequência é destinado para o tratamento biológico e posteriormente, lançado no ribeirão.

A estação tem capacidade máxima para filtrar 3 m^3/h de efluente, e a sua operação é semiautomatizada. Por ser semiautomatizada, reduz a exposição dos operadores a riscos ocupacionais, como contato com agentes biológicos. Durante o processo de ultrafiltração, os operadores da estação monitoram a vazão, pressão e a turbidez do efluente. A vazão e pressão são monitoradas para garantir o fluxo correto para as outras etapas da estação de tratamento, e a turbidez é para monitorar a quantidade de partículas em suspensão, conforme figura 01.

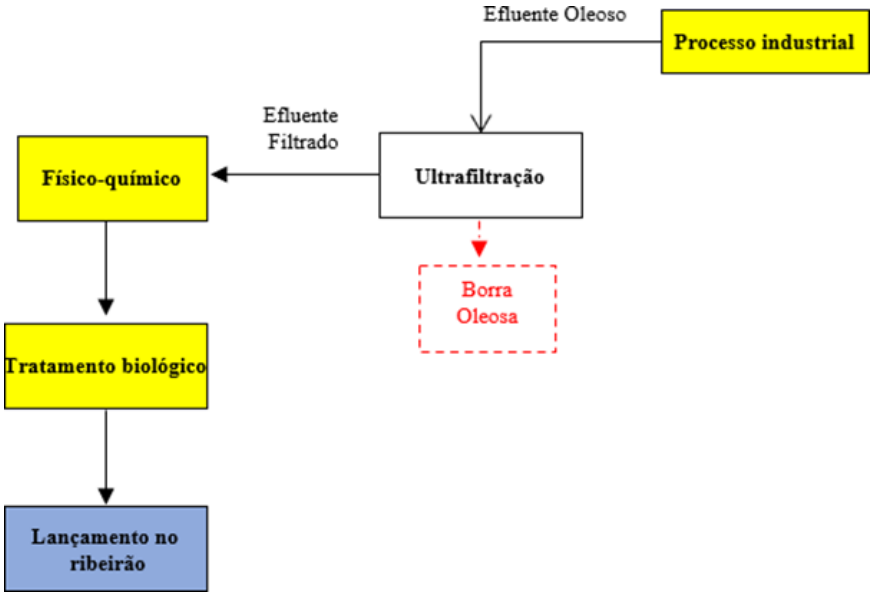


Figura 01: Organograma do Processo de Tratamento do Efluente Oleoso.
Fonte: Empresa de estudo, Procedimento operacional ETE (2023).

A empresa concedente dos dados necessários para o estudo, possui outorga para lançamento de efluentes em um ribeirão que passa nos fundos do terreno, onde a vazão máxima de efluente final é de 40m³/h, totalizando 960m³/dia. A quantidade de efluente oleoso filtrado na UF diariamente, atinge metade da capacidade máxima de filtração. Na sua Licença de Operação estão os parâmetros que devem ser atendidos no lançamento deste efluente, conforme o quadro 2:

Parâmetro	Valor Limite
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio	50 mg/L
DQO - Demanda Química de Oxigênio	200 mg/L
Toxicidade Aguda (FTbl para Vibrio Fischeri)	8
Toxicidade Aguda (FTbl para Daphnia Magna)	8
pH	Entre 5 a 9
Temperatura	inferior a 40°C
Sólidos Sedimentáveis	<1 ml/L

Quadro 2: Parâmetros condicionantes da Licença de Operação da empresa concedente.
Fonte: Dados cedidas pela empresa de estudo (2023).

O DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) é o parâmetro que mensura a quantidade de oxigênio que é consumida pelos microrganismos presentes no efluente, já o DQO – Demanda Bioquímica de Oxigênio avalia a quantidade de oxigênio dissolvido consumido na degradação de matéria orgânica. Os parâmetros referentes a toxicidades agudas (Vibrio Fischeri e Daphnia Magna) tem o intuito de identificar se há presença de patógenos; o pH é para identificar se o efluente tratado está ácido, básico ou neutro; a temperatura precisa estar inferior a 40ºC para não afetar o bioma do Ribeirão; e por fim, os sólidos sedimentáveis mensuram a quantidade de particulados presentes nesse efluente ou rio.

Atendendo as condicionantes da outorga para lançamento de efluentes e a Licença de Operação, ambas emitidas pelo órgão ambiental regional, o Instituto Água e Terra – IAT, a empresa realiza periodicamente testes laboratoriais de monitoramento dos parâmetros mencionados acima. Em laudo laboratorial referente a coleta de amostra de efluente final, correspondente ao mês de agosto de 2023, atingiu-se os seguintes dados, conforme o quadro 3:

Parâmetro	Valor Limite	Laudo agosto/23
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio	50 mg/L	< 2,2
DQO - Demanda Química de Oxigênio	200 mg/L	61
pH	Entre 5 a 9	7,29

Quadro 3: Resultados obtidos no laudo referente a agosto de 2023.
Fonte: Dados cedidas pela empresa de estudo (2023).

Na interpretação dos dados, os parâmetros estão sendo atendidos para o lançamento de efluente no ribeirão, conforme solicitação da outorga emitida pelo IAT, considerando o processo de tratamento eficaz.

De acordo com a Resolução CEMA 76 (2009), que estabelece a exigência e critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins para substituição de matéria prima ou aproveitamento energético, no mês de junho foi laudada uma amostra de efluente oleoso, denominado "borra oleosa". A borra oleosa coletada como amostra, é gerada no processo de laminação reversível a frio, que visa definir a espessura da chapa metálica, e que utiliza emulsão oleosa nesse processo. Essa borra oleosa é enviada para coprocessamento em empresa terceira, destinando-a para aproveitamento energético em cimenteira, conforme a figura 02.

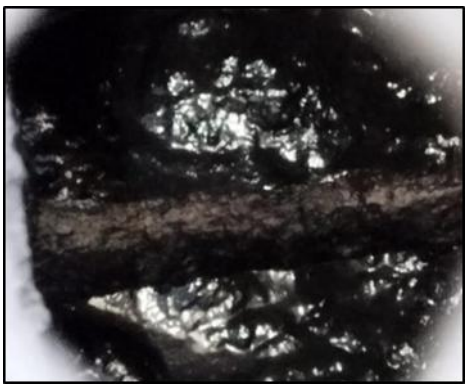


Figura 02: Tanque de recebimento de borra oleosa.
Fonte: Fotos cedidas pela empresa de estudo (2023).

Nesse laudo de CEMA 76 (2009), constam todas as substâncias e suas concentrações, presentes na borra oleosa. Neste laudo, estão concentrados diversos tipos de metais e óleos, e analisando a porcentagem de sólidos que é de 47,4%, comparando ao resultado de sólidos sedimentáveis apresentados acima, notamos que durante o processo de tratamento estes sólidos são retidos, conforme a figura 03.

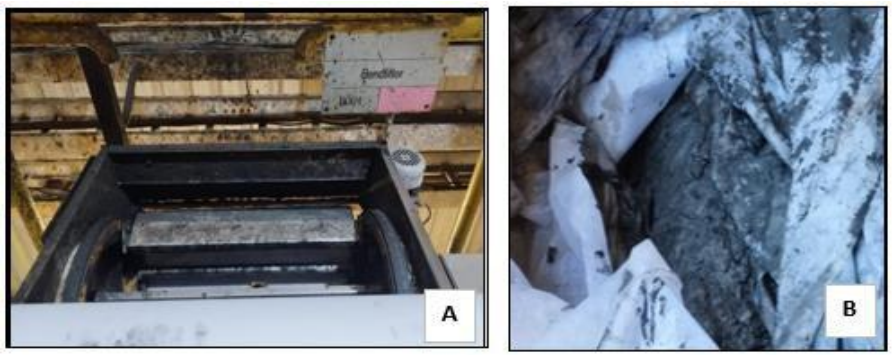


Figura 03: Filtro de papel da Unidade de Ultrafiltração de Efluente Oleoso – (A) Estrutura do filtro de papel; (B) Filtro de papel da UF com finos de ferro e outros sólidos retidos, para descarte.
Fonte: Fotos cedidas pela empresa de estudo (2023).

Também em junho de 2023, foi realizado laudo de amostra do lodo resultante da estação de tratamento de efluentes, em acordo com a CEMA 76 (2009). Neste laudo, a porcentagem de sólidos presente no lodo da ETE foi de 37,8%.
Para realizar uma comparação próxima, no laudo de amostragem referente ao efluente final descartado no ribeirão no mês de junho, vemos que a concentração de sólidos sedimentáveis e sólidos suspensos totais estão atendendo aos requisitos da outorga de lançamento de efluentes, e condicionantes da Licença de Operação, conforme o quadro 4.

Parâmetro	Valor Limite	Laudo junho/23
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio	50 mg/L	< 2,3
DQO - Demanda Química de Oxigênio	200 mg/L	42,4
pH	Entre 5 a 9	6,45
Temperatura	inferior a 40°C	24,7
Sólidos Sedimentáveis	<1 ml/L	< 0,3
Sólidos Suspensos Totais	5 mg/L	< 5

Quadro 4: Resultados obtidos no laudo referente a junho de 2023.
Fonte: Dados cedidas pela empresa de estudo (2023).

Conforme Souza (2014), o formato das membranas cerâmicas pode ser tubular, de fibra oca, módulo quadro/placa, sendo que escolha do melhor formato vai depender do processo industrial e nível de investimento da intuição. Na empresa concedente do estudo, as membranas cerâmicas e seus módulos são do formato tubular, apresentando módulos e estruturas compactas e funcionais a sua realidade.

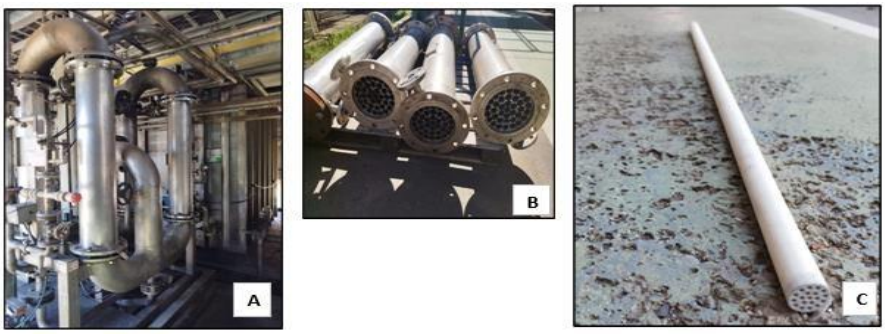


Figura 04: Estação de Ultrafiltração (A) Unidade de Ultrafiltração; (B) Módulos das membranas retirados para higienização; (C) Membrana cerâmica tubular.
Fonte: Fotos cedidas pela empresa de estudo (2023).

Depois de passar pelo filtro de papel, o efluente oleoso é impulsionado através das bombas até chegar aos módulos das membranas cerâmicas, e de acordo com Monteiro (2006), é um dos processos mais eficazes de separação água e óleo. O escoamento nessa etapa é na sistemática Cross-Flow, e de acordo com Souza (2014), é a modalidade de escoamento que apresenta menor proporção de acúmulo de soluto nas membranas, automaticamente sendo o mais utilizado nas indústrias. Essas membranas tubulares possuem poros tão pequenos que não são visíveis a olho nu, e justamente por serem extremamente pequenos, as partículas de óleo ficam retidas e apenas o efluente líquido passa por elas.

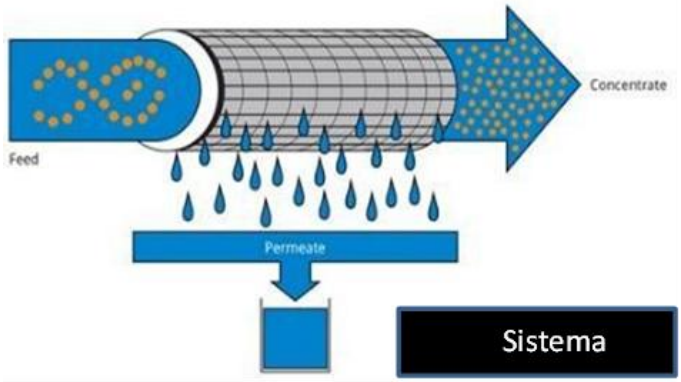


Figura 05: Sistema Cross-Flow.
Fonte: Fotos cedidas pela empresa de estudo (2023).

O efluente é impulsionado sobre pressão das bombas, permeando nas cerâmicas, para após seguir para o tratamento físico-químico. Os poros das membranas cerâmicas retêm partículas menores que 0,1 mícron, retendo 97% das partículas oleosas que chegam até o processo. Conforme procedimento operacional da empresa concedente, periodicamente as membranas cerâmicas passam pelo processo de higienização, onde são retiradas dos módulos e inseridas em um tanque, mergulhadas em mistura de água e ácido. Após o tempo de banho, são lavadas apenas com água e inseridas novamente no módulo para retornar a operação. Para não haver riscos de parar a unidade de ultrafiltração, a estação de tratamento possui cerâmicas de backup.

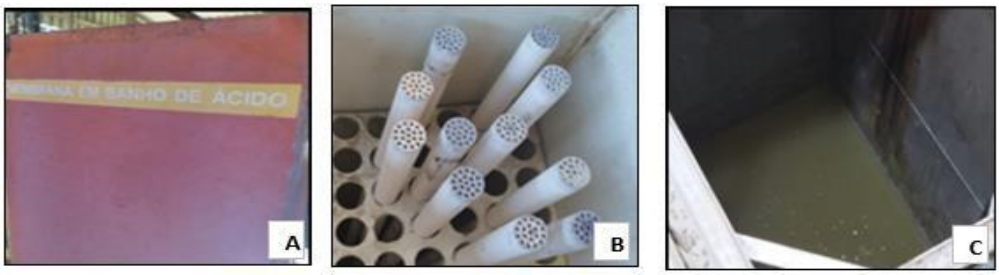


Figura 06: Estação de Ultrafiltração; (A) Tanque para banho ácido nas membranas cerâmicas (higienização); (B) Membranas cerâmicas tubulares retiradas para higienização; (C) Tanque de efluente filtrado.
Fonte: Fotos cedidas pela empresa de estudo (2023).

O efluente filtrado, segue para o tratamento físico-químico juntamente com outros efluents oriundos dos processos, que não oleosos. Nessa etapa, os efluentes são neutralizados e os contaminantes químicos são retirados. Os parâmetros controlados e monitorados nessa etapa são o pH e o DQO.

Por fim, o efluente chega na última etapa, que é tratamento biológico, sendo a unidade de decomposição de partículas biodegradáveis por ação de bactérias aeróbicas. São controlados e monitorados os parâmetros pH, DQO, oxigenação, vazão e turbidez, processo totalmente automatizado. Periodicamente são coletados amostras e enviadas para laboratório analisar os parâmetros, e internamente no laboratório da empresa, são analisados pH e DQO. Todo esse controle se faz necessário para garantir o atendimento aos parâmetros previstos na Licença de Operação e Outorga para lançamento de efluentes, além de garantir que não haverá impacto ao meio ambiente. Em seguida, o efluente tratado é descartado no Ribeirão Cachoeira, que passa aos fundos do terreno da empresa.



Figura 07: Saída da ETE, visualização do efluente tratado que será descartado no ribeirão.
Fonte: Fotos cedidas pela empresa de estudo (2023).

Além das coletas quinzenais de amostras do efluente final, também são realizadas bimestralmente (conforme outorga e Licença de Operação), coletas de amostras do ribeirão Cachoeira. Essas amostras são retiradas no método a montante e jusante. Ou seja, são coletadas amostras de água do ribeirão 01km antes do ponto de lançamento do efluente tratado para analisar a qualidade da água antes de receber o efluente (montante), e coletada também a 01km após o lançamento do efluente tratado, para identificar se houve impacto na qualidade da água. Não foi possível acessar esses laudos específicos, mas de acordo com o setor de meio ambiente, os parâmetros estão sendo atendidos.

Conclusão

A conclusão do estudo de campo sobre o tratamento de efluente oleoso utilizando o processo de ultrafiltração por membranas cerâmicas demonstrou resultados altamente satisfatórios e indicativos da eficiência deste método. Durante a pesquisa, foram coletadas amostras representativas do efluente antes e após o tratamento, e os dados obtidos revelaram uma redução significativa nos níveis de óleos e graxas, bem como de outras impurezas presentes no efluente.

Os parâmetros de qualidade do efluente tratado estavam consistentemente em conformidade com as normas e regulamentações ambientais estabelecidas, evidenciando a eficácia do processo de ultrafiltração por membranas cerâmicas no tratamento de efluentes oleosos. Além disso, a análise estatística dos resultados confirma a consistência e robustez do processo, reforçando a validade e a confiabilidade do tratamento por membranas cerâmicas como uma solução eficaz para o tratamento de efluentes oleosos na indústria metalúrgica.

O processo de tratamento de efluentes na empresa focal do estudo é realizado através das etapas de ultrafiltração por membranas cerâmicas (efluente oleoso), físico-químico e biológico. Ao final dessas três etapas, o efluente tratado é desaguado no Ribeirão Cachoeira.

Referências Bibliográfica

ABADI, S. R. H.; SEBZARI, M. R.; HEMATI, M.; REKABDAR, F.; MOHAMMADI T., **Ceramic membrane performance in microfiltration of oily wastewater**, Desalination 265, 222– 228, 2011.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Gestão das águas; Indústria**. c2021 Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-dasaguas/usos-da- agua/industria. Acesso em 09 de abril de 2023.

ALZAHRANI, S., & MOHAMMAD, A. W. **Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment:** A review. Journal of Water Process Engineering, 4(C), 107–133. 2014. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.09.007.

CEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Resolução CEMA n º76.** Estabelece a exigência e os critérios na solicitação e

emissão de Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético. 2009. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=144181 . Acesso em 10 de abril de 2023.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 430/2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task =arquivo.download&id=627. 2023.

GIORDANO, G. Apostila - **Tratamento e controle de efluentes industriais**. Eng. Gandhi Giordano, D.Sc Profº Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente – UERJ- Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2015.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Efluentes Líquidos**. 2023. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Efluentes-Liquidos Acesso em 27 de maio de 2023.

MARCELINO, R. B. P.; FRADE, P. R.; AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. D. **Tendências e desafios na aplicação de tecnologias avançadas para o tratamento de efluentes industriais não biodegradáveis: atuação do grupo de pesquisas poa control da ufmg**, 2013.

MENDES, A. A.; CASTRO, H. F.; PEREIRA, E. B.; FURIGO Jr., A.,. **Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos**. Química Nova, v. 28, n.2, p. 296-305-2005.

MONTEIRO, M. I. **Tratamento de efluentes oleosos provenientes da indústria metal- mecânica e seu reuso**. 2006.

NASCIMENTO, S. S. **Tratamento de efluente industrial oleoso por Cunninghamella bertholletiae** / Sarah Signe do Nascimento - 61 folhas: il., fig., tab 2019.

OLIVEIRA, N. L. P. G. & SILVA, S. A., **Análise da viabilidade do reaproveitamento de resíduo da estação de tratamento de efluentes oleosos de uma indústria siderúrgica.** 2022.

PINTOR, A. M. A.; VILAR, V. J. P.; Botelho, C. M., S.; BOAVENTURA, R. A. R. **Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies**. A critical review. Chemical Engineering Journal, 297, 229–255.2016. https://doi.org/ 10.1016/j.cej.2016.03.121.

REGET - **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. C2016. Disponível em: revistas,+REGET+2016-+pag+283-294.pdf. Acesso em 11 de abril de 2023.

SINIRH - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. **Água na Indústria. Uso e Coeficientes Técnicos.** Disponível no SINIRH, c2017 – disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/ srv/api/records/c3cd1505-0a96-4b79- 96044f69f8cec225/attachments/_AguaNaIndustria_UsoeCoeficientesTecnicos_vF2.pdf. 2017.

SOUZA, J. S. **Estudo teórico do processo de microfiltração em membranas cerâmicas**. Campina Grande. Pgs 28,69. 2014

STRATHMANN, H., **Membrane separation processes**, Journal of Membrane Science 9, 121, 1981.

YIN, R. K. **Estudo de caso – Planejamento e Métodos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, Pg 136-210. 2005.

DESEMPENHO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS E SUSTENTÁVEIS NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE TINTA

1 Maria Luiza Monteiro da Silva Nunes, 2 Rafaella Alves Pereira, 3 Joelmir André Borssoi, 4 Edilaine Regina Pereira

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: marianunes.2023@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: rafaellaalves@alunos.utfpr.edu.br; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: jborssoi@utfpr.edu.br; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: edilainepereira@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Moringa oleífera; Tanino; Bucha vegetal

Resumo

O tratamento de efluentes industriais é essencial para minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos líquidos, especialmente aqueles provenientes da indústria de tintas, que apresentam elevada carga de cor e compostos inorgânicos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do tratamento físico-químico de um efluente de tinta utilizando coagulantes orgânicos à base de tanino e de semente de Moringa oleifera. Os coagulantes foram preparados e adicionados aos efluentes seguindo-se do ensaio Jar Test para simular os processos de coagulação, floculação e sedimentação. Após essas etapas, as amostras foram submetidas à filtração em dois tipos de meios filtrantes. O filtro de areia foi composto por uma camada suporte de 5 cm de manta não tecida geotêxtil, sobre a qual foram dispostas duas camadas de areia com alturas de 7,5 cm cada, sendo a primeira com granulometria de 0 a 0,425 mm e a segunda de 0,425 a 0,850 mm. O segundo sistema consistiu em filtro contendo bucha vegetal (*Luffa cylindrica*), utilizada como meio filtrante alternativo. Foram realizadas coletas para avaliar os parâmetros físico-inorgânico, como pH, condutividade elétrica, cor aparente e turbidez. Os resultados obtidos indicaram melhora significativa na qualidade do efluente tratado, evidenciada principalmente pela redução da cor aparente, sendo o melhor resultado obtido com a *Moringa oleifera* com remoção de 99,93% após filtração de areia (sendo o mais eficiente no estudo), da turbidez, sendo a *Moringa oleifera* com remoção de 99,99% após filtração de areia, além de estabilidade nos valores de pH. Já para a condutividade elétrica houve um aumento, especialmente nos ensaios com ESMO, comportamento associado à presença de íons provenientes do NaCl utilizado na preparação do extrato salino de *Moringa oleifera*. Dessa forma, os coagulantes orgânicos avaliados demonstraram potencial como alternativas sustentáveis aos coagulantes inorgânicos convencionais. Além disso, embora o filtro de bucha vegetal tenha apresentado desempenho ligeiramente inferior ao filtro de areia, mostrou-se uma alternativa viável e de baixo custo, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de tratamento mais sustentáveis.

Introdução

A indústria de tintas desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico, sendo amplamente utilizada em setores como construção civil, automotiva e industrial. No Brasil, o segmento apresentou crescimento contínuo nos últimos anos, ultrapassando a marca de 2 bilhões de litros comercializados em 2025, consolidando o país como um dos maiores produtores mundiais (ABRAFATI, 2026). No entanto, esse segmento também é responsável pela geração de efluentes líquidos complexos, que apresentam elevada carga de corantes, sólidos suspensos, compostos orgânicos e substâncias potencialmente tóxicas, o que representa um desafio significativo para o tratamento e a disposição adequada desses resíduos (Santana et al., 2020).

Os efluentes provenientes da produção de tintas possuem características que dificultam seu tratamento por métodos convencionais, especialmente devido à alta estabilidade das partículas coloidais e à intensa coloração, que impactam negativamente o meio ambiente quando descartados sem tratamento adequado. (Yamanaka et al., 2006).

Dentre os processos utilizados no tratamento de efluentes industriais, destacam-se as etapas de coagulação e floculação, que visam a desestabilização das partículas coloidais e a formação de flocos passíveis de remoção (Di Bernardo e Dantas, 2005). Atualmente, os coagulantes mais utilizados são os sais metálicos, como os de ferro e alumínio, que reagem com a água formando precipitados como $Fe(OH)_3$ e $Al(OH)_3$. Contudo, apesar de sua eficácia, há crescente preocupação com os resíduos gerados por esses compostos e seus possíveis impactos à saúde, incluindo a associação entre resíduos de alumínio e doenças neurodegenerativas, como o Alzheimer (Mehdinajada e Bina, 2018). Para mitigar essas questões vêm crescendo os estudos sobre coagulantes orgânicos visando as que possuem maior biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixa produção de lodo residual (Bhuptawat et al., 2007 e Yin, 2010).

Nesse cenário, o uso de coagulantes orgânicos, como os extraídos das sementes de *Moringa oleifera* e o extraído da casca da acácia negra (tanino), tem se destacado como uma abordagem promissora e sustentável. Ainda, os coagulantes extraídos da *Moringa oleifera* e compostos à base de tanino reduzem os impactos ambientais associados ao uso de coagulantes inorgânicos convencionais, uma vez que produzem menor volume de lodo e apresentam elevada eficiência no tratamento de efluentes de tinta, configurando-se como alternativas viáveis e sustentáveis (Aboulhassan et al., 2016).

No processo de tratamento, a filtração representa uma etapa fundamental para a remoção das partículas remanescentes presentes no efluente tratado. Filtros de areia são amplamente utilizados em sistemas de tratamento devido à

sua capacidade de retenção de sólidos suspensos e melhoria da qualidade final do efluente (Di Bernardo e Dantas, 2005). Estudos indicam que a aplicação de coagulantes orgânicos em efluentes de indústrias de tinta pode promover a remoção elevada remoção de turbidez e cor aparente, sendo a eficiência do processo influenciada por parâmetros operacionais e etapas complementares de separação (Santana et al., 2020; Santos et al., 2018).

De forma complementar, materiais alternativos como a bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) têm sido investigados como meio filtrante devido à sua estrutura fibrosa, elevada porosidade e baixo custo, características que favorecem a retenção de partículas e a melhoria da qualidade do efluente tratado. Estudos demonstram que o uso da bucha vegetal em sistemas de filtração pode contribuir para a remoção de sólidos suspensos e turbidez, configurando-se como uma alternativa sustentável (Fernandes, 2012).

Diante desse contexto, o estudo de tecnologias alternativas de tratamento utilizando materiais orgânicos torna-se relevante para a busca de soluções ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis.

Metodologia

O experimento foi conduzido no Laboratório de Recursos Hídricos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Londrina. A amostra de água utilizada no estudo foi coletada no Ribeirão Jacutinga, localizado no município de Ibiporã – PR, classificado como corpo hídrico de Classe II, conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005).

Dois tipos de coagulantes foram empregados sendo eles o extrato salino de sementes de *Moringa oleifera* in natura (ESMO) e o produto comercial Tanfloc produzido à base de tanino. Para o preparo do coagulante ESMO, foram utilizados 50 g de sementes descascadas e trituradas em liquidificador com a adição de 12 g de NaCl e 1 litro de água destilada (Souza, 2025).. A concentração da solução foi determinada com base no estudo de Souza (2025), sendo definido, após testes preliminares, a dosagem ideal para o tratamento de 4 mL por litro de amostra.

Já a obtenção do Tanino foi realizada utilizando 10 ml da solução dissolvida em 1 litro de água destilada (Souza, 2025) e utilizado (0,01% v/v).

Os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação foram realizados em equipamento Jar Teste conforme metodologia adaptada de Pereira (2020), a etapa de coagulação foi realizada com agitação rápida por 3 minutos a 150 rpm, em seguida, a floculação foi conduzida com agitação lenta a 15 rpm durante 10 minutos. Após esse período, o sistema foi desligado, dando início à fase de sedimentação.

Após a sedimentação, o líquido sobrenadante foi submetido à filtração em filtros montados em provetas graduadas. O filtro (F1) foi composto por uma camada de 5 cm de manta não tecida geotêxtil como camada suporte e acima dela uma camada de areia de granulometria 0 a 0,425 milímetros (mm) com altura de 7,5 centímetros (cm), e outra camada de areia, com mesma altura, com granulometria 0,425 a 0,850 mm, segundo Souza (2025). Já o filtro (F2) foi feito de bucha vegetal compactada em sua camada filtrante..

As coletas das amostras foram realizadas após 3 minutos do início da sedimentação (T1) e, posteriormente, em intervalos de 10 minutos até completar um total de 30 minutos (T2 e T3). Após este tempo as amostras foram transferidas para os filtros e realizada nova amostragem. Os parâmetros avaliados foram turbidez, cor aparente, condutividade elétrica e pH.

As análises dos resultados obtidos para cor aparente e turbidez foram baseadas nos estudos de porcentagem de eficiência de remoção do parâmetro, representado pela seguinte Equação (01), já os parâmetros pH e condutividade elétrica foram realizados com análise das médias

$$(VB-VL)\ /VB)*100 \qquad (01)$$

Onde: VB é o valor do parâmetro avaliado da água bruta; VL é o valor do parâmetro avaliado da água após o ensaio Jar Test.

Para a coleta dos dados foi considerado o ensaio realizado em duplicata com delineamento experimental em blocos casualizados, com duas observações do tratamento (Coagulante) em cada bloco (Tempo). As análises estatísticas foram realizadas no programa R (R Core Team, 2026), com auxílio do pacote ExpDes.pt (Ferreira et al., 2014), considerando um nível de significância de 5% tanto para o teste F da ANOVA, quanto para o teste de Tukey, para comparação de médias, teste de normalidade e teste de homogeneidade de variâncias.

Resultado e Discussão

Na caracterização do efluente inicial de tinta foram obtidos os seguintes resultados brutos: pH igual a 7,55; condutividade elétrica de 12,55 $\mu S \cdot cm^{-1}$; cor aparente de 46.750 mg $PtCo \cdot L^{-1}$ e turbidez de 108500 NTU (valor foi diluído 1:250ml). A Figura 01 apresenta os valores de pH da amostra antes e após a passagem pelo filtro.

Conforme ilustrado na Figura 01, observa-se que os valores de pH das amostras tratadas com ESMO e tanino permaneceram próximos da neutralidade, ficando entre aproximadamente 7,3 e 7,91. Analisando esses dados, há indicação que a aplicação dos coagulantes orgânicos não promoveu alterações significativas no pH da água, uma característica desejável em processos de tratamento, pois reduz a necessidade de ajustes inorgânico adicionais. Os valores de pH obtidos neste estudo permaneceram próximos da neutralidade, resultado semelhante ao observado por Menkiti et al. (2018), que identificaram condições ótimas de tratamento em pH próximo de 8, indicando que o processo de coagulação pode ocorrer sem alterações significativas no pH do efluente.

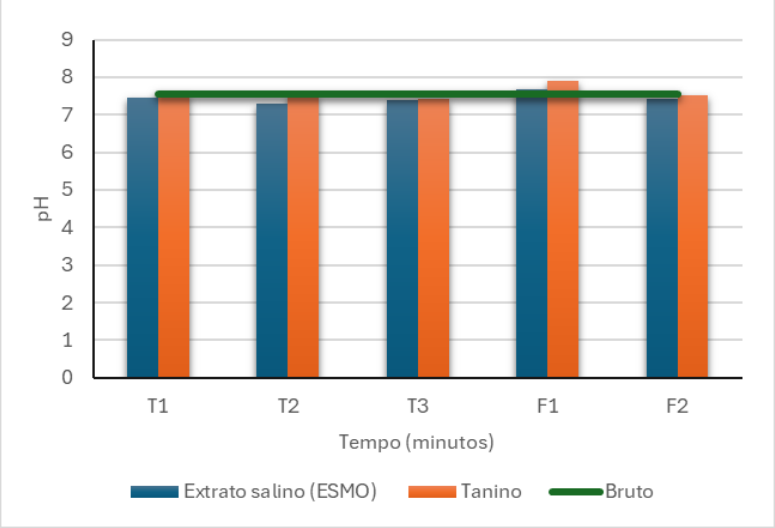


Figura 01 :Valores de pH durante o ensaio.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Para os resultados da etapa de filtração, tanto a areia como a bucha vegetal mantiveram os valores de pH estáveis, sendo em média 7,55 e 7,71 respectivamente, indicando que os filtros adotados foram eficientes, uma vez que não modificaram as características químicas da água em estudo. Esse comportamento está de acordo com estudos realizados em efluentes de indústrias de tintas, nos quais se observa que o processo de tratamento por coagulação com coagulantes orgânico ocorre em faixas próximas à neutralidade, sem alterações significativas no pH (Santana et al., 2020; Menkiti et al., 2018). Dessa forma, os resultados indicam que a etapa de filtração atuou apenas na remoção de partículas remanescentes, sem interferir nas propriedades químicas do efluente tratado.

A Figura 02 demonstra o comportamento da condutividade elétrica da água durante o experimento.

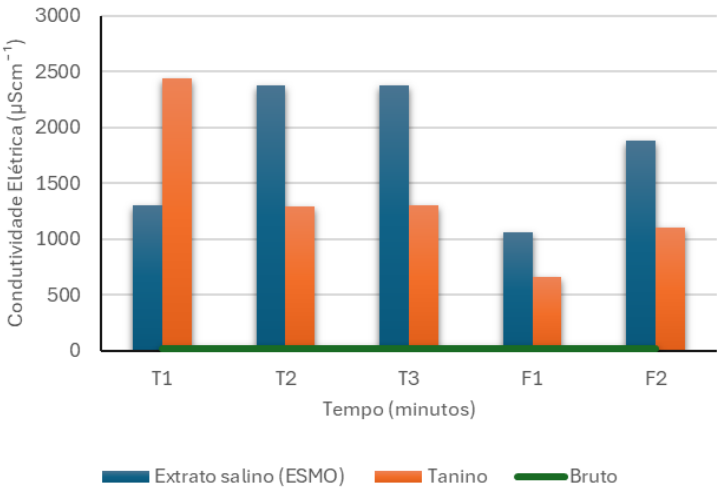


Figura 02: Variação da condutividade elétrica durante o ensaio.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

De acordo com a Figura 02, durante o tratamento com ESMO elevou-se a condutividade elétrica do efluente, especialmente no tempo T2 e T3, respectivamente 2373 e 2374 µS·cm⁻¹, comportamento associado à presença de NaCl utilizado na preparação do extrato, que promove o aumento da concentração de íons dissolvidos no meio (Santana et al., 2020). Além disso, a aplicação da *Moringa oleifera* pode contribuir para a liberação de compostos solúveis provenientes das sementes, influenciando os parâmetros físico-inorgânico do efluente (Bhuptawat et al., 2007). Em contrapartida, o tratamento com o Tanino apresentou valores relativamente mais baixos, como no T2 sendo 1297,5 µS·cm⁻¹, o que pode ser explicado pelo fato de que coagulantes à base de tanino não adicionam quantidades significativas de íons ao meio, atuando predominantemente por mecanismos de adsorção e neutralização de cargas (Aboulhassan et al., 2016).

Após a etapa de filtração, o tratamento com filtro de areia apresentou a maior redução dos valores de condutividade elétrica, sendo de 857,2 µS·cm⁻¹, enquanto para a bucha vegetal foram observados valores de 1490,8 µS·cm⁻¹, evidenciando a maior eficiência do filtro de areia na remoção de partículas e íons remanescentes. Esse comportamento está de acordo com

estudos em efluentes de indústrias de tintas, nos quais a remoção de contaminantes contribui diretamente para a melhoria dos parâmetros físico-inorgânico do efluente tratado (Menkiti et al., 2018; Madjene et al., 2023). Essa diferença pode estar relacionada à maior capacidade da areia em reter partículas finas e sólidos dissolvidos, característica amplamente observada em sistemas convencionais de filtração (Di Bernardo; Dantas, 2005).

A Figura 03 apresenta o percentual de eficiência de remoção da turbidez ao longo do experimento.

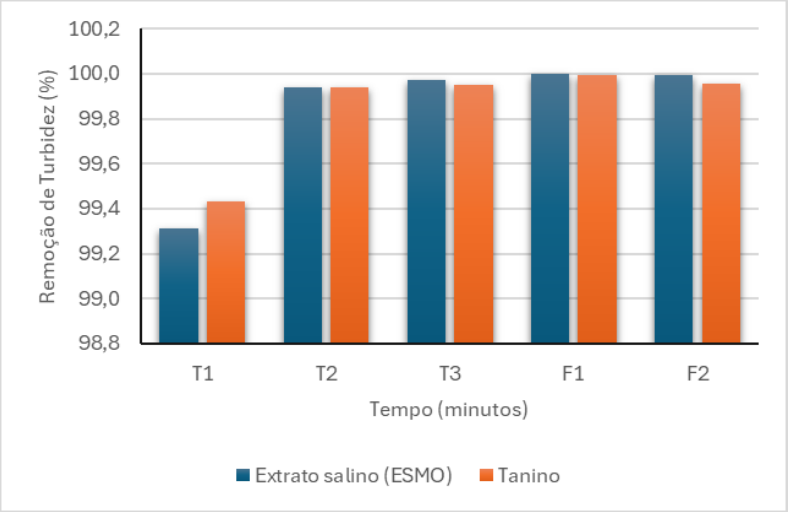


Figura 03: Eficiência de remoção da turbidez.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

De acordo com a Figura 03, a análise dos dados de turbidez indica que o uso do ESMO apresentou desempenho semelhante ao tanino. No tempo T1, a remoção de turbidez foi de 99,31% com o ESMO, próximo ao tanino que resultou em 99,43%. Essa pequena diferença foi reduzida nos tempos subsequentes, com destaque para o tempo T3, no qual o ESMO atingiu 99,97%, valor muito próximo ao tanino de 99,95%. Esses resultados evidenciam a elevada eficiência de ambos os coagulantes no tratamento de efluente de tinta, comportamento também relatado na literatura, com remoções superiores a 98% em processos de coagulação (Menkiti et al., 2018; Madjene et al., 2023).

Em relação à etapa de filtração, o filtro de areia apresentou desempenho ligeiramente superior ao de bucha vegetal, com remoções de 99,99% e 99,95%, respectivamente, embora ambos tenham demonstrado elevada eficiência. Após a filtração, os tratamentos mantiveram remoções superiores a 99%, evidenciando o papel da filtração como etapa complementar na remoção de partículas residuais e a possibilidade de uso do composto vegetal. A maior eficiência da areia pode ser atribuída à sua menor porosidade e maior capacidade de retenção de partículas finas em comparação à estrutura mais porosa da bucha vegetal (Di Bernardo; Dantas, 2005).

A Tabela 01 apresenta a análise estatística de variância (ANOVA) aplicada à turbidez.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Coagulante	1	3526	3526	0,222	0,64994
Tempo	2	1055967	527983	33,276	0,00013
Resíduo	8	126935	15867		
Total	11	1186427			

Tabela 01 – Análise de variância (ANOVA) para turbidez.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada com o objetivo de verificar o efeito dos diferentes tratamentos com coagulantes sobre a turbidez ao longo do tempo de ensaio. Foram considerados os fatores de Tratamento (comparando os ESMO e tanino), Bloco (tempos de sedimentação T1, T2 e T3).

A partir dos resultados da Tabela 1, conclui-se que não há diferença significativa entre os coagulantes ESMO e tanino na remoção de turbidez (p-valor=0,64994 > 0,05). Por outro lado, o Tempo de sedimentação (Bloco) apresentou efeito significativo (p-valor=0,00013 < 0,05), indicando que o tempo de sedimentação influenciou significativamente os resultados obtidos. Esse resultado reforça que o tempo de atuação dos coagulantes influencia diretamente na eficiência do ensaio.

Por fim, a análise de normalidade dos resíduos, por meio do teste de Shapiro-Wilk, ao nível de 5% de significância (p-valor = 0,556 > 0,05), indicou que os dados seguem distribuição normal, também no teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett, concluiu-se que as variâncias são homogêneas (p-valor = 0.8619 > 0,05) validando a aplicação da ANOVA. Embora, numericamente o ESMO tenha apresentado menor média de turbidez remanescente (169 NTU) em comparação ao tanino (177 NTU), estatisticamente, ambos os coagulantes apresentaram mesmo desempenho na remoção da turbidez, por isso, o teste de comparação de médias de Tukey não foi apresentado.

A Figura 04 apresenta os percentuais de remoção da cor aparente ao longo do experimento.

Conforme observado na Figura 04, o ESMO apresentou desempenho superior na remoção da cor aparente na maioria dos tempos analisados, com exceção do T1, em que o tanino apresentou resultado ligeiramente maior (97,93%) em comparação ao ESMO (97,83%). Nos tempos subsequentes, o ESMO destacou-se, especialmente no T3, atingindo 99,92% de remoção, enquanto o tanino apresentou 99,48%. Esses resultados indicam elevada eficiência de ambos os coagulantes no tratamento de efluente de tinta, comportamento também observado na literatura, com altas taxas de remoção de cor em processos de coagulação (Menkiti et al., 2018; Aboulhassan et al., 2016). A maior eficiência do ESMO pode estar associada aos mecanismos de neutralização de cargas e formação de flocos, que favorecem a remoção de partículas responsáveis pela cor aparente (Madjene et al., 2023).

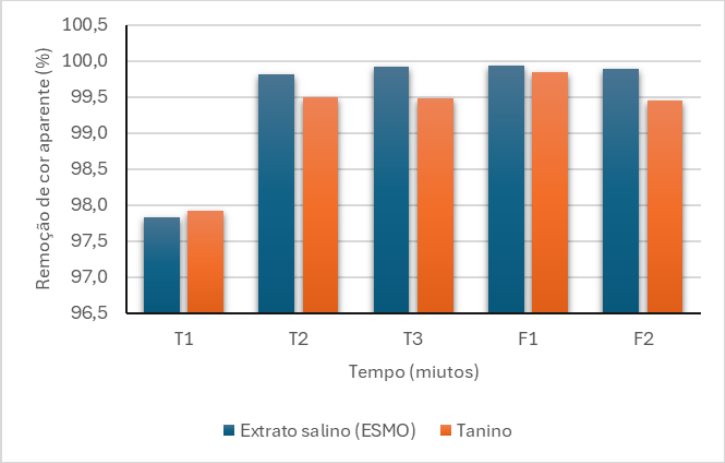


Figura 04: Eficiência de remoção da cor aparente.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Após a etapa de filtração, ambos os tratamentos apresentaram remoções superiores a 99%, evidenciando a eficiência do sistema aplicado para ambos os materiais filtrantes em questão.

A Tabela 02 apresenta a análise estatística de variância (ANOVA) aplicada à cor aparente.

	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Tratamento	1	31827	31827	1,489	0,25708
Bloco	2	1890416	945208	44,228	0,00005
Resíduo	8	170970	21371		
Total	11	2093213			

Tabela 02 – Análise de variância (ANOVA) para cor aparente.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Da mesma forma que ocorreu com a variável Turbidez, pelos resultados da Tabela 2, conclui-se que não há diferença significativa entre os coagulantes para Cor aparente (p-valor=0,25708 > 0,05). Já o Tempo de sedimentação (Bloco) apresentou efeito significativo (p-valor=0,00005 < 0,05), mostrando que o processo de sedimentação contribuiu para a eficiência do tratamento ao longo do experimento. Uma vez que, estatisticamente, não há diferença entre os coagulantes, o teste de comparação de médias de Tukey não foi apresentado. Em relação aos pressupostos da ANOVA, ao nível de 5% de significância, a análise de normalidade dos resíduos, por meio do teste de Shapiro-Wilk, indicou que os dados seguem distribuição normal (p-valor = 0,06678 > 0,05) e no teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett, concluiu-se que as variâncias são homogêneas (p-valor = 0.05631 > 0,05). O teste de Tukey confirmou a diferença entre os tratamentos, com o ESMO apresentando média significativamente inferior de cor aparente remanescente (244 $mgPtCo \cdot L^{-1}$) em comparação ao tanino (283 $mgPtCo \cdot L^{-1}$). Esses

resultados indicam maior eficiência do extrato salino de *Moringa oleifera* na remoção da cor aparente do efluente de tinta. Dessa forma, a análise estatística reforça os resultados experimentais observados, evidenciando que, ambos os coagulantes apresentem elevada eficiência. É importante ressaltar que, segundo Pimentel-Gomes (2009), o grau de liberdade do resíduo (GL do resíduo) representa a quantidade de informação disponível para estimar a variabilidade experimental. Quando esse valor é muito baixo, a estimativa do erro fica instável, prejudicando testes como o F da ANOVA. Por isso, ele recomenda que o GL do resíduo > 10. Se Gl do resíduo ≤ 10, a precisão experimental é baixa, assim, os resultados são pouco confiáveis.

Comentários finais

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o tratamento do efluente de tinta utilizando extrato salino de *Moringa oleifera* (ESMO) e tanino foi eficiente na remoção de turbidez e cor aparente. Ambos os coagulantes apresentaram elevadas eficiências, com remoções superiores a 99% após a etapa de filtração, evidenciando a eficácia do processo aplicado.

A análise estatística demonstrou que, para o parâmetro turbidez, não houve diferença significativa entre os tratamentos, indicando o mesmo desempenho entre o ESMO e o tanino. Igualmente, para a cor aparente, não foi observada diferença estatisticamente significativa.

A etapa de filtração mostrou-se fundamental para o refinamento do tratamento, promovendo a remoção de partículas residuais não eliminadas na sedimentação. O filtro de areia apresentou desempenho ligeiramente superior ao de bucha vegetal, embora ambos tenham demonstrado elevada eficiência.

Dessa forma, conclui-se que o uso do extrato salino de *Moringa oleifera* associado à filtração, especialmente com areia, constitui uma alternativa eficiente, sustentável e de baixo custo para o tratamento de efluentes de indústrias de tintas, apresentando grande potencial de aplicação em sistemas de tratamento. Recomenda-se a realização de estudos futuros em escala piloto ou industrial, visando avaliar a aplicabilidade do processo em condições reais de operação.

Agradecimentos

Á Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo suporte acadêmico, infraestrutura e ambiente que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ABOULHASSAN, M. A.; SOUABI, S.; YAACOUBI, A.; BAUDU, M. Eficácia da coagulação de um agente coagulante à base de tanino comparada à de sais metálicos no tratamento de efluentes da indústria de tintas. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 41, p. 19199–19205, 2016. Acesso em: 25 mar. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE TINTAS (ABRAFATI). *Vendas de tintas superaram 2 bilhões de litros em 2025*. 2026. Disponível em: https://abrafati.com.br/vendas-de-tintas-superaram-2-bilhoes-de-litros-em-2025/. Acesso em: 25 mar. 2026.

BHUPTAWAT, H.; FOLKARD, G. K.; CHAUDHARI, S. Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. *Journal of Hazardous Materials*, v. 142, n. 1–2, p. 477–482, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.044. Acesso em: 12 mar. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 25 mar. 2026.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed. São Carlos: RIMA, 2005. v. 1. 792 p. Acesso em: 25 mar. 2026.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: an R package for ANOVA and experimental designs. *Applied Mathematics*, v. 5, p. 2952–2958, 2014. Acesso em: 30 mar. 2026.

FERNANDES, W. V.. *Uso da Luffa cylindrica como meio suporte para crescimento bacteriano em filtro anaeróbio tratando esgotos domésticos*. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5469. Acesso em: 25 mar. 2026.

MADJENE, F.; BENHABILES, O.; BOUTRA,. Coagulation/flocculation process using *Moringa oleifera* bio-coagulant for industrial paint wastewater treatment: optimization by D-optimal experimental design. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/368371183. Acesso em: 25 mar. 2026.

MEHDINEJADA, M. H.; BINA, B. Application of *Moringa oleifera* coagulant protein as orgânico coagulant aid with alum for removal of heavy metals from raw water. *Desalination and Water Treatment*, v. 116, p. 187–194, 2018. Acesso em: 25 mar. 2026.

MENKITI, M. C.; OKOANI, A. O.; EJIMOFOR, M. I. Adsorptive study of coagulation treatment of paint wastewater using *Brachystegia eurycoma*. *Applied Water Science*, v. 8, p. 189, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13201-018-0836-1. Acesso em: 26 mar. 2026.

PIMENTEL-GOMES, F. *Curso de estatística experimental*. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. Acesso em: 30 mar. 2026.

PEREIRA, E. R.; NAKANO, R. S.; GONÇALVES, V. O. S.; JANZ, F. J. L. Integração de sistemas alagados construídos com uso de coagulantes orgânicos no tratamento de efluentes de restaurante universitário. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, p. 25843–25849, 2020. Acesso em: 25 mar. 2026.

R CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2026. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 30 mar. 2026.

SANTANA, G. B.; NÓBREGA, D. C.; OLIVEIRA, J. T.; MARTINS, I. A.; NASCIMENTO, R. F.; VIDAL, C. B. Aplicação da semente de *Moringa oleifera* como coagulante orgânico no tratamento de efluente de uma indústria de tintas no Ceará. *Revista Tecnologia*, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1–17, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/56352/1/2020_art_gbsantana.pdf. Acesso em: 25 mar. 2026.

SANTOS, S. T.; LIMA, A. J.; MICHELAN, D. C. G. S. Desempenho de filtros lentos com meio filtrante de misturas de areia e materiais sustentáveis. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, v. 16, n. 1, p. 139–153, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.1.82098. Acesso em: 25 mar. 2026.

SOUZA, G. S. *Eficiência de diferentes materiais filtrantes em sistema de filtração rápida no tratamento de efluente de indústria de tintas*. 2025. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2025. Acesso em: 25 mar. 2026.

YAMANAKA, H. T. et al. *Guia técnico ambiental: tintas e vernizes – série P+L*. São Paulo: FIESP; SESI; SENAI; CETESB, 2006. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/tintas.pdf. Acesso em: 25 mar. 2026.

YIN, C.-Y. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, v. 45, n. 9, p. 1437–1444, 2010. Acesso em: 25 mar. 2026.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE NUTRIENTES EM SISTEMA DE LAGOA AERADA FACULTATIVA TRATANDO EFLUENTE KRAFT

Ana Paula Pazda, Claudia Regina Xavier
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: anapazda@alunos.utfpr.edu.br; e-mail: cxavier.utfpr@gmail.com

Palavras-chave: Efluente de celulose e papel, lagoa aerada facultativa, nutrientes.

Resumo

A indústria de celulose e papel, especialmente por meio do processo kraft, gera efluentes com elevada carga orgânica, cor e presença de compostos recalcitrantes, como derivados de lignina e fenóis. O tratamento biológico, por meio de lagoas aeradas facultativas (LAF), é amplamente utilizado para a remoção da fração biodegradável, porém apresenta limitações na degradação de compostos específicos.

A eficiência desses sistemas está relacionada à disponibilidade de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, sendo necessária sua suplementação em efluentes com baixa concentração desses elementos. Entretanto, o excesso de nutrientes pode elevar custos operacionais e potencializar impactos ambientais, como a eutrofização. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência da redução da dosagem de nutrientes na relação C:N:P em sistema de LAF tratando efluente de celulose kraft em escala de bancada. Foram avaliadas três condições operacionais (100:0,7:0,3; 100:0,7:0,1; 100:0,5:0,1), sob carga orgânica volumétrica de 0,2 kg DQO m^{-3} d^{-1}. O desempenho do sistema foi analisado quanto à remoção de DBO_5, DQO, COT, cor e compostos fenólicos totais. Os resultados indicaram remoções médias de aproximadamente 80% para DBO_5 e 40% para DQO e COT, independentemente da redução de nutrientes, evidenciando a estabilidade da biomassa heterotrófica. Por outro lado, a remoção de cor e compostos fenólicos foi limitada, com valores inferiores a 10%, indicando a persistência de compostos recalcitrantes. A condição intermediária (100:0,7:0,1) apresentou melhor desempenho global, demonstrando que a redução da dosagem de fósforo é viável sem comprometer a eficiência do tratamento. Os resultados indicam que a otimização da relação C:N:P pode reduzir o consumo de insumos e minimizar impactos ambientais, mantendo a eficiência do sistema biológico.

Introdução

A indústria de celulose e papel ocupa posição estratégica no cenário industrial global, sendo o processo kraft responsável por grande parte da produção mundial de celulose, em função de sua eficiência na separação da lignina e recuperação de reagentes químicos (HUBBE et al., 2016; SOUSA et al., 2023; HIDD et al., 2025). Esse setor apresenta elevada relevância econômica, porém está associado ao consumo significativo de recursos naturais, especialmente água, além da geração de grandes volumes de efluentes líquidos com alto potencial poluidor (POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004; PATEL et al., 2021; SOUSA et al., 2023).

Os efluentes provenientes do processo kraft possuem composição complexa, contendo elevadas concentrações de matéria orgânica, compostos fenólicos, derivados de lignina, ácidos resínicos, além de elevada cor e potencial toxicidade (SLADE et al., 2004; HUBBE et al., 2016; MACHADO et al., 2022). Esses compostos apresentam diferentes graus de biodegradabilidade, sendo que uma parcela significativa é classificada como recalcitrante, o que dificulta sua remoção completa por processos biológicos convencionais (NUNES, 2021).

O tratamento biológico continua sendo a principal alternativa adotada na indústria de celulose para remoção de matéria orgânica, devido à sua viabilidade econômica e eficiência na degradação de frações biodegradáveis do efluente (PATEL et al., 2021). Sistemas como lagoas aeradas facultativas são amplamente utilizados, sendo capazes de promover elevadas remoções de DBO_5, embora apresentem limitações na remoção de compostos recalcitrantes, cor e derivados lignínicos (VON SPERLING, 1996; MACHADO et al., 2022).

Um dos fatores determinantes para o desempenho dos sistemas biológicos é a disponibilidade adequada de nutrientes, especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P), essenciais para o crescimento e manutenção da biomassa microbiana. Efluentes de celulose kraft, em geral, apresentam deficiência desses nutrientes, tornando necessária sua suplementação para garantir a eficiência do tratamento biológico (HUBBE *et al.*, 2016; CABRERA, 2017; VIDAL *et al.*, 2021).O controle rigoroso da relação C:N:P permanece como um dos pilares para a estabilidade de sistemas biológicos que tratam efluentes de polpação Kraft, uma vez que a carência nutricional limita a atividade enzimática e a diversidade microbiana necessária para a degradação de compostos recalcitrantes (VIDAL *et al.*, 2021; CHAUDHARY, et al., 2025). Estudos recentes indicam que a otimização da dosagem de nutrientes, aliada a estratégias de bioaumentação e biofiltração, é essencial para manter a eficiência de remoção de matéria orgânica e reduzir a toxicidade do efluente final (JAGABA *et al.*, 2022; COELHO *et al.*, 2024).

Para um tratamento aeróbio, como em lodo ativado, eficiente é necessário a relação de 100:5:1 para DBO:N:P (AMMARY, 2004; HUBBE *et al.*, 2016). No caso de efluentes kraft, essa proporção é raramente atingida de forma natural, exigindo monitoramento constante para evitar o desenvolvimento de microrganismos indesejados (VIDAL *et al.*, 2021). A limitação nutricional pode reduzir a taxa de biodegradação da matéria orgânica, enquanto o excesso de nutrientes pode resultar em aumento de custos operacionais e impactos ambientais, como eutrofização dos corpos receptores (AMMARY, 2004; HUBBE et al., 2016; AHMED et al., 2022).

Adicionalmente, o aumento da pressão por sustentabilidade tem impulsionado a busca por maior eficiência no uso de água e energia na indústria de celulose, reforçando a necessidade de otimização dos sistemas de tratamento de efluentes (SOUSA et al., 2023; HUBBE, 2021). Nesse contexto, estratégias operacionais como o ajuste da dosagem de nutrientes tornam-se particularmente relevantes, pois influenciam diretamente o desempenho do tratamento biológico e a qualidade do efluente final.

Diante desse cenário, torna-se fundamental compreender a influência da dosagem de nutrientes na eficiência de remoção de matéria orgânica e compostos específicos em efluentes de celulose kraft. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes relações C:N:P no desempenho de um sistema de lagoa aerada facultativa, buscando identificar condições operacionais que conciliem eficiência de tratamento e sustentabilidade.

Material e Métodos

Coleta e caracterização do efluente de celulose kraft

O efluente industrial empregado neste estudo foi fornecido por uma indústria de celulose e papel kraft não branqueado, de alta resistência, situada na região metropolitana de Curitiba–PR, Brasil. A coleta foi realizada na entrada do sistema de tratamento, anteriormente à bacia de decantação primária, etapa que antecede o tratamento biológico conduzido por lagoas aeradas facultativas, seguido por lagoa de maturação.

As amostras foram acondicionadas em galões plásticos de 20 L, transportadas e mantidas sob refrigeração a 4 °C, na ausência de luz, até o momento de sua utilização, conforme recomendações da APHA (2023). Ao longo das três etapas do estudo, foram realizadas cinco campanhas de amostragem, distribuídas da seguinte forma: Etapa I – duas coletas; Etapa II – duas coletas; e Etapa III – uma coleta.

Para a caracterização do efluente e avaliação do desempenho do tratamento, as amostras foram previamente filtradas em membranas de nitrocelulose com porosidade de 0,45 µm. Em seguida, foram analisados os parâmetros físico-químicos: demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5), demanda química de oxigênio (DQO), cor (Vis 440 nm), carbono orgânico total (COT), compostos fenólicos totais (CFT), compostos aromáticos (UV 254 nm) e compostos derivados da lignina, incluindo frações lignínicas (UV 280 nm) e lignossulfônicas (UV 346 nm), conforme metodologias descritas em APHA (2023) e Chamorro et al. (2009). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro Varian UV-Vis Cary 50 (Santa Clara, EUA), sendo todas as análises conduzidas em triplicata.

No início de cada etapa experimental, foram quantificados os sólidos suspensos totais (SST) e os sólidos suspensos voláteis (SSV), com o objetivo de monitorar o crescimento da biomassa inoculada na lagoa, inicialmente na concentração de 70 mg $SSV.L^{-1}$, proveniente do fundo da lagoa aerada facultativa da indústria fornecedora das amostras do efluente. Adicionalmente, ao atingir o estado estacionário de cada etapa, foram realizadas análises de carbono orgânico total (COT).

Descrição do aparato experimental

Foi adotado o tratamento biológico para o efluente, usou-se um reator em escala de bancada que simulou uma lagoa aerada facultativa (LAF), conforme a Figura 1.

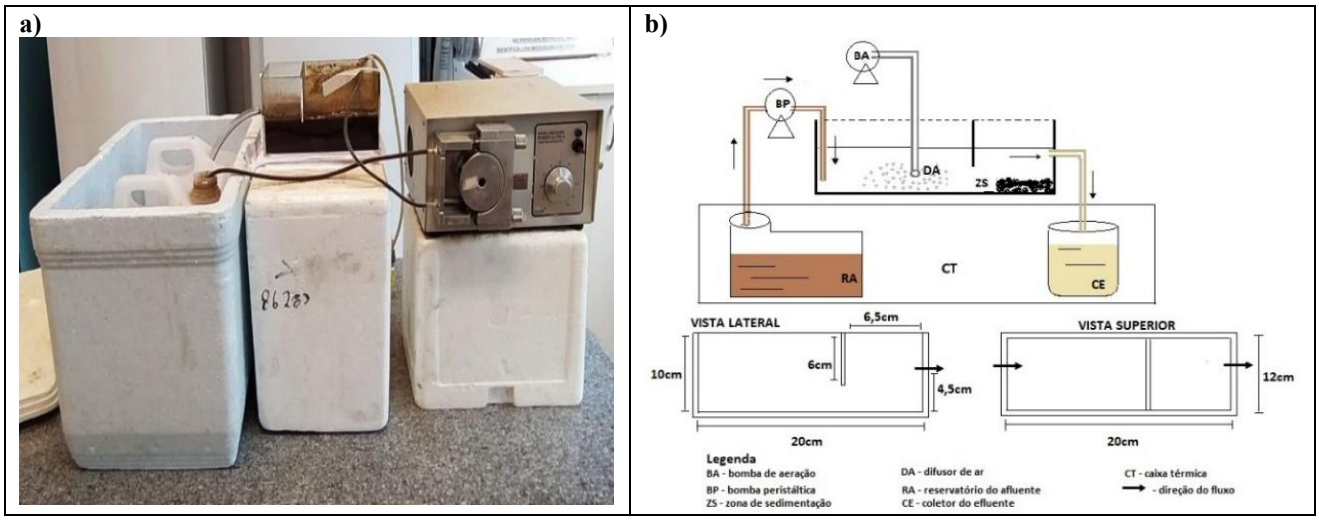


Figura 1: a) Foto da LAF de bancada e b) Esquema da LAF empregada. Fonte: Autoria própria (2026)

A LAF foi construída em material acrílico transparente, com 1 L de volume útil e com zona de sedimentação. O sistema foi aerado com compressor de ar (vazão média de 35 $L.h^{-1}$) e o ingresso do afluente foi promovido por bomba peristáltica (modelo Milan – BP 600), a cada acionamento da bomba peristáltica era acrescido cerca de 80 mL ao sistema LAF.

A concentração de oxigênio dissolvido no sistema foi mantida acima de 4,0 mg L^{-1}, com o parâmetro monitorado semanalmente, por um oxímetro Lutron DO-5519. E a carga orgânica volumétrica (COV) aplicada foi de 0,2 $kg.m^{-3}.\ d^{-1}$, para as diferentes razões C:N:P avaliadas.

A operação do sistema LAF ocorreu em três etapas (I, II e III), sendo que em cada uma delas o tempo de operação foi de aproximadamente 60 dias. O pH do afluente foi corrigido para 7,00 ± 0,02 prévio ao tratamento, logo da adição dos nutrientes, como demonstrado a seguir.

Variação da dosagem de nutrientes

A adição dos nutrientes ao afluente da LAF para as variações de C:N:P foi realizada com soluções de cloreto de amônio (NH_4Cl) e fosfato dipotássico (K_2HPO_4). A dosagem de nutrientes foi calculada de maneira que cada 100 mg L^{-1} de DQO medida fosse adicionado 1 mL de solução concentrada de nutriente. Cada etapa durou 60 dias e em cada uma delas, observou-se o atingimento do estado estacionário, ou seja, a variação de remoção de DBO_5 inferior a 5% nas três últimas medições. Ao finalizar uma etapa, um novo sistema era preparado com 70 mg SSV.L^{-1} (VON SPERLING, 2014) e a amostra do efluente de celulose para a nova relação de C:N:P empregada.

Assim, o afluente do tratamento consistia na amostra industrial, caracterizada por ensaio físico-químico, com pH ajustado e nutrientes em uma das razões C:N:P avaliadas.

Na etapa I foi empregada relação 100:0,7:0,3, na II foi de 100:0,7:0,1 e na III foi de 100:0,5:0,1. Portanto, entre as Etapas I e II houve diminuição de P na relação C:N:P e entre as etapas II e III diminuição de N na razão de nutrientes. Comparando as etapas I e III tem-se redução tanto de P quanto de N agregados ao tratamento biológico. Sendo que a Etapa I é a mais similar àquela empregada pela indústria que cedeu as amostras do efluente, a II é uma possibilidade com menor teor de P e a III com menor teor de N.

Análises estatísticas

Os dados obtidos durante as etapas do tratamento foram avaliados a partir de análises de variância no software Statistica 14.0.0.15 e foram submetidos a análises de variância ANOVA, de um critério e pós-Tukey, após verificação de normalidade dos mesmos, com nível de significância $p < 0,05$. Com base nisso, buscou-se avaliar a diferença de desempenho entre as LAFs com as diferentes dosagens de nutrientes.

Resultados e Discussão

Caracterização do Efluente Bruto

A caracterização físico-química do efluente Kraft utilizado neste estudo revelou uma matriz complexa, típica de processos de polpação de fibra curta, com carga orgânica moderada e limitações nutricionais. Os principais parâmetros monitorados no efluente bruto estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização de amostra da indústria de celulose

Parâmetros	Etapa I 100: 0,7: 0,3	Etapa II 100: 0,7: 0,1	Etapa III 100: 0,5: 0,1
pH	7,40 (0,20)	7,60 (0,30)	7,90 (0,30)
DQO (mg L^{-1})	523,48 (6,30)	642,22 (18,20)	506,89 (3,40)
DBO_5 (mg L^{-1})	135,90 (17,10)	212,05 (53,80)	206,25 (21)
DBO_5/DQO	0,26	0,33	0,40
COT	41 (1,02)	60 (4,80)	26 (1,26)
CFT (mg L^{-1})	319,23 (61,70)	331,88 (50,50)	241,62 (6,05)
Cor (VIS440nm)	0,41 (0,06)	0,58 (0,45)	0,43 (0,35)

Nota: Entre parênteses segue o desvio padrão das réplicas nas análises, amostragem Etapa I n=2; Etapa II n=2 e Etapa III n=1.

A relação entre DBO_5/DQO é amplamente empregada como indicador da fração biodegradável da carga orgânica, sendo que valores mais elevados dessa razão indicam maior potencial de degradação biológica do efluente (VON SPERLING, 2014; KAMALI e KHODAPARAST, 2015).

Em efluentes da indústria de celulose e papel kraft, a razão DBO_5/DQO geralmente varia entre 0,05 e 0,5 (HUBBE et al., 2016). Segundo Ahmed et al., (2022) e Cabrera (2017), razões superiores a 0,3 são consideradas adequadas para o tratamento biológico, indicando que uma parcela significativa da carga orgânica pode ser estabilizada por via microbiana.

Neste estudo, foram obtidas razões de 0,26, 0,33 e 0,40 nas Etapas I, II e III, respectivamente, situando-se dentro da faixa típica e indicando viabilidade de tratamento biológico, embora a Etapa I apresente caráter recalcitrante (<0,30) (METCALF & EDDY, 2003). A menor biodegradabilidade desses efluentes está associada à presença de compostos de difícil biodegradação, como os derivados de lignina, compostos fenólicos e aromáticos (CHAMORRO et al., 2009; KAMALI et al., 2019; LEWIS et al., 2011), ainda que remoções expressivas possam ser alcançadas (PEITZ e XAVIER, 2019; VILLAMAR, 2009).

Desempenho da lagoa aerada facultativa (LAF)

Remoção de matéria orgânica

A eficiência de remoção de matéria orgânica é o principal indicador da performance do tratamento biológico secundário. A biodegradação da matéria orgânica foi monitorada através dos parâmetros DQO, DBO_5 e COT. Na Figura 2, são apresentados os dados referentes a remoção de DQO, DBO_5 e COT no período de operação da LAF, conforme as diferentes dosagens de nutrientes.

A remoção média de DQO entre as três etapas com as dosagens de nutrientes diferentes, foi de aproximadamente 40%. Os resultados obtidos (36% a 41%) alinham-se significativamente com estudos recentes que utilizam sistemas biológicos convencionais para efluentes de celulose. Coelho et al. (2024), ao tratarem efluente kraft em escala de bancada, obtiveram eficiências de remoção de DQO entre 33% e 34%, valores levemente inferiores aos deste estudo, o que reforça a competência da biomassa adaptada no sistema LAF sob diferentes dosagens de nutriente.

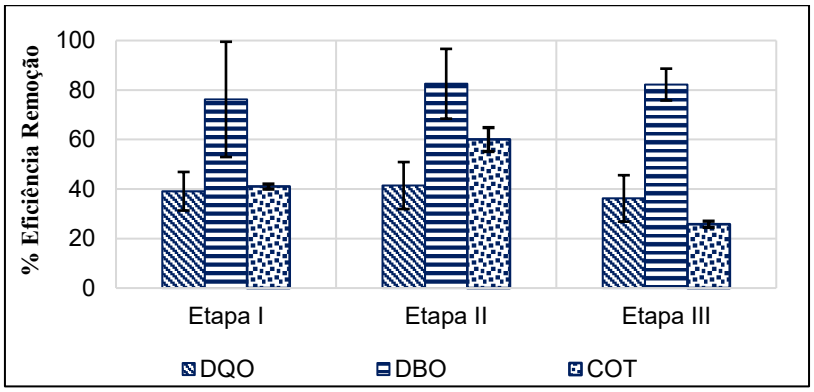


Figura 2 – Remoção média de matéria orgânica em relação a DQO, DBO e COT.
Fonte: Autoria própria (2026)

Em uma perspectiva mais ampla, Hubbe et al. (2016) e Kamali e Khodaparast (2015), reportam que sistemas biológicos para efluentes de celulose raramente excedem 50% de eficiência na remoção de DQO, devido à alta carga de compostos refratários. A faixa de 40-60% também foi corroborada por Nunes et al. (2021), que operaram uma LAF com carga orgânica volumétrica de 0,2 kg $DQO \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ (idêntica à utilizada nesta pesquisa) e obtiveram resultados similares.

Enquanto a DQO engloba a carga orgânica total, a DBO_5 é o parâmetro fundamental para avaliar a eficiência do metabolismo aeróbio na estabilização da matéria orgânica prontamente biodegradável (CABRERA, 2017). No sistema de LAF analisado, a eficiência média de remoção de DBO_5 manteve-se em 80% de forma consistente em todas as etapas experimentais.

A manutenção de uma remoção de 80%, mesmo com a redução das dosagens de Nitrogênio e Fósforo, demonstra que a fração biodegradável do efluente kraft foi satisfatoriamente oxidada pela biomassa. Esse resultado é corroborado por Cabrera (2017), que afirma que sistemas biológicos projetados para a indústria de celulose podem apresentar remoções de DBO_5 superiores a 75%. Em outros trabalhos, a remoção variou de 50 a 98% (DEWI, *et al*., 2011; PEITZ e XAVIER, 2020; SLADE, *et al*., 2004). Na Etapa II, onde foi utilizada uma razão de fósforo menor que a Etapa I (C:N:P de 100:0,7:0,1 e 100:0,7:0,3 respectivamente), houve um incremento 6% na remoção da DBO_5. Slade *et al*. (2007), também observou o aumento na remoção de DBO_5 em aproximadamente 8%, em efluente de celulose com limitação de fósforo e tratamento em lagoa aerada.

Diferente da DQO, que mede a necessidade de oxigênio para a oxidação química, o COT é um indicador mais preciso da mineralização da matéria orgânica. No sistema de LAF analisado, a eficiência de remoção de COT apresentou na Etapa I a média de 41% da COT, 60% na Etapa II e na Etapa III, a remoção foi de 26%.

A média de remoção entre as três etapas de COT foi de 42%, valor muito próximo à média obtida para a DQO (40%), o que confirma a correlação direta entre esses dois parâmetros no efluente Kraft e indica que a fração de carbono removida corresponde majoritariamente à parcela biodegradável da carga orgânica total.

A eficiência de remoção de COT alcançada nesta pesquisa está em estreita consonância com outros estudos de sistemas biológicos tratando efluentes de celulose, como Nunes (2021) que obteve uma média de 49% de remoção, com C:N:P de 100:0,5:0,1; Lewis et al. (2011) teve remoções em torno de 37% de COT utilizando uma razão de C:N:P de 100:1,3:0,3. Hubbe et al. (2016) afirma que a remoção de COT em sistemas biológicos tratando efluente kraft dificilmente ultrapassa 50% sem a presença de etapas avançadas, devido à alta concentração de compostos carbonáceos complexos derivados da degradação da madeira.

Um ponto de destaque é que a redução drástica das dosagens de Nitrogênio e Fósforo (chegando à relação 100:0,5:0,1 na Etapa III) não impactou a capacidade da biomassa heterotrófica em mineralizar o carbono orgânico disponível. O residual de COT em todas as etapas sugere que, embora o sistema seja altamente eficiente na remoção de DBO_5 (80%), ele parece não ser capaz de degradar grupos recalcitrantes derivados de lignina e que conferem cor ao efluente.

Remoção de cor e compostos fenólicos totais

A remoção da cor é, historicamente, um dos maiores desafios técnicos no tratamento biológico de efluentes Kraft, pois está diretamente associada à presença de lignina e seus derivados poliméricos, que são altamente recalcitrantes (MACHADO et al., 2022).

Vários autores relataram em suas pesquisas a formação de cor em efluentes tratados por sistemas de lagoa aerada facultativa (MILESTONE, et al., 2004; LEWIS, et al., 2011 e 2018; PEITZ e XAVIER, 2019). Segundo Lewis, et al. (2011), durante o tratamento, a matéria orgânica recalcitrante pode ser modificada para unidades cromóforas que não são mineralizadas e, consequentemente, leva a um aumento no parâmetro cor, o que corrobora com a baixa remoção de COT e dos compostos específicos.

Conforme Kamali e Khodaparast (2015), tratamentos biológicos geralmente não apresentam altas eficiências para remoção de cor de efluentes de indústria de celulose e papel. Estudos recentes indicam que a coloração está associada à presença de compostos orgânicos complexos e de alto peso molecular, oriundos da degradação da lignina, que podem sofrer biotransformações parciais em sistemas biológicos, especialmente sob condições anóxicas, contribuindo para a persistência da cor (PATEL et al., 2021; AMACOSTA et al., 2024). A Figura 3 demonstra a remoção média da cor nas três etapas da pesquisa:

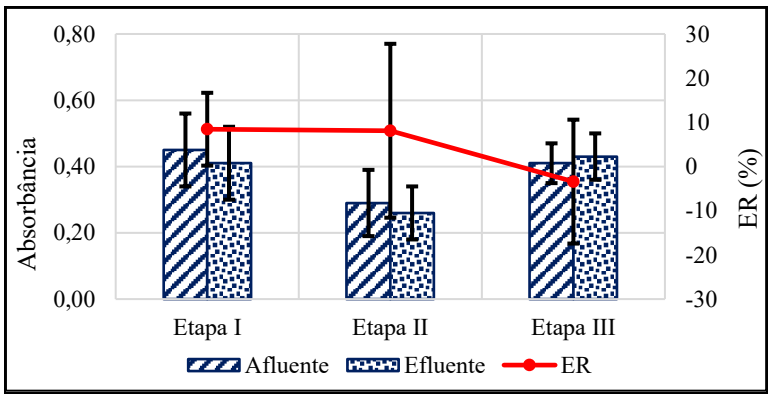


Figura 3 – Remoção média de cor. Fonte: Autoria própria (2026)

Diferente dos parâmetros de matéria orgânica, a eficiência na remoção de cor na LAF foi limitada. Os resultados demonstraram uma eficiência de apenas 8% nas Etapas I e II, reduzindo-se a 0% na Etapa III. Essa queda para zero na Etapa III é um achado importante, pois coincide com a redução da dosagem de N (relação 100:0,5:0,1). Isso sugere que, embora as bactérias heterotróficas consigam estabilizar a DBO_5 com baixo N, os microrganismos e sistemas enzimáticos mais especializados responsáveis pela clivagem de cromóforos são sensíveis à limitação deste nutriente (KUMAR et al., 2021; MADAN, et al., 2018).

Um aspecto discutido por Nunes (2021) é que, em sistemas biológicos, pode ocorrer aumento da cor após o tratamento. Esse fenômeno está associado à biotransformação de compostos derivados da lignina, que podem sofrer repolimerização ou oxidação parcial, resultando na intensificação da coloração do efluente (NUNES et al., 2021; MILESTONE et al., 2004).

A presença de compostos fenólicos no efluente Kraft decorre majoritariamente da degradação térmica e química da lignina durante o processo de polpação (HAQ, et al., 2020; KUMAR & VERMA, 2023). Com relação a eficiência da remoção dos compostos fenólicos totais (CFT), na Figura 4 são apresentados os dados obtidos durante o tratamento biológico.

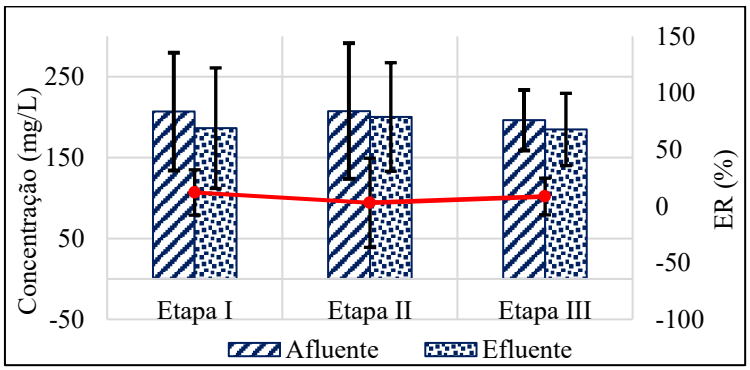


Figura 4 – Remoção média de compostos fenólicos totais. Fonte: Autoria própria (2026)

No sistema LAF monitorado, a eficiência de remoção de compostos fenólicos totais foi de aproximadamente 7% ao longo de todas as etapas operacionais, inclusive com a geração de fenol em alguns períodos. A baixa eficiência de remoção demonstra que o sistema biológico, embora eficaz na redução da carga orgânica biodegradável, apresenta limitações na clivagem de estruturas aromáticas estáveis (ESMAEELI et al., 2023). Isso sugere que a degradação de compostos fenólicos na LAF não é limitada apenas pela disponibilidade de Nitrogênio ou Fósforo, mas sim pela ausência de microrganismos especialistas ou de condições enzimáticas favoráveis para romper os anéis aromáticos (COELHO et al., 2024; NUNES, 2021).

Conforme estudo realizados por Nunes (2021), foram observados comportamentos similares em sistemas de lagoas aeradas, destacando que a concentração de fenóis pode inclusive aumentar durante o tratamento. Isso ocorre devido à biotransformação da lignina de alto peso molecular, que ao ser parcialmente fragmentada pela atividade microbiana, libera novas

unidades fenólicas de menor peso molecular no meio, mantendo a concentração final praticamente inalterada ou até superior à inicial (MACHADO et al., 2022; NUNES, 2021).

A persistência de 93% dos compostos fenólicos após a LAF é um indicativo crítico de que o tratamento biológico isolado não é suficiente para a remoção da carga tóxica do efluente. Segundo Bender et al. (2019), compostos fenólicos e a cor estão intrinsecamente ligados, a baixa remoção de um geralmente reflete a baixa remoção do outro.

Análises estatísticas dos resultados

Com base nos dados apresentados nas figuras anteriores, foram determinadas as médias de remoção no tratamento do efluente kraft por meio do sistema LAF, considerando diferentes dosagens de nutrientes. Essa avaliação tem como objetivo comparar o desempenho do sistema na remoção de parâmetros físico-químicos entre as três condições operacionais adotadas. Para isso foi aplicado teste ANOVA – Tukey, após verificação da normalidade dos dados e seus resultados estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação ANOVA – Tukey do sistema LAF

	DQO	DBO	COT	CFT	COR
Etapa I – 100:0,7:0,3	**39** ^{a}	**77** ^{a}	**41** ^{a}	**12** ^{a}	**8** ^{a}
Etapa II – 100:0,7:0,1	**41** ^{a}	**82** ^{a}	**60** ^{b}	**3** ^{a}	**8** ^{a}
Etapa III– 100:0,5:0,1	**36** ^{a}	**82** ^{a}	**26** ^{c}	**8** ^{a}	***-3** ^{a}

*** Aumento de cor. Fonte: Autoria própria (2026)**

De acordo com o resultado do Teste de Tukey, os ensaios que apresentam letras iguais sobrescritas, são referentes as amostras do mesmo grupo sem diferença entre as médias ($p>0,05$), as letras diferentes, representam grupos com médias diferentes ($p<0,05$).

Conforme os dados apresentados na Tabela 2, conclui-se que, entre as Etapas I, II e III somente nas médias de remoção do COT foram verificadas diferenças significativas. Não existem diferenças significativas entre os demais parâmetros nas três dosagens diferentes de nutrientes estudadas durante o tempo de operação do sistema LAF. Assim, a remoção de COT se destacou entre as maiores remoções nas diferentes etapas.

Os resultados sugerem que o sistema LAF possui uma "assinatura de remoção" característica para o efluente kraft: alta eficiência para DBO_5, moderada para DQO e COT e baixa para cor/fenol. A análise estatística confirma que a Etapa II (100:0,7:0,1) representa a condição de operação mais eficiente, pois maximiza a remoção de carbono e mantém a estabilização da carga orgânica global com o menor uso de insumos químicos.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstraram que a lagoa aerada facultativa apresentou elevada eficiência na remoção da fração biodegradável do efluente kraft, com remoções médias de DBO_5 superiores a 75% em todas as condições operacionais avaliadas, evidenciando a robustez do sistema mesmo sob diferentes regimes de dosagem de nutrientes.

Entretanto, a remoção média de DQO e COT manteve-se limitada, em torno de 40%, assim como a remoção de cor e fenóis, confirmando a persistência de compostos recalcitrantes e as limitações do tratamento biológico isolado na degradação de estruturas lignínicas complexas.

Dentre as condições avaliadas, a relação C:N:P de 100:0,7:0,1 destacou-se como a mais adequada, por proporcionar melhor desempenho global na remoção dos parâmetros analisados, especialmente da matéria orgânica biodegradável, além de manter estabilidade operacional do sistema. Esse resultado é consistente com estudos prévios, que também apontam essa relação como a mais eficiente, inclusive com ganhos na remoção de COT e redução de impactos associados ao excesso de nutrientes.

A redução da dosagem de fósforo mostrou-se viável sob o ponto de vista técnico, operacional e ambiental, contribuindo inclusive para a mitigação do potencial de eutrofização. Por outro lado, a redução simultânea de nitrogênio e fósforo impactou negativamente o desempenho do sistema, evidenciando que o equilíbrio nutricional é determinante para a eficiência e estabilidade do processo.

Adicionalmente, os resultados indicam que é possível operar o sistema com menores dosagens de nutrientes do que aquelas tradicionalmente empregadas pela indústria, com potencial redução de custos operacionais, sem comprometer a eficiência na remoção da matéria orgânica.

Dessa forma, conclui-se que a otimização da relação C:N:P, com destaque para 100:0,7:0,1, constitui uma estratégia eficaz para o aprimoramento de lagoas aeradas facultativas no tratamento de efluentes de celulose kraft. Contudo, para a remoção de compostos recalcitrantes, recomenda-se a integração com processos de tratamento avançado, visando maior eficiência global e melhor desempenho ambiental.

Agradecimentos

As autoras agradecem o apoio: da Fundação Araucária CP 17/2023 e CP 23/2023; da COCELPA ACT 04/2020; e do laboratório multiusuário da UTFPR - LAMAQ.

Referências Bibliográficas

AHMED, M. E.; MYDLARCZYK, A; AL-HADDAD, A. Efficiency limiting factors of petrochemical wastewater treatment using hybrid biological reactors. **Journal of Environmental Engineering Reactors and Scape Management**, v. 30, n. 3, p.

380–392, 2022.

AMACOSTA, J.; POZNYAK, T.; SILES, S.; CHAIREZ, I. Sequential Treatment by Ozonation and Biodegradation of Pulp and Paper Industry Wastewater to Eliminate Organic Contaminants. **Toxics**, v. 12, n. 138, p. 1-18, 2024.

AMMARY, B. Y. Nutrients requirements in biological industrial wastewater treatment. **African Journal of Biotechnology**, v. 3, n. 4, p. 236-238, 2004.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater,** 24 ed. Washington: American Public Health Association, 2023.

BENDER, A. F.; SOUZA., J. B.; VIDAL, C. M. S. Tecnologias avançadas de tratamento visando à remoção de cor e fenol de efluente de indústria de celulose e papel. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 571-582, 2019.

CABRERA, M. N. Pulp mill wastewater: characteristics and treatment. Biological Wastewater Treatment and Resource Recovery, **IntechOpen**, v. 2, p. 119-139, 2017.

CHAMORRO S.; XAVIER C. R.; HERNÁNDEZ V.; BECERRA J.; VIDAL, G. Aerobic removal of stigmasterol contained in kraft mill effluents. **Electronic Journal of Biotechnology**. v. 12, n. 2, p. 1 – 7, 2009.

CHAUDHARY, A.; BANO, S.; CHANDRA, R. Deciphering the microbial and chemical complexity of kraft paper industry sludge through metagenomic and toxicological evaluation. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 205, 2025.

COELHO, B. D.; CARVALHO, J. P.; COUTO, G. H.; ALMEIDA, J. D.; CELINSKI, F.; XAVIER, C. R. Bioaugmentation with *Advenella kashmirensis* for the treatment of a kraft pulp effluent by aerated lagoon. **Ambiente & Água**, v. 19, p. 1-13, 2024.

DEWI, R.; VAN LEEUWEN, J. A.; EVERSON, A.; NOTHROP, S. C.; CHOW, C. K. W. The effects of nutrient limitation (nitrogen and phosphorus) on BOD removal from post-coagulated Pinus radiata sulfite pulp and paper mill wastewater in a baffled aerated stabilization basin–laboratory pilot scale study. **Water Science & Technology**, v. 63, ed. 3, p. 491-501, 2011.

ESMAEELI, A.; SARRAFZADEH, M.; ZEIGHAMI, S.; KALANTAR, M.; BARIKI, S. G.; FALLAHI, A.; ASGHARNEJAD, H.; GHAFFARI, S. B. A Comprehensive Review on Pulp and Paper Industries Wastewater Treatment Advances. **Industrial & Engineering Chemistry Research,** v. 62, n. 21, p. 8119-8145, 2023.

HAQ, I.; MAZUMDER, P.; KALAMDHAD, A. S. Recent advances in removal of lignin from paper industry wastewater and its industrial applications: a review. **Bioresource Technology,** v. 312, p. 1-11, 2020.

HIDD, C. et al. Toxic Effects of Liquors Generated During Kraft Pulp Production Process on Aerobic Biomass and Growth of *Selenastrum capricornutum*. **Toxicity Assessment**, v. 17, n. 10:4494, p. 1-12, 2025.

HUBBE, M. A.; METTS, J. R.; HERMOSILLA, D.; BLANCO, M. A.; YERUSHALMI, L.; HAGHIGHAT, F.; LINDHOLM-LEHTO, P.; KHODAPARAST, Z.; KAMALI, M.; ELLIOTT, A. Wastewater treatment and reclamation: a review of pulp and paper industry practices and opportunities. **Bio Resources.** v. 11, n. 3, p. 7953 – 8091. 2016.

HUBBE, M. A. Energy efficiency challenges in pulp and paper manufacturing: A tutorial review. **BioResources**, v. 16, n. 4, p. 8567-8639, 2021.

JAGABA, A. H.; KUTTY, S. R. M.; NAUSHAD, M.; LAWAL, I. M.; NOOR, A; AFFAM, A. C.; BIRNIWA, A. H.; ABUBAKAR, S.; SOJA, U. B.;ABIOYE, K. J.; BATHULA, C. Removal of nutrients from pulp and paper biorefinery effluent: Operation, kinetic modelling and optimization by response surface methodology. **Environmental Research,** v. 214, 2022.

KAMALI, M.; ALAVI-BORAZJANI, S. A.; KHODAPARAST, Z.; MOHAMMADREZA KHALAJ, M.; JAHANSHAHI, A.; COSTA, E.; CAPELA, I. Additive and additive-free treatment technologies for pulp and paper mill effluents: advances, challenges and opportunities. **Water Resources and Industry**, v. 21, p. 1-22, 2019.

KUMAR, V.; VERMA, P. A critical review on environmental risk and toxic hazards of refractory pollutants discharged in chlorolignin waste of pulp and paper mills and their remediation approaches for environmental safety. **Environmental Research**, v. 236, 2023.

KUMAR, A; SRIVASTAVA, N. K.; GERA, P. Removal of color from pulp and paper mill wastewater methods and techniques-a review. **Journal of Environmental Management**, v. 298, 2021.

LEWIS, R.; VAN LEEUWEN, J. A.; SMERNIK , R. J.; CHOW, C. W. K.; EVERSON A.; NOTHROP, S. C.; BEECHAM, S. Changes in the organic character of post-coagulated Pinus radiata sulfite pulp mill wastewater under aerated stabilization basin treatment—A laboratory scale study, **Chemical Engineering Journal,** v.175, p. 160-168, 2011.

LEWIS, R.; COHEN, J.; AWAD, J.; BURGER, H.; MARZOUK, J.; BURCH, G.; LEWIS, D. M.; VAN LEEUWEN, J. A. Study of the impacts of process changes of a pulp and paper mill on aerated stabilization basin (ASB) performance, **Chemosphere,** v. 211, p. 767-774, 2018.

MACHADO, E. P.; XAVIER; C. R.; AZEVEDO, J. C. R. Avanços na caracterização de compostos específicos encontrados no efluente de celulose kraft pós-tratamento em sistemas aerados. In: **SUSTENTARE: Workshop Internacional Sobre Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos (WIPIS)**, São Carlos, SP, 2022.

MADAN, S.; SACHAN, P.; SINGH, U. A review on bioremediation of pulp and paper mill effluent – An alternative to conventional remedial technologies. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 10, n. 1, p. 367 – 374, 2018.

METCALF & EDDY, Inc.; George Tchobanoglous; Franklin L. Burton; H. David Stensel. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MILESTONE, C.B.; FULTHORPE, R.R.; STUTHRIDGE, T.R. The formation of color during biological treatment of pulp and paper wastewater. **Water Science Technology**, v. 50, n. 3, p. 87-94, 2004.

NUNES, J. V., 2021, **Assessment of kraft effluent treatment by bioaugmentation process with isolated bacteria from aerated facultative lagoon to remove specific compounds.** 110 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

PATEL, K..; PATEL, N.; VAGHAMSHI; N.; SHAH, K.; DUGGIRALA, S. M.; DUDHAGARA, P. Trends and strategies in the effluent treatment of pulp and paper industries: A review highlighting reactor options. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 2, p. 1-10, 2021.

PEITZ, C.; XAVIER. C. R. Evaluation of aerated lagoon modified with spongy support medium treating kraft pulp mill effluent. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.** v. 92, p. 70-79, 2019.

PEITZ, C.; XAVIER. C. R. Moving bed biofilm reactor for treatment of Kraft pulp effluent with high organic load rate. **Revista Ambiente & Água.** v. 15, n. 4, p. 110, 2020.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of pulp and paper mill wastewater – a review. **The Science of the Total Environment**. v. 333, p. 37-58, 2004.

SLADE, A.H.; ELLIS, R. J.; HEUVEL, M. V.; STUTHRIDGE, T. R. Nutrient minimization in the pulp and paper industry: an overview. **Water Science and Technology**. v. 50, n. 3, p. 111–122, 2004.

SLADE, A.H.; MACLEAN, P. H.; VAN OTTERDIJK, F. F. H. The impact of cleaner processing on nutrient availability in the bleached kraft industry. **Water Science and Technology**. v. 55, n. 6, p. 165-172, 2007.

SOUSA, A.M.; PINTO, I. S. S.; MACHADO, L.; GANDO-FERREIRA, L.; QUINA, L.J. Sustainability of kraft pulp mills: Bleaching technologies and sequences with reduced water use, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 125, p. 58-70, 2023.

VIDAL, G.; GONZÁLEZ, Y; PIÑA, B., JARPA, M.; GÓMEZ, A. Minimization of environmental impact of kraft pulp mill effluents: current practices and future perspectives towards sustainability. **Sustainability**, v. 13, p. 1 - 15, 2021.

VILLAMAR, C. A.; JARPA, M.; DECAP, J.; VIDAL, G. Aerobic moving bed bioreactor performance: a comparative study of removal efficiencies of kraft mill effluents from Pinus radiata and Eucalyptus globulus as raw material. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 3, p. 507–514, 2009.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

COBRANÇA POR CARGA POLUIDORA NO SANEAMENTO PAULISTA: JUDICIALIZAÇÃO E DESAFIOS REGULATÓRIOS DO FATOR K

1 Itamar Aparecido de Oliveira, 2 Elâine Sandovette, 3 Paula Fantinatti Bueno
1 Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo, e-mail: itaoliveira@sp.gov.br; 2 Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo, e-mail: esandovette@sp.gov.br; 3 Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo, e-mail: pfbueno@sp.gov.br

Palavras-chave: Fator K; carga poluidora; regulação do saneamento.

Resumo

A cobrança de valor adicional na tarifa de esgotamento sanitário de usuários não residenciais em razão de lançamento de carga poluidora em concentrações maiores do que aquelas que caracterizam o efluente doméstico se constitui num instrumento econômico para impedir que usuários residenciais subsidiem, por meio da tarifa de esgoto, os custos associados a processos produtivos poluentes. Esse instrumento converge com o princípio do poluidor-pagador, no qual o agente poluidor deve suportar os custos das medidas de prevenção e controle da poluição como forma de garantir que o meio ambiente não seja degradado, conforme definido pela OCDE na década de 1970. No Brasil, esse princípio se fez constar na Política Nacional de Meio Ambiente (Lei 6.938/1981) e posteriormente, de forma preceitual na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/1997), bem como no Marco Nacional do Saneamento (Lei nº 11.445/2007). No estado de São Paulo, especificamente para os locais com prestação de serviço da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), o princípio surge no Decreto 41.446/1996 ao permitir que preços referentes a coleta e tratamento dos esgotos sejam fixados em razão da carga poluidora que caracteriza o efluente lançado na rede coletora ou por transporte veicular. A aplicação desse preceito pela Sabesp é realizada por meio dos Fatores K1 e K2, coeficientes de multiplicação aplicados ao faturamento de usuários cujos efluentes apresentam maior carga poluidora em relação ao esgoto doméstico. Não obstante a existência de base jurídica sólida para a diferenciação tarifária, a aplicação do Fator K tem sido objeto de controvérsia judicial recorrente em solo paulista, com decisões favoráveis para os usuários litigantes, pois, embora o judiciário não questione a aplicação do princípio do poluidor-pagador no saneamento, compreende que a prática procedimental atualmente utilizada não permite a adequada caracterização do Fator K. Este trabalho analisa, sob perspectiva jurídico-regulatória, em que medida a jurisprudência paulista evidencia insuficiência normativa e procedimental na disciplina da cobrança por carga poluidora no saneamento e as anomalias tarifárias dela decorrentes. A metodologia adotada consiste em análise qualitativa de normas, documentos regulatórios e decisões judiciais. Os resultados indicam que a controvérsia judicial não decorre da impossibilidade abstrata da cobrança, mas da insuficiência de densidade normativa quanto à metodologia técnica de caracterização dos efluentes e ao procedimento administrativo de enquadramento dos usuários.

Introdução

A cobrança de valor adicional na tarifa de usuários que lançam seu efluentes com elevada carga poluidora no sistema público de coleta e tratamento constitui-se num instrumento de regulação econômica que objetiva à internalização de custos associados à geração de poluentes decorrentes de processos produtivos ou comerciais. A inexistência desse instrumento poderia ocasionar uma anomalia tarifária, por meio da qual os usuários residenciais de um determinado sistema de esgotamento e tratamento de esgotos subsidiassem, por meio da tarifa do serviço, os usuários comerciais e industriais, dando a esses vantagem econômica de mercado ao reduzir os custos de um processo ambientalmente sustentável e eliminando incentivos a melhoria de seus fluxos produtivos e/ou comerciais.

Como instrumento, o conceito de poluidor-pagador foi definido pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) na década de 1970 por meio de dois documentos basilares. Em um primeiro relatório sobre o tema, definiu-se o princípio da seguinte forma:

> O princípio a ser utilizado para a alocação dos custos das medidas de prevenção e controle da poluição, visando incentivar o uso racional dos recursos ambientais escassos e evitar distorções no comércio e investimento internacionais, é o chamado "Princípio do Poluidor-Pagador". Este princípio significa que o poluidor deve arcar com as despesas da implementação das medidas acima mencionadas, decididas pelas autoridades públicas, para garantir que o meio ambiente esteja em um estado aceitável. Em outras palavras, o custo dessas medidas deve ser refletido no custo dos bens e serviços que causam poluição na produção e/ou no consumo. Tais medidas não devem ser acompanhadas de subsídios que criem distorções significativas no comércio e investimento internacionais. (OCDE, 1972, p. 4, tradução nossa)

Posteriormente, em 1975 a OCDE ampliou a discussão sobre o princípio no relatório *The Polluter Pays Principle - Definition, Analysis, Implementation* e, ainda que nas décadas posteriores tenha passado por muitas discussões e ampliações no que se refere à natureza dos custos que deveriam ser considerados como pertencentes ao processo industrial/comercial, a definição dada na década de 1970 continua válida para a discussão aqui enfrentada. Quanto à aplicação do princípio no setor de saneamento básico, em especial para o esgotamento e tratamento de efluentes, a OCDE realizou um extenso levantamento nos países partícipes da organização em 2010, concluindo que

> Mais países relataram o uso de taxas de poluição do que taxas de captação. As taxas de poluição podem estar vinculadas a diferentes características do poluidor (por exemplo, seu setor, processos), dos efluentes (volume ou concentração de poluentes) ou do corpo hídrico receptor. Na Bélgica, as taxas de poluição são baseadas na concentração medida ou em coeficientes de conversão para matéria orgânica e sólidos em suspensão, metais pesados, nutrientes (N e P) e água de resfriamento. No México, as taxas estão vinculadas à quantidade e à intensidade das descargas (em excesso dos níveis permitidos de demanda bioquímica de oxigênio [DBO], demanda química de oxigênio [DQO] e sólidos totais em suspensão [STS]) e à capacidade de suporte dos corpos hídricos receptores, que é diferenciada para descargas de águas residuais industriais e municipais. (OCDE, 2010, p. 43, tradução nossa)

No Brasil, ainda que o Código das Águas (Decreto 24.643/1934) tenha se referido a ideia de responsabilização por práticas que causassem a poluição dos corpos hídricos, conforme demonstrado por Graziera (2023), somente na Política Nacional de Meio Ambiente (Lei 6.938/1981) ocorreu a internalização do preceito no ordenamento jurídico brasileiro, definindo o termo poluidor e a ele impondo efeitos legais:

> Art 4º - A Política Nacional do Meio Ambiente visará:
> VII - à imposição, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados e, ao usuário, da contribuição pela utilização de recursos ambientais com fins econômicos.

No âmbito da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/1997) e do Marco Nacional do Saneamento Básico (Lei 11.445/2007), ambos os dispositivos utilizam o conceito de forma preceitual, isto é, ainda que não seja citado explicitamente o princípio, o mesmo é guia para o espírito das normas. No caso da Política Nacional de Recursos Hídricos, ao fixar que os valores pelo uso do recurso considerarão volume de efluentes lançados pelo outorgado

> Art. 21. Na fixação dos valores a serem cobrados pelo uso dos recursos hídricos devem ser observados, dentre outros:
> II - nos lançamentos de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, o volume lançado e seu regime de variação e as características físico-químicas, biológicas e de toxidade do afluente.

Já no Marco Nacional do Saneamento Básico, entre os princípios tarifários previstos na lei destacam-se: (i) modicidade tarifária, (ii) recuperação dos custos eficientes de prestação e (iii) transparência na composição das tarifas. Esse conjunto de princípios cria espaço para instrumentos como a cobrança por carga poluidora ao permitir a interpretação de que usuários que geram maior custo devem pagar proporcionalmente mais, evitando que os custos adicionais sejam distribuídos entre todos os consumidores.

No âmbito do estado de São Paulo, o conceito de poluidor-pagador foi elemento fundamental no Decreto nº 41.446/1996, que dispôs sobre o regulamento do sistema tarifário dos serviços prestados pela companhia. No artigo 11 do decreto foi especificado que a tarifação dos serviços relacionados ao tratamento de esgoto consideraria a carga poluidora, toxidade e vazão dos efluentes lançados na rede coletora, da seguinte forma: **"**Os serviços de monitoramento, coleta e tratamento dos esgotos terão seus preços fixados na forma prevista no artigo 28 do Regulamento, em função da carga poluidora, toxidade e vazão dos despejos."

Para a aplicação da relação prevista no decreto, a Sabesp criou um fator de correção tarifário, chamado Fator K, cuja aplicação histórica incidiu nas tarifas de usuários não residenciais. Atualmente a concessionária optou pela aplicação somente em grandes usuários, compreendidos conforme definição dada pela Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo (ARSESP) no artigo 2º da Deliberação ARSESP nº 818/2018, ou seja "consideram-se como grandes usuários as unidades usuárias das categorias não residenciais, com volume de água e/ou esgoto, de forma contínua, igual ou superior a 100 m³/mês".

No âmbito regulatório, a Deliberação ARSESP nº 1.150/2021 reconheceu a continuidade da cobrança do Fator K segundo comunicados operacionais da concessionária. Essa deliberação também determinou que a concessionária mantivesse registro contábil específico das receitas associadas ao mecanismo, permitindo maior transparência na gestão dessas receitas. Posteriormente, com a celebração do Contrato de Concessão nº 01/2024 da Unidade Regional de Água e Esgoto Sudeste, o modelo tarifário da prestação dos serviços passou a integrar um conjunto mais amplo de instrumentos regulatórios voltados à sustentabilidade econômico-financeira da concessão. Nesse contexto, a existência de mecanismos tarifários associados à carga poluidora assume relevância adicional, na medida em que contribui para a modicidade tarifária da prestação.

Conforme Comunicado nº 02/2025 (SABESP, 2025), o Fator K aplicado pela Sabesp para usuários que lançam na rede coletora (01) ou cujo efluente seja entregue por transporte veicular (02), possuem as seguintes equações, respectivamente:

$$CM = P \times V \times K1 \quad (01)$$
$$C = 0{,}50 \times P \times V \times K2 \quad (02)$$

Onde: *CM* a conta mensal, em reais; *C* o valor a cobrar em reais; *P* o preço por metro cúbico (R$/m³), conforme estrutura tarifária vigente para a categoria do usuário (comercial, industrial ou atrelados à prestação de serviços); *V* o volume de esgoto lançado, considerando o maior valor entre o volume de água fornecida e o volume efetivamente medido;

Por sua vez os coeficientes K1 e K2 são calculados de acordo com as equações 03 e 04, respectivamente:

$$K1 = 0{,}63 + 0{,}19 \times (DQO / 450) + 0{,}18 \times (SST / 300) \quad (03)$$
$$K2 = 0{,}26 + 0{,}38 \times (DQO / 450) + 0{,}36 \times (SST / 300) \quad (04)$$

Onde: *DQO* a Demanda Química de Oxigênio, concentração mínima de 450 mg/L, obtida por análise do esgoto lançado, considerando os parâmetros mínimos exigidos para aplicação do Fator K; *SST* os Sólidos em Suspensão Totais: concentração mínima de 300 mg/L, igualmente obtida por análise representativa do esgoto lançado.

Contudo, tais equações para os coeficientes somente são aplicadas para usuários cuja atividade econômica está cadastrada na Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), para a qual o Comunicado associa valores prévios para cada atividade, conforme tabela 01

Ramos de Atividade	K1
Fabricação de produtos minerais não metálicos	1,15
Metalurgia	1,03
Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos. Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equi- pamentos	1,10
Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	1,14
Fabricação de máquinas e equipamentos e outros equi- pamentos de transporte	1,21
Fabricação de madeira	1,02
Fabricação de móveis	1,33

Tabela 01: Exemplo de coeficientes por CNAE.
Fonte: SABESP (2025)

Os valores previamente definidos por atividade econômica foram baseados em laudos de análise realizados para uma certa amostragem de representantes de cada ramo de atividade econômica, resultando nos valores observados na tabela. Contudo, ao precificar o Fator K individualmente para o usuário baseando-se em valores centrais amostrados (médias e medianas), o prestador gerou questionamentos de usuários sobre a validade de se utilizar resultados amostrados como referência para cobranças individuais de um fator cujo princípio se alinha ao pagador-poluidor, isto é, o poluidor deve pagar individual e proporcionalmente pelos danos ambientais por ele causados. O resultado desses questionamentos foi um intenso processo de judicialização movido por usuários insatisfeitos com a metodologia da cobrança.

Material e Métodos

A presente pesquisa adota abordagem qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, com foco na análise jurídico-regulatória da cobrança por carga poluidora no âmbito dos serviços de esgotamento sanitário prestados pela Sabesp no Estado de São Paulo. O delineamento metodológico foi estruturado a partir de três encaminhamentos analíticos complementares: (i) análise normativa e regulatória; (ii) análise técnico-operacional do instrumento tarifário denominado Fator K; e (iii) análise jurisprudencial de decisões judiciais relacionadas à sua aplicação.

No primeiro procedeu-se ao levantamento e exame sistemático do arcabouço normativo aplicável ao tema, incluindo diplomas legais federais e estaduais, bem como atos regulatórios expedidos pela Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo (ARSESP). Foram analisados, em especial, a Lei nº 6.938/1981, a Lei nº 9.433/1997, a Lei nº 11.445/2007, o Decreto Estadual nº 41.446/1996, a Deliberação ARSESP nº 1.150/2021 e o Contrato de Concessão nº 01/2024 da Unidade Regional de Água e Esgoto Sudeste. A análise buscou identificar os fundamentos jurídicos da cobrança por carga poluidora e o grau de densidade normativa conferido ao instrumento.

No segundo foi realizada análise documental dos procedimentos operacionais adotados pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, com base no Comunicado nº 02/2025. Essa etapa teve por objetivo compreender a estrutura técnica do Fator K, incluindo suas fórmulas de cálculo, parâmetros de qualidade do efluente (Demanda Química de Oxigênio – DQO e Sólidos Suspensos Totais – SST) e critérios de aplicação aos usuários. Adicionalmente, foi avaliada a coerência entre o

modelo adotado e os fundamentos técnicos da engenharia sanitária e da economia ambiental, especialmente no que se refere à internalização de custos e à individualização da carga poluidora.

No terceiro foi conduzida pesquisa jurisprudencial no âmbito do Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo (TJSP) e dos Colégios Recursais, com foco em decisões que discutem a legalidade e a forma de aplicação do Fator K. Para tanto, efetuou-se pesquisa no site do TJSP, https://esaj.tjsp.jus.br/cjsg/resultadoCompleta.do, inserindo-se no campo de consulta os termos "fator k sabesp carga poluidora", selecionando-se as caixas de filtro "2º Grau"; "Acórdãos" e ordenando os resultados por data de publicação. Observou-se um total de 1522 acórdãos como resultado dessa pesquisa, dos quais foram selecionados 33 processos por meio de amostragem aleatória, sendo escolhidos:

ii) os dois primeiros processos válidos de cada página (o site apresenta 20 processos por página) para as primeiras 10 páginas consultadas

ii) a partir da 10ª página, o primeiro processo válido a cada 5 páginas.

Com isso, foi possível amostragem aleatória estatisticamente válida, abrangendo o período de 15/05/2012 a 17/03/2026, porém com maior foco nas decisões recentes. A análise das decisões foi orientada pela técnica de análise de conteúdo, buscando identificar padrões argumentativos relacionados à ausência de comprovação técnica da carga poluidora, ao enquadramento automático por atividade econômica e à insuficiência de procedimentos administrativos de notificação e motivação.

Resultados e Discussão

O levantamento jurisprudencial realizado pode ser observado na tabela 02, sendo o processo 1001228-48.2024.8.26.0326 o que apresentou decisão mais recente (17/03/2026) e a decisão constante no processo 9234732-89.2008.8.26.0000 a mais antiga a ser pesquisada (15/05/2012).

Processo	Comarca/Foro	Data do Julgamento
1001228-48.2024.8.26.0326	Lucélia	17/03/2026
1055217-31.2025.8.26.0100	São Paulo	14/03/2026
1010788- 94.2025.8.26.0482	Presidente Prudente	11/03/2026
1016013- 95.2025.8.26.0482	Presidente Prudente	11/03/2026
1154693-76.2024.8.26.0100	São Paulo	05/03/2026
1005956-91.2023.8.26.0157	Cubatão	05/03/2026
1018084-70.2025.8.26.0482	Presidente Prudente	27/02/2026
1131816-45.2024.8.26.0100	São Paulo	27/02/2026
1000150-57.2025.8.26.0011	São Paulo	23/02/2026
1007700-05.2024.8.26.0637	Tupã	24/02/2026
1010851-77.2025.8.26.0011	São Paulo	19/02/2026
1003359-38.2025.8.26.0624	Tatuí	18/02/2026
1000853-36.2025.8.26.0480	Presidente Bernardes	09/02/2026
1048037-61.2025.8.26.0100	São Paulo	06/02/2026
1000638-04.2023.8.26.0004	São Paulo	03/02/2026
1005822-25.2024.8.26.0482	Presidente Bernardes	03/02/2026
1009473-86.2025.8.26.0011	São Paulo	19/12/2025
1015546-11.2024.8.26.0011	São Paulo	15/12/2025
2244293-66.2025.8.26.0000	Tatuí	26/11/2025
1000152-75.2025.8.26.0383	Nhandeara	25/11/2025
1000522-05.2025.8.26.0270	Itapeva	14/10/2025
1005920-65.2024.8.26.0011	São Paulo	04/09/2025
1008156-32.2024.8.26.0482	Presidente Prudente	31/07/2025
1000531-89.2025.8.26.0003	São Paulo	24/06/2025
1081155-33.2022.8.26.0100	São Paulo	12/05/2025
1002295-60.2024.8.26.0322	Lins	24/03/2025
1071429-64.2024.8.26.0100	São Paulo	29/01/2025
1099523-90.2022.8.26.0100	São Paulo	18/10/2024
1001971-43.2023.8.26.0601	Socorro	24/07/2025
1005744-50.2023.8.26.0099	Bragança Paulista	05/02/2024
1004801-88.2019.8.26.0126	Caraguatatuba	12/01/2023
1039373-90.2015.8.26.0100	São Paulo	21/06/2017
9234732-89.2008.8.26.0000	Santos	15/05/2012

Tabela 02: Quadro analítico jurisprudencial.
Fonte: autoria própria

O município de São Paulo, por meio de suas várias comarcas, foi responsável por aproximadamente 45% de todos os casos amostrados, sendo seguida pelo município de Presidente Prudente com 12% dos casos. Os demais elementos amostrados pertencem a localidades diversas do estado. A análise das decisões judiciais selecionadas revela padrão decisório relativamente consistente no âmbito do Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo e dos Colégios Recursais, evidenciando que a controvérsia associada à cobrança do Fator K não se relaciona à incompatibilidade do instrumento com o ordenamento jurídico, mas à forma de sua implementação operacional. Os julgados analisados não afastam a possibilidade de cobrança diferenciada em função da carga poluidora, reconhecendo implicitamente a aderência do mecanismo ao princípio do poluidor-pagador e à lógica de internalização de custos ambientais, convergindo, entretanto, no sentido de exigir maior rigor técnico e procedimental na caracterização da carga poluidora atribuída aos usuários, conforme possível observar em duas decisões abaixo reproduzidas

> APELAÇÃO. Prestação de serviços. Serviço de fornecimento de água e coleta de esgoto. Ação de restituição de indébito. Cobrança, pela prestadora dos serviços de coleta de esgoto, do denominado "fator K", valor superior ao comum para os usuários cujos dejetos geram maior poluição. Método de cobrança em consonância com o princípio do poluidor-pagador, nos termos do artigo 4º, inciso VII da Lei da Política Nacional do Meio Ambiente. Cobrança autorizada pelo Decreto nº 41.446/1996. Não demonstrado no caso concreto que a carga poluidora da empresa apelada justifica a aplicação do método de cobrança que inclui o "fator K" em valor mais elevado. Não realização de prévio estudo técnico. Débito inexigível. Procedência da ação mantida. Sentença mantida. RECURSO NÃO PROVIDO (Apelação Cível nº 1001971-43.2023.8.26.0601, Voto nº 07947)

> Não desconheço que, no Estado de São Paulo, com atualizações, a Lei nº 997/1976 dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente, regulamentada pelo Decreto Estadual nº 8.468/1976. E é considerado poluente toda e qualquer forma de matéria ou energia lançada ou liberada nas águas (art. 3º Decreto Estadual nº 8.468/1976). […] E, nos autos, não foi reunido nenhum estudo técnico prévio, seja realizado pela concessionária, seja realizado pela CETESB, que pudesse demonstrar o efetivo potencial poluidor da atividade desenvolvida pela apelada e a realização de medição da carga poluidora respectiva, conferindo clareza e objetividade aos critérios adotados para a precificação da contraprestação devida em razão do serviço prestado. (Apelação cível nº 1055217-31.2025.8.26.0100, Voto nº SMO 52514)

A sistematização dos processos analisados permite identificar as principais fundamentações das decisões judiciais. A primeira e mais presente nas decisões refere-se à ausência de comprovação técnica individualizada da carga poluidora. Em diversos casos, o Poder Judiciário entendeu que a aplicação do Fator K não pode se basear em presunções genéricas ou em parâmetros médios associados a determinada atividade econômica, exigindo a demonstração concreta, por meio de análise laboratorial, das características do efluente efetivamente lançado pelo usuário. Tal entendimento está presente, por exemplo, nos processos nº 1055217-31.2025.8.26.0100, 1010788- 94.2025.8.26.0482 e 1000853-36.2025.8.26.0480.

> A r. sentença julgou procedente o pedido para declarar inexigível a cobrança da tarifa de Carga Poluidora Fator K, lançada na conta de consumo da autora, até que seja realizada análise prévia do impacto poluidor da unidade consumidora. […] É abusiva, portanto, a conduta da ré de proceder a cobrança com base em estimativa, sem que se avalie cada caso especificamente e se observem os padrões determinados nos dispositivos legais aplicáveis, estando correta a r. sentença, que fica mantida. (Apelação Cível nº 1000853-36.2025.8.26.0480 -Voto nº 10445)

A segunda diz respeito ao enquadramento automático de usuários com base na Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE). As decisões indicam que a utilização de parâmetros médios por setor econômico, ainda que baseada em amostragens prévias, não é suficiente para justificar a cobrança individualizada. Nesse sentido, o Judiciário tem entendido que a adoção de coeficientes padronizados por atividade viola a lógica do princípio do poluidor-pagador, uma vez que este pressupõe a responsabilização individual e proporcional à carga poluidora efetivamente gerada. Esse entendimento é observado, entre outros, nos processos nº 1018084-70.2025.8.26.0482 e 1010851-77.2025.8.26.0011.

> É insuficiente o enquadramento administrativo da atividade exercida pela autora como "poluidora não doméstica" para autorizar a cobrança relativa ao "Fator K". Impunha-se à concessionária a prévia realização de inspeção técnica para aferir eventual toxicidade excessiva dos dejetos. (Apelação Cível nº 1010851-77.2025.8.26.0011, Voto nº 30371)

Por fim, a terceira fundamentação, menos recorrente, refere-se à insuficiência de procedimentos administrativos, especialmente no que se refere à notificação prévia, motivação do ato administrativo e transparência no enquadramento tarifário. Em diversos julgados, como no processo nº 1007700-05.2024.8.26.0637, a cobrança foi considerada inexigível em razão da

ausência de comunicação adequada ao usuário ou da inexistência de justificativa técnica clara para a aplicação do Fator K, mas sempre se fazendo acompanhar pela necessidade de análise prévia da toxidade do efluente.

> Destaca-se que o Comunicado nº 03/2019, que revogou o Comunicado nº 06/1993, dispõe expressamente que a cobrança do Fator K somente pode ter início 60 dias após o recebimento, pelo usuário, de comunicação formal da SABESP, o que também não foi comprovado no caso. (Apelação Cível nº 1007700-05.2024.8.26.0637 -Voto nº 13274)

A partir dessas fundamentações, observa-se que a controvérsia judicial está fortemente associada à assimetria entre a lógica econômica do instrumento e sua operacionalização prática. Enquanto o Fator K foi concebido como mecanismo de internalização de custos baseado na carga poluidora efetiva, sua aplicação operacional, ao utilizar parâmetros médios por atividade econômica, aproxima-se de um modelo de tarifação presuntiva. Essa dissociação entre princípio e prática gera uma distorção relevante: o instrumento deixa de refletir a carga poluidora individual e passa a operar como um adicional tarifário setorial, o que fragiliza sua aderência ao princípio do poluidor-pagador e aumenta sua vulnerabilidade jurídica.

Do ponto de vista regulatório, essa situação evidencia insuficiência de densidade normativa na disciplina da cobrança. Embora o Decreto Estadual nº 41.446/1996 autorize expressamente a consideração da carga poluidora na fixação de tarifas, não há, no âmbito regulatório, definição detalhada de: (i) metodologia de caracterização da carga poluidora; (ii) critérios de amostragem e periodicidade de análises; (iii) procedimentos administrativos de enquadramento e revisão e (iv) garantias de contraditório e transparência para os usuários. A ausência desses elementos normativos transfere para a concessionária a definição de aspectos técnicos e procedimentais centrais, o que, por sua vez, amplia o espaço para questionamentos judiciais.

Sob a perspectiva econômica, a fragilidade na aplicação do Fator K pode gerar anomalias tarifárias relevantes. Ao afastar a cobrança em casos específicos, o Judiciário pode provocar a redistribuição dos custos associados ao tratamento de efluentes mais poluentes para o conjunto dos usuários do sistema, contrariando o princípio da modicidade tarifária e reintroduzindo subsídios cruzados indesejados. Além disso, a incerteza jurídica associada ao instrumento reduz sua capacidade de atuar como indutor de comportamento, enfraquecendo os incentivos para que usuários não residenciais adotem práticas de pré-tratamento ou redução de carga poluidora.

A análise comparativa com experiências internacionais, conforme evidenciado em estudos da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico, indica que instrumentos de cobrança por carga poluidora são mais eficazes quando estruturados com base em metodologias técnicas padronizadas e procedimentos administrativos transparentes. Nesses contextos, a cobrança adicional associada à carga poluidora é legitimada não apenas por sua base normativa, mas pela consistência de sua aplicação. Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que o principal desafio regulatório associado ao Fator K não reside na definição do instrumento em si, mas na necessidade de sua formalização regulatória e procedimental, de modo a alinhar sua implementação prática aos fundamentos econômicos e jurídicos que justificam sua existência.

Considerações finais

A análise desenvolvida ao longo do presente trabalho permite concluir que a controvérsia associada à cobrança por carga poluidora no Estado de São Paulo, materializada na aplicação do denominado Fator K, não decorre da incompatibilidade do instrumento com o ordenamento jurídico ou com os princípios que regem a prestação dos serviços de saneamento básico. Ao contrário, a jurisprudência analisada revela convergência no reconhecimento da legitimidade da diferenciação tarifária fundada no princípio do poluidor-pagador, bem como na necessidade de internalização dos custos adicionais decorrentes do lançamento de efluentes com maior carga poluidora.

O núcleo do problema identificado reside, portanto, na forma de implementação do instrumento, marcada por insuficiência de densidade normativa e procedimental. A ausência de critérios regulatórios claros quanto à metodologia de caracterização da carga poluidora, à realização de análises laboratoriais individualizadas, à definição de parâmetros de amostragem e à formalização de procedimentos administrativos de enquadramento e revisão tarifária tem resultado em significativa vulnerabilidade jurídica da cobrança. Nesse contexto, a utilização de parâmetros médios por atividade econômica, ainda que tecnicamente fundamentada em estudos amostrais, mostra-se insuficiente para atender às exigências de individualização inerentes ao princípio do poluidor-pagador, conforme reiteradamente apontado pelo Poder Judiciário.

Sob a perspectiva regulatória, os resultados indicam a necessidade de evolução do modelo atualmente adotado, com a construção de um arcabouço normativo mais robusto, capaz de conferir maior previsibilidade, transparência e segurança jurídica à cobrança. Tal aprimoramento deve contemplar, entre outros aspectos, a definição de metodologias padronizadas de medição e caracterização dos efluentes, a instituição de procedimentos administrativos claros e auditáveis, e a garantia de mecanismos de contraditório e ampla defesa aos usuários. Nesse sentido, o aperfeiçoamento regulatório do Fator K não apenas contribuiria para a redução da litigiosidade atualmente observada, mas também para o fortalecimento de sua função econômica, enquanto instrumento indutor de comportamento e promotor da eficiência na prestação dos serviços.

Conclui-se, portanto, que a consolidação da cobrança por carga poluidora no saneamento paulista depende menos da criação de novos instrumentos e mais do aprimoramento daqueles já existentes, por meio de sua adequada formalização normativa e procedimental, de modo a alinhar sua aplicação prática aos fundamentos jurídicos, econômicos e ambientais que justificam sua adoção.

Referências Bibliográficas

BRASIL. **Lei nº 11.445**, de 05 de janeiro de 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 16 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 16 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 08 de janeiro de 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 16 mar. 2026.

GRAZIERA, Maria Luiza Machado. **Direito de Águas**: disciplina jurídica das águas doces. São Paulo: Editora Foco, 2023.

OCDE. **Pricing Water Resources and Water and Sanitation Services**. 2010. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2010/03/pricing-water-resources-and-water-and-sanitation-services_g1ghc680/9789264083608-en.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026

OCDE**. Recommendation of the Council on OECD Legal Instruments Guiding Principles concerning International Economic Aspects of Environmental Policies**. 1972. Disponível em: https://legalinstruments.oecd.org/public/doc/4/4.en.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026.

OCDE. **The Polluter Pays Principle**. 1975. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/the-polluter-pays-principle_9789264044845-en.html. Acesso em: 16 mar. 2026.

SABESP. **Comunicado nº 02/2025**. 2025. Disponível em: https://www.sabesp.com.br/site/toq/250523_Comunicado%2002_2025%20-%20Comunicado_Fator%20K_b.pdf. Acesso em 16 mar. 2026

SÃO PAULO. Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado. **Deliberação ARSESP nº 818**, de 01 de novembro de 2018. Disponível em: https://www.arsesp.sp.gov.br/LegislacaoArquivos/ldl8182018.pdf. Acesso em: 17 mar. 2026.

SÃO PAULO. Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado. **Deliberação ARSESP nº 1.150**, de 08 de abril de 2021. Disponível em: https://www.arsesp.sp.gov.br/LegislacaoArquivos/ldl11502021.pdf. Acesso em: 17 mar. 2026.

SÃO PAULO. **Decreto nº 41.446/1996**. Disponível em: https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1996/decreto-41446-16.12.1996.html. Acesso em: 16 mar. 2026.

SÃO PAULO. Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo (Comarca de Socorro – 1º Vara). **Apelação Cível nº 1001971-43.2023.8.26.0601**. Apelante: Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp. Apelado: RW Alimentos e bebidas LTDA. Relator: Rodolfo Cesar Milano. Socorro (SP), 20 de dezembro de 2022. Voto nº 07947.

SÃO PAULO. Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo (Comarca de São Paulo – 33ª Câmara de Direito Privado). **Apelação cível nº 1055217-31.2025.8.26.0100**. Apelante: Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp. Apelado: Auto Posto São Paulo de Tupã Ltda. Relator: Juiz Sá Moreira de Oliveira. São Paulo, 14 de março de 2026. Voto nº SMO 52514.

SÃO PAULO. Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo (Comarca de Tupã). **Apelação cível nº 1007700-05.2024.8.26.0637**. Apelante: Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp. Apelado: Supermercados Kawakami Ltda. Relator: Juiz Celina Dietrich e Trigueiros Teixeira Pinto. São Paulo, 24 de fevereiro de 2026. Voto nº 13274.

SÃO PAULO. Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo (Comarca de Pinheros). **Apelação cível nº 1010851-77.2025.8.26.0011** Apelante: Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp. Apelado: Casa de Carnes Campininha. Relator: Juiz Tavares de Almeida. São Paulo, 19 de fevereiro de 2026. Voto nº 30.371.

SÃO PAULO. Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo (Comarca de Presidente Prudente). **Apelação cível nº 1000853-36.2025.8.26.0480**. Apelante: Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp. Apelado: Silene Junqueira Strasser Olivo. Relator: Desembargador Monte Serrat. São Paulo, 9 de fevereiro de 2026. Voto nº 10445.

AVANÇOS NA APLICAÇÃO DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REFINO DE PETRÓLEO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA (2021–2026)

1 Alyson Augusto Vivan, 2 Sandro José Froehner
1 Universidade Federal do Paraná, vivanalyson@gmail.com; 2 Universidade Federal do Paraná, froehner@ufpr.br

Palavras-chave: Processos Oxidativos Avançados; Refinaria de Petróleo; Tratamento de Efluentes.

Resumo

O refino de petróleo gera efluentes de alta complexidade química e toxicidade elevada, frequentemente recalcitrantes aos tratamentos biológicos convencionais. Diante da necessidade de soluções mais eficientes, os Processos Oxidativos Avançados (POA's) destacam-se pela capacidade de degradar poluentes persistentes via radicais livres. Esta revisão sistemática teve como objetivo analisar o estado da arte das aplicações de POA's no tratamento desses efluentes, com foco na produção científica entre 2021 e 2026. Utilizando a metodologia PRISMA, foram selecionados e analisados artigos de alto impacto nas bases *Scopus*, *Web of Science* e *ScienceDirect*. Os resultados indicam que o processo Foto-Fenton e a ozonização catalítica apresentam as maiores taxas de remoção de carga orgânica (DQO > 85%) e fenol, embora o custo de reagentes e a gestão de lodo químico ainda representem desafios operacionais. A tendência predominante na literatura aponta para a eficácia superior dos sistemas híbridos, onde os POA's atuam como pré-tratamento para aumentar a biodegradabilidade do efluente antes de etapas biológicas. Conclui-se que, apesar da consolidação laboratorial, a transição para a escala industrial depende da otimização energética e do desenvolvimento de catalisadores reutilizáveis, sendo a integração com fontes de energia renovável a principal perspectiva para viabilizar a sustentabilidade econômica do setor de refino.

Introdução

A indústria do refino de petróleo desempenha um papel estratégico na matriz energética global, contudo, é simultaneamente responsável pela geração de volumes expressivos de águas residuárias com elevada carga poluidora. Esses efluentes apresentam uma composição química heterogênea e complexa, caracterizada pela presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's), compostos fenólicos, nitrogênio amoniacal e metais pesados, que conferem ao resíduo uma toxicidade aguda e caráter recalcitrante (SOUZA et al., 2022).

Tradicionalmente, os processos biológicos de tratamento são aplicados devido ao seu baixo custo operacional. No entanto, a eficácia desses sistemas é frequentemente comprometida pela baixa biodegradabilidade e pela natureza inibidora dos poluentes orgânicos persistentes presentes no descarte das refinarias. Nesse cenário, os Processos Oxidativos Avançados (POA's) surgem como uma alternativa tecnológica robusta. Fundamentados na geração de radicais altamente reativos, prioritariamente o radical hidroxila (•OH), os POA's possuem potencial de oxidação superior a oxidantes convencionais, sendo capazes de promover a mineralização de contaminantes complexos ou, ao menos, transformá-los em intermediários mais simples e passíveis de tratamento biológico posterior (SILVA; OLIVEIRA, 2023).

Apesar da comprovada eficiência laboratorial, a transição para a escala industrial ainda enfrenta desafios relacionados aos custos de implementação e ao consumo de reagentes químicos. Portanto, torna-se imperativo sistematizar as evidências científicas mais recentes sobre a performance das diferentes rotas oxidativas como: Fenton, fotocatálise e ozonização; aplicadas especificamente à matriz de refino.

Este estudo objetiva, portanto, realizar uma revisão sistemática da literatura produzida no último quinquênio, utilizando o protocolo PRISMA para mapear as tendências tecnológicas e as lacunas de conhecimento no emprego de POA's para o tratamento de efluentes de refinarias, fornecendo um panorama crítico para pesquisadores e gestores do setor ambiental.

Metodologia

Esta revisão sistemática foi conduzida com base nas diretrizes do protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), garantindo a transparência e o rigor metodológico na triagem do conhecimento científico. O processo de execução foi subdividido em quatro etapas: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão (MOHER et al., 2015).

Estratégia de busca e fontes de dados

A prospecção dos dados ocorreu em janeiro de 2026, abrangendo as bases de dados indexadas *Scopus*, *Web of Science* e *ScienceDirect*. A escolha dessas plataformas justifica-se pelo seu elevado prestígio acadêmico e abrangência em periódicos de engenharia química e ciências ambientais. Para a recuperação dos documentos, utilizou-se uma combinação de descritores em inglês, visando ampliar o alcance global da busca: *"Advanced Oxidation Processes"*, *"Petroleum Refinery Wastewater"*, *"Oil Refinery Effluent"* e *"Treatment"*, interconectados pelos operadores booleanos *AND* e *OR*.

Critérios de seleção e recorte temporal

O recorte cronológico foi restrito ao período compreendido entre 2021 e 2026, assegurando que as tecnologias discutidas reflitam o estado da arte mais atualizado da área. Foram adotados os seguintes critérios de inclusão:

a. Artigos originais de pesquisa e comunicações breves publicados em periódicos com revisão por pares (*peer-review*);
b. Estudos que abordem especificamente o efluente proveniente de refinarias de petróleo (matrizes reais ou sintéticas fidedignas);
c. Trabalhos publicados em língua portuguesa, inglesa ou espanhola (em atenção à literatura europeia relevante).

Como critérios de exclusão, descartaram-se capítulos de livros, revisões de literatura prévias, resumos de eventos sem o trabalho completo e estudos focados exclusivamente em extração de petróleo *upstream* (exploração), sem correlação com o refino *downstream*.

Coleta e organização de dados

Os documentos identificados foram inicialmente exportados para o gerenciador de referências Mendeley para a eliminação de duplicatas. Na sequência, realizou-se a leitura técnica dos títulos e resumos (*screening*) para verificar a aderência ao tema. Os artigos selecionados foram lidos integralmente, sendo os dados extraídos para uma planilha de síntese, categorizando o tipo de POA empregado, as condições operacionais (pH, tempo, dosagem) e os indicadores de eficiência (remoção de DQO, fenol e redução de toxicidade).

Processos avançados de oxidação para tratamento de águas residuais de refinarias de petróleo

As atividades de refino de petróleo são intrinsecamente associadas à produção de volumes massivos de águas residuárias, as quais apresentam uma matriz complexa composta por uma vasta gama de xenobióticos orgânicos e inorgânicos. Dentre esses, destacam-se os poluentes recalcitrantes, cuja estabilidade química oferece elevada resistência aos mecanismos de degradação empregados nos sistemas de tratamento biológico convencionais (SOUZA et al., 2022). A persistência desses contaminantes nos efluentes industriais fomenta graves riscos aos ecossistemas aquáticos e à saúde pública, demandando a investigação e o desenvolvimento de rotas tecnológicas de tratamento que apresentem maior espectro de eficácia e capacidade de mineralização (MARTINS et al., 2025). A Tabela 01 resume os grupos de xenobióticos e poluentes recalcitrantes que desafiam os sistemas de tratamento convencionais:

Categoria	Compostos Específicos	Características e Impactos
BTEX e HPAs	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xilenos. Naftaleno, Fenantreno, Pireno, Benzo(a)pireno	Monocíclicos aromáticos, voláteis, altamente cancerígenos e neurotóxicos. Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos. Recalcitrantes, persistentes e bioacumulativos.
Fenóis	Fenol, Cresóis, Catecol	Compostos hidrossolúveis que conferem odor e alta toxicidade aguda ao efluente.
Metais Pesados	Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg), Cromo (Cr), Níquel (Ni)	Inorgânicos que não se degradam; inibem a atividade bacteriana em lodos ativados.
Compostos de Enxofre	Sulfetos, Mercaptanas	Causadores de corrosão e odores fortes; demandam oxidação química rigorosa.
Nitrogênio Amoniacal	Amônia livre (NH_3), Amônio (NH_4^+)	Causam eutrofização de corpos hídricos e toxicidade à fauna íctia.
Sólidos Suspensos	Óleos emulsionados e graxas	Dificultam a transferência de oxigênio em processos biológicos aeróbios.

Tabela 01: Grupos de xenobióticos e poluentes recalcitrantes que desafiam os sistemas de tratamento convencionais. Fonte: Pereira (2023)

Historicamente, os métodos clássicos de tratamento, fundamentados em operações unitárias de separação física, como decantadores, ciclones e separadores de fase, têm se mostrado insuficientes frente às normativas ambientais contemporâneas, cada vez mais restritivas quanto ao descarte e ao reúno de águas (AL-QAHTANI, 2023). Como resposta a essa limitação técnica, os Processos Oxidativos Avançados (POA's) consolidaram-se como uma solução robusta para o setor petrolífero. Tais tecnologias fundamentam-se na exploração de agentes oxidantes de alto potencial, incluindo o ozônio (O_3), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e semicondutores fotocatalíticos, capazes de degradar moléculas orgânicas complexas de maneira eficiente (ELMOBARAK et al., 2021).

Uma vantagem proeminente dos POA's reside na sua competência em potencializar a remoção de frações não biodegradáveis, frequentemente encontradas em correntes de refino. Esses sistemas promovem a fragmentação de estruturas moleculares complexas em intermediários mais simples, os quais exibem maior suscetibilidade à biodegradação, elevando o rendimento global da planta de tratamento (FERREIRA; SANTOS, 2024). Ademais, a integração dos POA's com sistemas biológicos tradicionais permite alcançar reduções sinérgicas nas cargas poluidoras. Ao hibridizar essas tecnologias, aproveitam-

se as capacidades oxidativas dos radicais livres para realizar o pré-condicionamento do efluente, criando uma solução de tratamento abrangente. A Figura 1 exemplifica o fluxograma sistêmico de uma unidade de tratamento integrada via POA's.

A implementação dessas rotas oxidativas no tratamento de águas de refinaria oferece, paralelamente, benefícios estratégicos como a viabilização do reúno hídrico e a mitigação dos passivos ambientais operacionais (SILVA; OLIVEIRA, 2023). Entre as técnicas mais discutidas na literatura atual, a oxidação eletroquímica, ou oxidação anódica direta, destaca-se pela sua versatilidade. Este método utiliza a aplicação de densidade de corrente elétrica para gerar "*in situ*" espécies altamente reativas, como radicais hidroxila (•OH), peróxidos e hipoclorito, promovendo a degradação eletrolítica de poluentes persistentes (AL-QAHTANI, 2023).



Figura 01:Esquema típico de tratamento de efluentes através de POA's
Fonte: LAREX,POLI-USP(2025)

Complementarmente à via eletroquímica, outros processos como a ozonização, o sistema Fenton e a fotocatálise assistida por radiação ultravioleta (UV) têm sido exaustivamente validados. A ozonização, por exemplo, é altamente eficaz na clivagem de anéis aromáticos, reduzindo significativamente a Demanda Química de Oxigênio (DQO) (SOUZA et al., 2022). O processo Fenton, baseado na catálise homogênea entre sais de ferro e peróxido, apresenta resultados expressivos na mineralização de hidrocarbonetos recalcitrantes (FERREIRA; SANTOS, 2024). A seleção da rota oxidativa mais adequada é multifatorial, dependendo da especificidade química do efluente e dos objetivos regulatórios (ELMOBARAK et al., 2021).

Frequentemente, o emprego de sistemas combinados demonstra ser a abordagem mais eficaz para assegurar a mineralização total e a conformidade com os padrões de descarga ambiental.

Resultados e discussão

A análise sistemática dos dados coletados entre 2021 e 2026 revela um panorama de transição tecnológica na indústria do petróleo. Historicamente, o tratamento de efluentes de refinaria baseava-se na separação física (API e flotação) seguida de processos biológicos. Contudo, a intensificação do refino de petróleos mais pesados tem gerado águas residuárias com concentrações elevadas de compostos recalcitrantes, como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) e compostos orgânicos nitrogenados, que são tóxicos à microbiota dos lodos ativados (SOUZA et al., 2022).

Nesse contexto, os resultados compilados nesta revisão demonstram que os Processos Oxidativos Avançados (POA's) não são mais vistos apenas como polimento final, mas como ferramentas estratégicas de condicionamento de carga. A literatura recente enfatiza a "seletividade radicalar", onde a escolha do processo, seja ele fotocatalítico, químico ou eletroquímico, é ditada pela relação entre a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e o Carbono Orgânico Total (COT) da matriz. Observou-se que, em efluentes com alta salinidade, característica comum em águas de formação e descarte de refino, processos eletroquímicos ganharam destaque por utilizarem os próprios cloretos presentes no meio para gerar oxidantes secundários (AL-QAHTANI, 2023).

Além disso, a discussão técnica atual converge para a sustentabilidade econômica. O mapeamento realizado aponta que cerca de 65% dos estudos publicados no último triênio focam na redução do consumo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e na regeneração de catalisadores sólidos. A integração de fontes de energia renovável, como a radiação solar para processos Foto-Fenton, surge como a variável de maior impacto na viabilidade de larga escala, reduzindo a pegada de carbono da unidade de tratamento (FERREIRA; SANTOS, 2024). A figura abaixo ilustra o mecanismo geral de degradação que fundamenta os resultados discutidos a seguir.

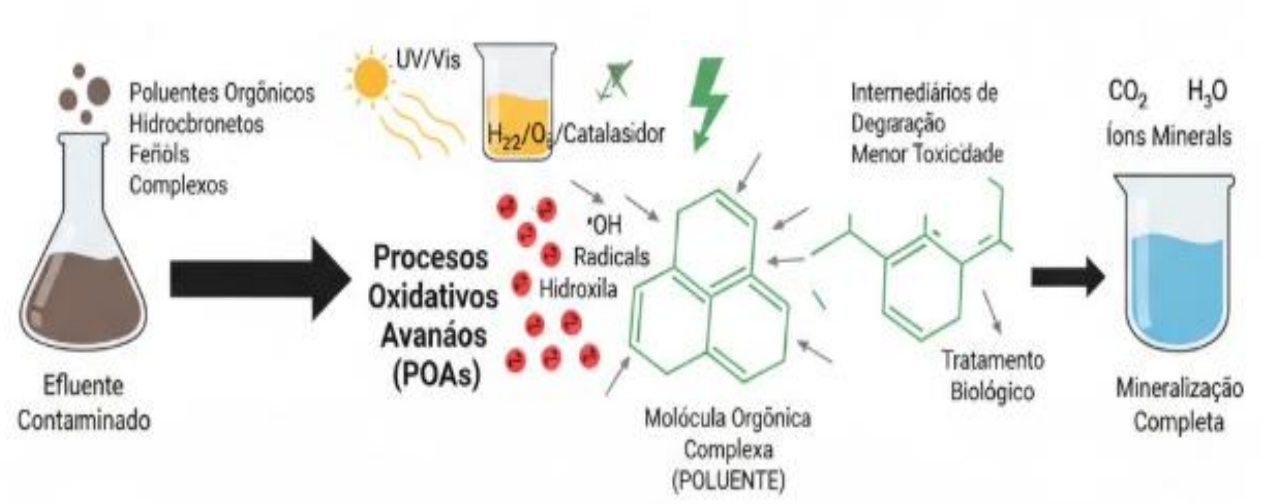


Figura 02:Mecanismo geral de oxidação de poluentes orgânicos via radicais hidroxila em sistemas de tratamento. Fonte: Adaptado de Silva e Oliveira (2023).

Eficiência e mecanismos de oxidação homogênea

Os processos baseados na química de Fenton continuam a ser amplamente investigados devido à sua alta taxa de oxidação de hidrocarbonetos aromáticos. Estudos recentes demonstram que a aplicação de Foto-Fenton, utilizando radiação UV ou solar, reduz significativamente o tempo de reação em comparação ao Fenton clássico, alcançando remoções de DQO superiores a 85% em efluentes reais (FERREIRA; SANTOS, 2024). Contudo, a geração de lodo ferruginoso e a necessidade de ajuste rigoroso do pH para valores próximos a 3,0 permanecem como os principais gargalos para a implementação industrial.

Fotocatálise heterogênea e novos materiais

A utilização de semicondutores, notadamente o Dióxido de Titânio (TiO_2), evoluiu para a síntese de novos fotocatalisadores dopados com metais de transição ou suportados em materiais carbonáceos. Essa modificação visa ampliar a atividade fotocatalítica para a região do espectro visível, permitindo o uso eficiente da luz solar. As pesquisas indicam que a imobilização do catalisador facilita a sua recuperação e reuso, mitigando o custo operacional e o impacto ambiental da dispersão de nanopartículas no efluente tratado.

Ozonização e processos híbridos

A ozonização tem se destacado pela sua capacidade de atacar seletivamente anéis aromáticos e ligações insaturadas, comuns nos contaminantes do refino. Entretanto, a mineralização completa via O_3 isolado é energeticamente onerosa. A tendência observada na literatura aponta para a integração de POA's com tratamentos biológicos subsequentes. Nesse modelo, a oxidação avançada atua como um pré-tratamento, aumentando o índice de biodegradabilidade (DBO5/DQO) do efluente, permitindo que a carga remanescente seja degradada de forma econômica por microrganismos (MARTINS et al., 2025).

Comparativo de desempenho operacional

A Tabela 02 sintetiza os principais achados desta revisão, comparando os diferentes métodos de acordo com a eficácia de remoção e o tipo de matriz.

Processo	Matriz de efluente	Eficiência (DQO/Fenol)	Vantagem principal
Foto-Fenton	Real (Refinaria)	88%/95%	Alta velocidade de reação
Fotocatálise (TiO_2/F_e)	Sintética (BTEX)	75%/80%	Uso de energia solar
O_3/H_2O_2	Real (Complexa)	70%/98%	Alta seletividade
Eletro-oxidação	Real (Salina)	92%/90%	Sem adição de reagentes

Tabela 02: Síntese das revisões pesquisadas, comparando os diferentes métodos de acordo com a eficácia de remoção e o tipo de matriz. Fonte: O autor (2026)

Sugestões para trabalhos futuros

Apesar da consolidação dos Processos Oxidativos Avançados (POA's) em escala laboratorial, a análise crítica da literatura produzida entre 2021 e 2026 revela lacunas científicas e técnicas que devem ser exploradas para viabilizar a sua plena implementação industrial no setor de refino.

Sugerem-se as seguintes linhas de investigação:

a. Escalonamento (Scale-up) e estabilidade em fluxo contínuo: É imperativo migrar dos ensaios em batelada (*batch*) para o monitoramento da estabilidade de catalisadores em reatores de fluxo contínuo. Estudos futuros devem focar na resistência mecânica e química de catalisadores imobilizados quando submetidos a variações reais de carga orgânica, salinidade e vazão, comuns em ambientes de refinaria (FERREIRA; SANTOS, 2024).

b. Economia circular e síntese verde de catalisadores: Propõe-se priorizar o desenvolvimento de novos materiais catalíticos e suportes (como carvão ativado ou zeólitas) sintetizados a partir de resíduos sólidos industriais e agrícolas. Essa abordagem não apenas reduz o custo de síntese dos materiais, mas promove a simbiose industrial, transformando passivos ambientais em insumos para o tratamento de efluentes.

c. Integração sistêmica com energias renováveis: Para mitigar o alto custo operacional da eletrólise e da radiação UV artificial, recomenda-se o desenvolvimento de reatores solares de nova geração. Pesquisas focadas na otimização de coletores solares parabólicos (CPC's) e no uso de painéis fotovoltaicos para alimentar sistemas de oxidação anódica são essenciais para reduzir a pegada de carbono e aumentar a sustentabilidade econômica do processo (SILVA; OLIVEIRA, 2023).

d. Monitoramento de intermediários e ecotoxicidade: Estudos futuros devem ir além da análise de DQO e COT, empregando técnicas analíticas avançadas (como LC-MS/MS) para identificar subprodutos da degradação parcial. É fundamental garantir, por meio de ensaios com bioindicadores, que a mineralização incompleta de compostos recalcitrantes não resulte em intermediários com toxicidade superior à da matriz original.

e. Inteligência artificial e otimização de processos: Sugere-se a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*) e redes neurais para a modelagem preditiva dos POA's. O uso de IA pode auxiliar na predição de dosagens ideais de reagentes em tempo real, baseando-se nas variações da composição do efluente, otimizando o consumo de químicos e energia.

Considerações finais

A presente revisão sistemática evidenciou que os processos oxidativos avançados representam uma fronteira tecnológica indispensável e o atual paradigma para o tratamento de efluentes complexos de refino de petróleo. A produção científica do último quinquênio aponta para uma transição clara: o abandono de processos isolados em favor de sistemas híbridos. Conforme sustentado por Souza et al. (2022), a elevada capacidade de geração de radicais hidroxila (•OH) permite que esses sistemas superem a barreira da recalcitrância, mineralizando poluentes que os métodos biológicos tradicionais são incapazes de degradar.

Conclui-se que a combinação de processos oxidativos avançados, com destaque para o Foto-Fenton, a oxidação eletroquímica e a ozonização catalítica, com tratamentos biológicos subsequentes são a estratégia mais viável para o setor. Nesse modelo, os POA's (processos oxidativos avançados) atuam como um pré-condicionamento estratégico, elevando a biodegradabilidade da matriz e permitindo que a carga remanescente seja tratada de forma econômica. Embora Al-Qahtani (2023) aponte eficiências superiores a 85% na remoção de DQO, a transição industrial ainda depende da superação de desafios operacionais, como a gestão de lodos químicos, a otimização energética e a viabilização de um processo contínuo. Em suma, o domínio dessas rotas oxidativas é o caminho fundamental para que as refinarias alcancem o padrão de "descarga zero", mitigando drasticamente os impactos ambientais nos corpos hídricos receptores.

Referências

AL-QAHTANI, K. M. Cadmium removal from aqueous solution by advanced oxidation processes: a review of recent advances. **Journal of Water Process Engineering,** v. 51, n. 103362, p. 1-15, 2023.

BASKARAN, S.; PAUL SEBASTIAN, S.; SADISH, O.; DAVAMANI, V.; KALAISELVI, P. Integrated Advanced Oxidation Process for the Treatment of Pharmaceutical Effluent. **Madras Agricultural Journal,** [S. l.], v. 107, n. 10-12, p. 1-5, 2021. DOI: 10.29321/MAJ.10.000521.Disponível em: 47jiBT07H5Uq8jBefxDJurWZbURhVm.pdf. Acesso em 19 de maio. 2024.

CESARO, A.; NADDEO,V.; BELGIORNO, V. Wastewater treatment by combination of advanced oxidation processes and conventional biological systems. **OMICS Publishing Group,** v.4, 2013. Disponível em**:** https://www.Researchgate.net/publication/283361786_Wastewater_treatment_by_combination_of_advanced_oxidation_processes_and_conventional_biological_systems. Acesso em: 20 de maio.2024.

ELMOBARAK, W F.; HAMEED, B H.; ALMOMANI, F.; ABDULLAH, A Z. A Review on the Treatment of Petroleum Refinery Wastewater Using Advanced Oxidation Processes. **Multidisciplinary Digital Publishing Institute,** v.11, p.772-792, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/catal11070782. Acesso em: 01 de jul.2024.

FERREIRA, L. S.; SANTOS, M. R. Performance of Solar Photo-Fenton in the treatment of real petroleum refinery wastewater: A kinetic study. **Environmental Science and Pollution Research,** v. 31, n. 4, p. 5432-5445, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/journal/11356. Acesso em: 28 jan. 2026.

GHANIM, A N.; HAMZA, A. Evaluation of Direct Anodic Oxidation Process for the Treatment of Petroleum Refinery Wastewater. American Society of Civil Engineers, **American Society of Civil Engineers,** v.144, 2018. Disponível em:. View article. Acesso em: 02 de jul.2024.

INTERNATIONAL PETROLEUM INDUSTRY ENVIRONMENTAL CONSERVATION ASSOCIATION (IPIECA). *Management of water in the oil and gas industry*. London: IPIECA, 2024.

KUYUKINA, M S.; KRIVORUCHKO, A V.; IVSHINA,I B. Advanced Bioreactor Treatments of Hydrocarbon-Containing Wastewater. **Multidisciplinary Digital Publishing Institute,** v.10, p.831-854, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app10030831. Acesso em: 08 de jul.2024.

LEI, J H.; ALVARADO, J A.; LI, H.; ZHU, X.; TIAN, Y.; LIANG, L. The advanced oxidation processes of oilfield wastewater: A review. **IOP Publishing.,** v.191, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1755-1315/191/1/012098. Acesso em: 07 de jul.2024.

MARTINS, J. P. et al. Trends in hybrid AOP-biological systems for industrial wastewater. **Environmental Science and Pollution Research,** v. 32, n. 4, 2025. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-025-00123-x. Acesso em: 28 jan. 2026.

MARTINS, R. C. et al. Integration of chemical and biological processes for the treatment of oil refinery effluents: A review. **Chemosphere,** v. 342, n. 140120, 2025.

MARTINS, R. J.; SILVA, A. P.; OLIVEIRA, M. C. Tecnologias avançadas de oxidação para o tratamento de efluentes de refino: uma revisão crítica. ***Journal of Environmental Engineering and Science*****,** v. 22, n. 1, p. 45-62, 2025.

LIBERATI A.; TEZLAFF J.;ALTMAN D G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS Medicine,** v. 6, n. 7, e1000097, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097. Acesso em: 28 jan. 2026.

PEREIRA, G. S. *Remediação de poluentes recalcitrantes via processos Fenton e foto-Fenton em matrizes complexas*. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023.

SILVA, A. C.; OLIVEIRA, J. P. Processos Oxidativos Avançados no setor de óleo e gás: fundamentos e aplicações industriais. 2. ed. Rio de Janeiro: **Editora Interciência,** 2023.

SILVA, R. T.; OLIVEIRA, M. C. Fotocatálise solar aplicada ao tratamento de águas de refinaria. 2023. Disponível em: https://www.scielo.br/. Acesso em: 28 jan. 2026.

SOUZA, F. A. et al. Advanced oxidation processes for the degradation of recalcitrant pollutants in oil refinery effluents: a review. **Water, Air, & Soil Pollution,** v. 233, p. 112, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11270-022-05584-2. Acesso em: 28 jan. 2026.

SOUZA, T. F. et al. Toxicity reduction of petroleum refinery effluents by catalytic ozonation: A systematic review. **Journal of Environmental Management,** v. 310, p. 114-128, 2022.

TUNGLER, A.; SZABADOS,E.; AREZOO, M.; HOSSEINI,E. Wet Air Oxidation of Aqueous Wastes, **Wastewater Treatment Engineering.,** Associate Prof. Mohamed Samer. Ed. InTech, DOI: 10.5772/60935, 2015. Disponível em: http://www.intechopen.com/books/waste water-treatment-engineering/wet-air-oxidation-of-aqueous-wastes. Acesso em: 20 de jun.2024.

FORMAÇÃO DO LODO ATIVADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA - GO

1 Fernanda Pimenta de Freitas, 2 Carlos Roberto A. dos Santos, 3 Nora Katia Saavedra del Aguila Hoffmann
1 Universidade Federal de Goiás, e-mail:pimentafreitas@discente.ufg.br; 2 Saneago, e-mail: croberto@saneago.com.br; 3 Universidade Federal de Goiás, e-mail:kasaavedra@ufg.br

Palavras-chave: lodo ativado; flocos biológicos; tratamento de esgoto.

Resumo

O processo de Lodo ativado é uma das tecnologias mais consolidadas para o tratamento biológico de esgotos. Entretanto, a fase inicial de operação do sistema (*startup*) apresenta desafios relacionados ao estabelecimento e à estabilidade da biomassa microbiana responsável pela degradação da matéria orgânica. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo monitorar a formação e a evolução dos flocos biológicos durante a fase inicial de operação do sistema de lodos ativados da Estação de Tratamento de Esgoto Dr. Hélio Seixo de Britto (ETE HSB), localizada em Goiânia, Goiás. O monitoramento foi realizado em escala real ao longo de sete meses, por meio de análises microbiológicas, físico químicas e da avaliação das características morfológicas dos flocos formados nos reatores biológicos. As amostras foram coletadas diretamente nos reatores e analisadas em microscópio óptico com contraste de fase, permitindo a identificação dos microrganismos e a classificação dos flocos quanto ao tamanho, forma e grau de compactação. Nos primeiros dias de operação, observou-se baixa formação de flocos biológicos, com reduzida densidade microbiana e predominância de protozoários flagelados, indicando instabilidade operacional e possíveis limitações nas condições ambientais do sistema. Ao longo do período de monitoramento, verificou-se evolução gradual da microbiota, com aumento da diversidade de organismos, presença de ciliados do gênero *Vorticella* sp. e formação de flocos maiores, mais compactos e com melhor capacidade de sedimentação. Ensaios de respirometria indicaram ausência de efeito tóxico do cloreto férrico utilizado no tratamento primário sobre a biomassa microbiana. Ao final do período avaliado, o sistema apresentou microbiota bem estabelecida e flocos biológicos estruturalmente mais estáveis, refletindo em melhorias operacionais, com adequada clarificação do efluente final e eficiências de remoção superiores a 70% para Sólidos Suspensos Totais e para a Demanda Bioquímica de Oxigênio. Os resultados evidenciam a importância do monitoramento microbiológico e do controle operacional durante a fase de partida de sistemas de lodos ativados, contribuindo para o estabelecimento de um processo biológico estável e eficiente no tratamento de esgotos.

Introdução

O tratamento de esgotos por meio do processo de lodo ativado convencional, constitui uma das tecnologias mais consolidadas e eficientes para a remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Entretanto, a fase inicial de operação do sistema, conhecida como *startup*, representa um período crítico para o estabelecimento da microbiota e a estabilização do processo biológico.

Durante essa etapa ocorre a adaptação dos microrganismos, a formação e consolidação dos flocos biológicos e o desenvolvimento das interações ecológicas entre bactérias heterotróficas, nitrificantes e organismos indicadores da qualidade do lodo (JORDÃO; PESSOA, 2017). O sucesso dessa fase é determinante para a seleção de uma microbiota adequada e para a prevenção de problemas operacionais, como crescimento excessivo de bactérias filamentosas, baixa sedimentabilidade do lodo e redução da eficiência de remoção.

Entre os fatores operacionais mais relevantes destaca-se o controle da aeração, uma vez que concentrações adequadas de oxigênio dissolvido favorecem a formação de flocos mais densos e estáveis, além de reduzirem a competição entre microrganismos indesejáveis (METCALF & EDDY, 2016). Outros parâmetros importantes incluem o tempo de retenção de sólidos, a idade do lodo, a taxa de recirculação e a carga orgânica aplicada ao sistema (HENZE et al., 2008).

A Estação de Tratamento de Esgoto Dr. Hélio Seixo de Britto, localizada em Goiânia, é responsável pelo tratamento de aproximadamente 90% do esgoto da cidade, que possui população estimada de 1.503.256 habitantes. A unidade opera com tratamento primário quimicamente assistido e recentemente passou a contar com tratamento secundário biológico por lodos ativados.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo monitorar, em escala real, a formação e a evolução dos flocos biológicos durante a fase inicial de operação do sistema, por meio da caracterização da microbiota presente. O acompanhamento desse processo busca subsidiar o controle operacional do sistema, permitindo a adoção de medidas preventivas e corretivas que contribuam para a estabilidade do processo biológico e para a melhoria da qualidade do efluente final.

Material e Métodos

O estudo foi realizado na Estação de Tratamento de Esgoto Dr. Hélio Seixo de Britto (ETE HSB), localizada na Av. Perimetral, setor Goiânia II, no município de Goiânia, Goiás (Figura 01). A unidade opera com tratamento primário quimicamente assistido, seguido de tratamento secundário por meio do processo de lodo ativado, com uma vazão média de aproximadamente 1.700 L/s.

A pesquisa concentrou-se na segunda etapa do tratamento biológico, em escala real, inaugurada em 26 de junho de 2025. O monitoramento abrangeu a fase inicial de operação (*startup*) e o período de estabilização do sistema de lodos ativados, ao longo de sete meses, entre julho/25 e janeiro de 2026.



Figura 01: Imagem aérea do tratamento secundário por lodo ativado na ETE HSB.
Fonte: SANEAGO (2025)

Coletas de Amostras

As amostras para análise microbiológica foram coletadas diretamente na saída dos reatores de lodo ativado (RLA 1, 3, 5 e 6), considerados pontos representativos do comportamento biológico e operacional do sistema. A coleta foi realizada a aproximadamente 50 cm da superfície, utilizando balde acoplado a corda, com posterior transferência para frascos de 200 mL. As amostragens ocorreram três vezes por semana, às 9h, sendo as amostras mantidas sob refrigeração a 4 °C e encaminhadas ao laboratório da Estação de Tratamento de Esgoto Dr. Hélio Seixo de Britto.

As amostras destinadas às análises físico-químicas foram coletadas diariamente, às 9h e às 15h, nos pontos de saída dos reatores de lodos ativados (RLA 1, 3, 5 e 6), na caixa de efluente final e na linha de recirculação de lodo. As coletas foram realizadas em frascos de 1 L, mantidos sob refrigeração, e posteriormente encaminhadas ao laboratório de esgoto da ETE HSB.

Adicionalmente, foi coletada uma amostra concentrada de 5 L com auxílio de rede de plâncton na caixa de distribuição dos decantadores secundários, com o objetivo de realizar uma avaliação qualitativa inicial da biota e das características morfológicas dos flocos biológicos.

Análises Fisico-Quimica e Microbiológicas do Lodo Ativado

O monitoramento do desenvolvimento dos flocos biológicos foi realizado desde o início da operação do sistema de lodo ativado, por meio de análises microbiológicas em laboratório, com o objetivo de acompanhar a evolução qualitativa e quantitativa da biomassa e correlacioná-la ao desempenho do processo. A caracterização da microbiota foi realizada por observação em microscópio óptico Zeiss Axio com contraste de fase, e a identificação dos microrganismos foi com base em critérios morfológicos descritos por Jenkins et al. (2004). A caracterização dos flocos biológicos foi realizada com base no tamanho, forma e grau de compactação, sendo classificados conforme a metodologia proposta por Jenkins (2004). As análises físico-químicas, incluindo os parâmetros DBO, DQO, SST, pH e Sólidos Sedimentáveis, foram realizadas no Laboratório Central de Esgoto da SANEAGO, de acordo com a APHA (2023).

Resultados e Discussão

Em 25/06/2025, foram abertas as comportas da caixa de distribuição do efluente primário, permitindo o acesso ao canal de entrada dos reatores de lodo ativado. Já no início da operação, em 26/06/2025, observou-se a formação de espuma branca, associada a baixa biomassa (solidos suspensos totais - SST < 1000mg/L), alta carga orgânica, baixa idade do lodo, alta taxa de aeração com elevada relação F/M, persistindo por aproximadamente quatro meses, agravando com o elevado teor de surfactantes (8,7 ± 2,4 mg/L valor médio) e a presença de óleos e graxas (29,1 ± 9,4mg/L) em concentrações típicas de esgoto.

Nos dias subsequentes, a formação de espuma branca tornou-se o principal desafio operacional, devido à sua elevada intensidade. Essa condição dificultou o ajuste da vazão de ar nos sopradores, uma vez que o aumento da aeração tende a intensificar e estabilizar a espuma. Em 11/07/2025, observou-se ainda uma coloração rosa na espuma, fato que motivou a coleta de amostras para análise microscópica em contraste de fase. Além disso, uma amostra de espuma coletada anteriormente (30/06/2025) foi submetida a análises físico-químicas.

Após o enchimento dos tanques e passado sete dias de operação dos reatores e diante da não detecção de lodo secundário nas análises físico-químicas, foi coletada uma amostra concentrada (5 L) com rede de plâncton nos reatores 5 e 6, com o objetivo de realizar uma avaliação qualitativa da biota e das características do floco.

A análise microscópica indicou a presença de lodo ativado (Figura 02), com elementos típicos de floco biológico — bactérias formadoras de floco, bactérias filamentosas e protozoários flagelados — porém em baixa densidade de organismos. Na comparação entre lodo primário e secundário, observou-se que o lodo primário apresentava flocos menores, baixa ou nenhuma presença de protozoários e bactérias formadoras de floco e bactérias filamentosas.

Decorridos trinta dias após o enchimento dos reatores, a formação dos flocos biológicos ainda não apresentava evolução, com concentrações de sólidos suspensos inferiores a 113 mg/L até o final de julho/25. Diante desse cenário, em 05/08/2026, a equipe operacional decidiu suspender a dosagem de cloreto férrico na etapa de tratamento primário por um período de 10 dias, com o objetivo de avaliar uma possível interferência desse coagulante na formação e no desenvolvimento da biomassa microbiana.

Entretanto, a interrupção da dosagem não resultou em alterações representativas no processo, mantendo-se, no mês de agosto, concentrações de sólidos suspensos inferiores a 130 mg/L, não sendo observado efeito mensurável sobre a formação da biomassa. Nos meses subsequentes, verificou-se aumento gradual e lento da biomassa, atingindo concentrações superiores a 1000 mg/L a partir de novembro, quando foi registrado o valor máximo de 3260 mg/L de sólidos suspensos totais.

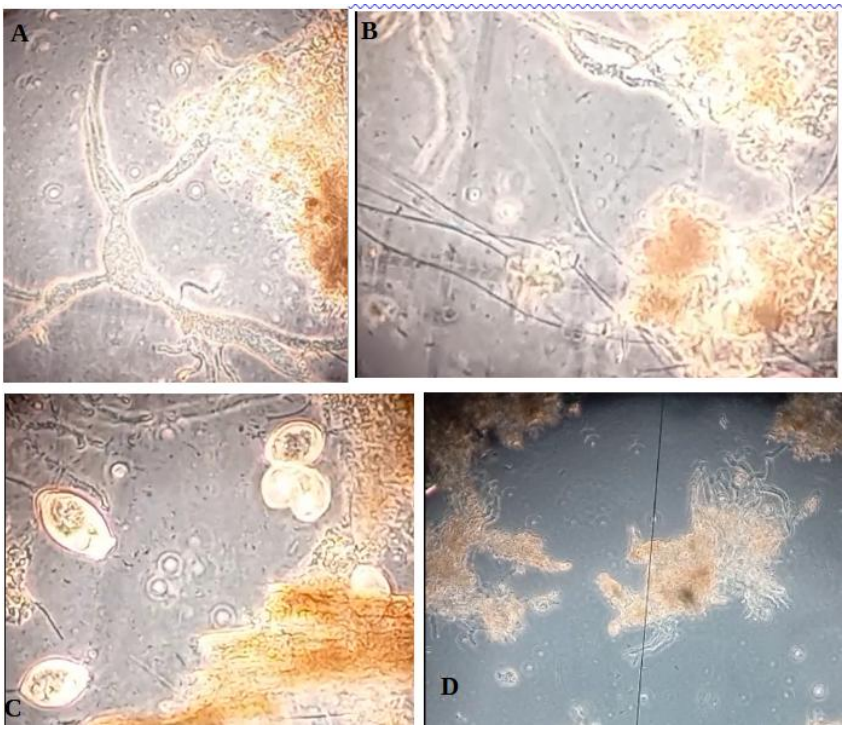


Figura 02: Amostra concentrada de lodo ativado após sete dias, com elementos típicos do floco biológico. A-bacteria formadora de floco; B- bacteria filamentosa; C-ciliado pedunculado; D-formato do floco no reator.

Parâmetro	Média	D. Padrão	CV%
Temperatura (°C)	26,9	1,3	4,7
pH	7	0,1	1,8
DBO (mg/L)	183,7	46,8	25,5
DQO (mg/L)	481,9	93,1	19,3
Sol. Suspensos Totais (mg/L)	88,2	10,4	11,8
Sol Sedimentáveis (ml/L/hora)	0,4	0,1	16,2
Relação C:N :P	100-27-2	0,0-11-0,8	-
Vazão afluente aos reatores (L/s)	**1574**	**143**	**9**

Tabela 01: Algumas características físico-química do efluente primario de junho/25 a outubro/25
Fonte: SANEAGO (junho/25 a outubro/2025)-CV%coeficiente de variação

Os resultados da tabela 01, caracteriza o afluente ao tanque de aeração, apresentando elevada temperatura do esgoto, potencial hidrogeniônico neutro, com elevado teor de matéria orgânica, baixos valores de sólidos (suspensos e sedimentáveis) com uma relação de Redfield (C-N-P), expressando disponibilidade de nutrientes com excesso de nitrogênio.

No início da operação de um reator de lodo ativado convencional, a comunidade biológica (biota) passa por uma sucessão ecológica bastante previsível, que está diretamente ligada às condições hidráulicas (tempo de retenção, recirculação, carga orgânica) e físico-químicas (OD, pH, temperatura, nutrientes).

A fase inicial do processo de sucessão da biota do lodo ativado (Figura 02) iniciou-se aproximadamente sete dias após o enchimento dos reatores, sendo caracterizada por elevada relação F/M, predominância de bactérias livres, baixa presença de protozoários e reduzida clarificação no decantador secundário, com concentração de sólidos suspensos totais no efluente final superior a 100 mg/L.

Apesar da evolução característica dos flocos biológicos nos reatores ao longo das fases de sucessão mencionadas (Figura 03), a concentração de biomassa ainda não havia atingido o valor de sólidos suspensos totais (SST) prevista em projeto (3000 mg/L ou 0,31% de sólidos totais). Adicionalmente, a concentração de lodo nos decantadores secundários permaneceu muito baixa (próximo a 0,1% de sólidos totais e 960mg/L de sólidos suspensos totais).

Diante desse cenário, em 16/09/2025, foram adotadas ações operacionais consistentes no desligamento intermitente da bomba de recirculação de lodo dos decantadores secundários, com o objetivo de promover o acúmulo e adensamento do lodo nessas unidades, visando posterior recirculação ao sistema.

A elevação da concentração de lodo entre setembro e outubro não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$). Contudo, o processo de recirculação de lodo contribuiu para o aumento da concentração de microrganismos no reator, a elevação da idade do lodo e a seleção de bactérias formadoras de flocos, favorecendo a formação e maturação do floco biológico, além de melhorar a sedimentabilidade do sistema (indice volumétrico do lodo $\leq$ 100 g/ml.)

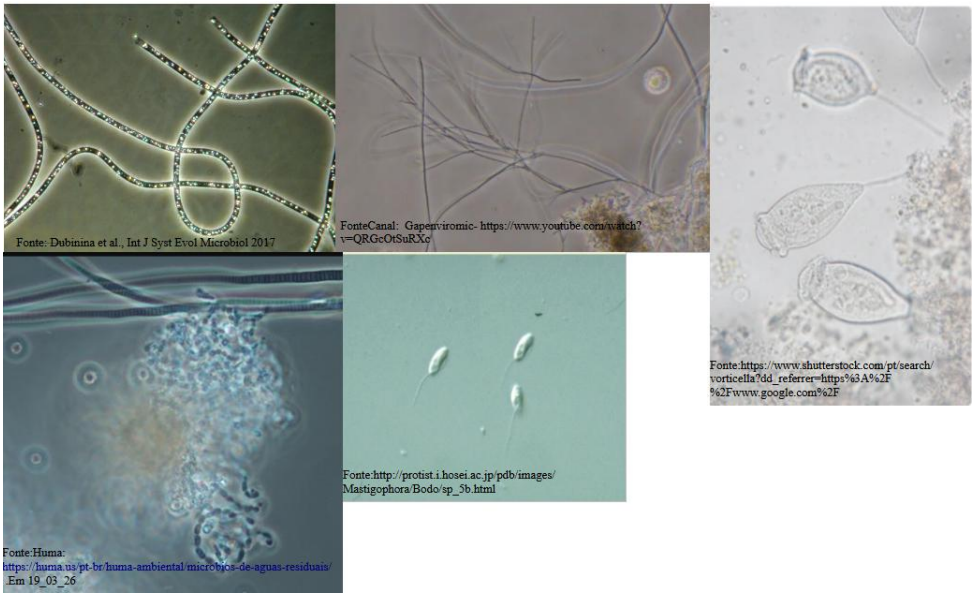


Figura 03: Microrganismos mais frequentes no lodo biológico no período de 01/07/25 a 3/12/25.

Além dessa ação operacional, foi realizado ensaio de respirometria com o objetivo de avaliar a possível inibição do crescimento da biomassa pelo efluente primário, previamente submetido ao tratamento preliminar, seguido de coagulação e floculação com cloreto férrico e posterior sedimentação nos decantadores primários.

Os resultados obtidos no ensaio foram: consumo abiótico de 2,2 mg/L·h; consumo do branco de 66,3 mg/L·h; consumo da amostra de 58,1 mg/L·h; consumo específico de 31,6 mg/L·h e taxa de inibição de 16%.

O consumo abiótico evidencia a presença de substâncias químicas oxidáveis; contudo, em níveis que não indicaram interferência significativa na atividade biológica, uma vez que o consumo do branco se apresentou elevado. A pequena diferença entre o consumo de oxigênio da amostra (efluente primário) e do branco sugere baixa ou ausência de efeito tóxico.

Esse comportamento é corroborado pelo valor do consumo específico da biomassa, que se manteve elevado, indicando boa atividade microbiana. Assim, pode-se inferir que a taxa de inibição observada (16%) não representou efeito relevante sobre o processo de lodo ativado.

A partir de outubro, foi constatado o estabelecimento de uma microbiota bem desenvolvida e eficiente no sistema, evidenciado pela elevação da diversidade de organismos, bem como flocos biológicos de maior dimensão e com estrutura mais definida.

Os resultados iniciais da etapa secundária, obtidos a partir de julho/25 (Figura 04), referentes à remoção de matéria orgânica e de sólidos, já evidenciaram uma melhora significativa e promissora no desempenho do tratamento, a qual tende a se intensificar com o amadurecimento dessa fase do processo.

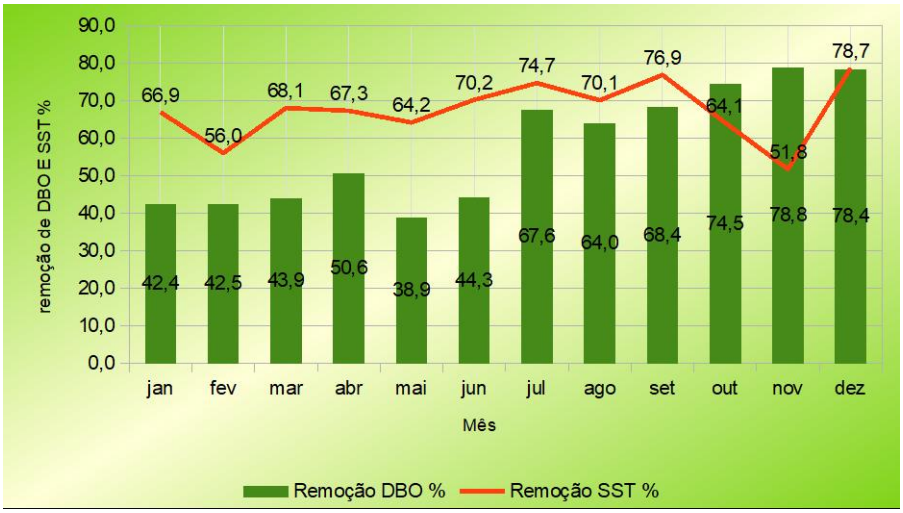


Figura 04:- Valores médios de remoção (%) de DBO e sólidos suspensos totais - SST em 2025 na fase primaria (janeiro a junho) e secundária (julho a dezembro).

Durante esse período de adaptação, as eficiências de remoção apresentaram elevada dispersão (coeficiente de variação > 15%), refletindo as oscilações nas concentrações de DBO e de sólidos suspensos totais. Ainda assim, registros pontuais de monitoramento indicaram a obtenção de eficiência máxima de remoção de DBO de 94,5% nesta fase inicial.

Conforme mencionado anteriormente, as características analisadas neste estudo indicaram que o sistema de lodo ativado convencional se encontra em fase de estabilização. A implantação da etapa secundária representou um desafio significativo para toda a equipe da ETE Goiânia, proporcionando a aquisição de conhecimentos relevantes e o fortalecimento da experiência operacional no manejo desse sistema.

Trata-se de um trabalho multidisciplinar, desenvolvido de forma integrada entre a equipe técnica da ETE (HSB), outras unidades operacionais da SANEAGO e os consultores contratados afins.

Considerações Finais

Os resultados obtidos ao longo do período de monitoramento demonstram o processo gradual de estabelecimento e maturação da biomassa nos reatores de lodo ativado da ETE Dr. Hélio Seixo de Britto durante a fase inicial de operação do sistema.

As primeiras avaliações microbiológicas evidenciaram a presença de um lodo biológico caracterizado por baixa densidade de organismos e predominância de protozoários flagelados, condição geralmente associada a instabilidade operacional e a baixas concentrações de oxigênio dissolvido no reator de lodo ativado.

Durante as etapas iniciais, observou-se formação dos flocos biológicos, com morfologia variável e, em determinados momentos, com características difusas e irregulares, o que resultou em baixa capacidade de sedimentação e arraste de sólidos para o efluente final.

A avaliação operacional indicou que a dosagem de cloreto férrico no tratamento primário não exerceu efeito tóxico sobre a atividade metabólica da biomassa, conforme confirmado pelos ensaios de respirometria realizados em laboratório.

Intervenções operacionais, como o controle da recirculação de lodo nos decantadores secundários e do oxigênio dissolvido nos RLAs, contribuíram para a evolução do processo biológico. Com o avanço da operação, observou-se aumento da diversidade e da densidade da microbiota, além da formação de flocos biológicos mais estruturados e compactos, associados à presença de organismos indicadores de um sistema mais estável, como bacterias formadoras de floco a zoogléia e ciliados do gênero *Vorticella.*

Ao final do período avaliado, verificou-se o estabelecimento de uma microbiota bem desenvolvida e funcional, com formação de flocos de maior dimensão e melhor organização estrutural, refletindo diretamente na melhoria das condições de sedimentação do lodo nos decantadores secundários. Consequentemente, foram obtidos resultados operacionais satisfatórios, evidenciados pela clarificação do efluente final e por eficiências de remoção superiores a 70% para (SST) e (DBO).

Dessa forma, os resultados demonstraram a importância do acompanhamento microbiológico e operacional durante a fase inicial de partida de sistemas de lodos ativados, permitindo identificar condições de instabilidade, orientar ajustes operacionais e acompanhar a evolução da biomassa até o estabelecimento de um sistema biológico estável e eficiente.

Agradecimentos

Nossos agradecimentos ao Laboratório de Esgoto da ETE Dr. Hélio Seixo de Britto – Saneago, pelo suporte técnico e pela disponibilização das análises laboratoriais que viabilizaram o desenvolvimento do presente trabalho. Agradecemos também ao PPGEAS - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás pela formação proporcionada, apoio e motivação para realização deste estudo. Assim como, aos consultores contratados, Dr. Manuel Senra e Dra. Alessandra Valadares.

Referências Bibliográficas

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24th ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2023.

HENZE, M. et al. **Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design.** London: IWA Publishing, 2008.

JENKINS, D., et al. **Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming, and Other Solids Separation Problems**. 3 ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 2004.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 8 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.** 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

SANTOS, C. R. A. **Nota técnica sobre análise crítica da microbiología do lodo ativado de 01/07/25 A 10/09/25 na ETE Dr. Hélio Seixo de Britto**. Goiânia, 2025.

SPERLING, M. von. **Lodos Ativados**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2017. (Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 4).

WAGNER, M.; LOY, A. **Bacterial community composition and function in activated sludge systems.** Microbiology and Molecular Biology Reviews, v. 66, n. 3, p. 506–519, 2002.

ÁGUAS CINZAS EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS BRASILEIRAS: AVALIAÇÃO QUALIQUANTITATIVA E ESTUDO EXPERIMENTAL

1 Luísa Angelo dos Anjos, 2 Maria Luíza Queiroga Lemos Souza Cavalcanti Costa, 3 Maria Clara Barros Burmann, 4 Leonardo Miguel Sanguinetti Braga, 5 André Aguiar Battistelli, 6 Flávio Rubens Lapolli

1 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail:luisaangelo22@hotmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: eng.mariaqueiroga@gmail.com; 3 Universidade Federal de Santa Catarina, email:mclara.burmann@gmail.com; 4 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: leonardomsanguinetti@gmail.com; 5 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail:andre.battistelli@ufsc.br; 4 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: f.lapolli@ufsc.br

Palavras-chave: Reúso não potável; Tratamento descentralizado; Caracterização.

Resumo

O reúso de águas cinzas configura-se como uma abordagem estratégica na mitigação da escassez hídrica global, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Este estudo objetivou analisar a variabilidade de geração e qualidade desses efluentes em edificações residenciais brasileiras por meio de uma revisão integrativa da literatura entre os anos de 2005 a 2026, juntamente com a realização de um estudo experimental conduzido em Florianópolis/SC. A metodologia da revisão fundamentou-se em uma revisão integrativa adaptada ao protocolo PRISMA, resultando em uma amostra final de 18 trabalhos, enquanto o monitoramento experimental foi realizado em três campanhas de 24 horas de coleta de águas cinzas mistas em uma residência unifamiliar com dois moradores. Os resultados do experimento indicaram uma geração *per capita* de 88,1 L/hab.dia, valor próximo à média da literatura para águas cinzas mistas (101 L/hab.dia), que por sua vez apresentou maior dispersão de dados (Coeficiente de Variação de 9,26% e 33,21%, respectivamente). No cenário experimental, a maior contribuição volumétrica foi proveniente do conjunto máquina de lavar roupas e tanque, seguido pela cozinha, chuveiros e lavatórios, ao passo que a literatura reportou comportamento semelhante, com predominância das mesmas fontes geradoras. Qualitativamente, o efluente experimental apresentou demanda química de oxigênio de 835,3 mg/L, turbidez de 175,0 NTU, concentração de surfactantes de 81,2 mg/L e *E. coli* de $1{,}47\times10^{5}$ NMP/100 mL. Com base na revisão integrativa, conclui-se que a qualidade do efluente é fortemente influenciada pelas fontes geradoras, pela elevada carga orgânica associada à pia da cozinha, bem como por características locais e hábitos dos usuários. Em suma, os resultados demonstram que as águas cinzas mistas em sua maioria não atendem aos critérios de qualidade da NBR 16783:2019, tanto no âmbito experimental quanto na literatura, o que inviabiliza o reúso não potável direto, devido aos riscos sanitários. Ressalta-se, ainda, que a ausência de parâmetros de referência na norma para diversos indicadores qualitativos avaliados constitui uma lacuna crítica na regulamentação vigente, o que torna o monitoramento ainda mais complexo. Assim, os resultados reforçam a necessidade de adotar sistemas de tratamento descentralizados avançados para viabilizar o reúso de forma segura e sustentável em edificações.

Introdução

A escassez de recursos hídricos no mundo está se tornando cada vez mais séria, sendo agravada pela crise climática emergencial (Ren et al., 2020). Apesar dos avanços registrados na última década no acesso à água potável e saneamento básico, a crise global do saneamento persiste segundo Relatório da Organização das Nações Unidas (ONU, 2025), cerca de 2,2 bilhões de pessoas não possuem acesso a fontes de água potável seguras para o consumo. Este cenário demonstra que, para que a população seja devidamente atendida, o ritmo do progresso mundial atual teria de ser quadruplicado.

Diante deste pretexto, conforme Ren et al. (2020), o reúso de águas cinzas (AC) configura-se como uma das abordagens em maior ascensão no âmbito da mitigação da escassez hídrica global. Esta prática alinha-se diretamente à meta número 6 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2025), especialmente no que tange a melhoria da eficiência no uso da água e à ampliação do reúso seguro de efluentes. Assim, é notório que a utilização de sistemas de tratamentos descentralizados para o reúso de AC é uma estratégia inteligente para reduzir os efeitos da crise hídrica, auxiliando na ampliação da oferta de água potável e não potável (Bharti et al., 2023).

Paralelamente, no Brasil, o setor de saneamento enfrenta desafios estruturais de acesso e destinação correta de esgoto, reflexo de lacunas em investimentos e planejamento político. Segundo o Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS, 2022), são 32,1 milhões de pessoas sem acesso à água e 44% da população sem acesso à coleta de esgoto. Esses dados representam um grande desafio ao que se propõe o Marco Legal do Saneamento (Lei 14.026/2020), o qual estabelece que 99% da população deve ter acesso à água potável e 90% à coleta e tratamento de esgoto até 2033 (Brasil, 2020).

Para viabilizar o cumprimento dessas metas, é fundamental a caracterização dos efluentes. As categorias de esgoto doméstico são classificadas de forma simplificada: em águas negras (efluentes com a contribuição de bacias sanitárias) e as AC claras e escuras (Van de Walle et al., 2023). Define-se como AC mistas os efluentes que não possuem contribuição de vasos sanitários, abrangendo as águas descartadas por pias, lavatórios, banheiras, chuveiros e eletrodomésticos em diversos tipos de edificações (Eriksson et al., 2002). Elas representam até 75% do total de efluentes produzidos e, após tratamento adequado, podem ser destinadas a usos como infiltração, irrigação, descarga de bacias sanitárias, lavagem de ruas e carros, etc. (Leal et al., 2011).

Contudo, a composição das AC é altamente heterogênea, dependendo de variáveis como hábitos de consumo, localização geográfica, sistema hidráulico e o tipo de edificação (Shaikh; Ahammed, 2020), o que pode representar um desafio

para os pesquisadores no levantamento qualiquantitativo destes efluentes. Ainda, para ser possível o adequado reúso, o diagnóstico da qualidade da água é empregado na análise de indicadores conhecidos como parâmetros de qualidade da água, que quantificam a concentração de poluentes (biológicos, físicos ou químicos) e determinam as propriedades da água monitorada (ABNT, 2019; ANA, 2023). Diante disso, destaca-se que apesar do elevado potencial do reúso de AC como redutor da escassez hídrica, a grande variabilidade de composição, geração, caracterização e o enquadramento nas normas vigentes se mostra como um desafio na padronização e comparação dos estudos (Shaikh; Ahammed, 2020).

Visando preencher essa lacuna, o presente estudo objetivou analisar a variabilidade qualiquantitativa das AC em edificações residenciais brasileiras por meio de uma revisão integrativa da literatura abrangendo o período de 2005 a 2026. Complementarmente, realizou-se um estudo experimental de caracterização e geração de AC em uma residência unifamiliar em Florianópolis/SC, confrontando os dados com o panorama da literatura e os requisitos da ABNT NBR 16783:2019. A análise estatística permitiu identificar os parâmetros críticos, fornecendo subsídios para a seleção de tecnologias de tratamento descentralizadas e o fomento ao reúso não potável.

Material e Métodos

O delineamento metodológico desta pesquisa estruturou-se na realização de uma revisão integrativa da literatura juntamente com um estudo experimental de caracterização qualiquantitativa em escala real de AC, buscando confrontar os dados empíricos de geração e qualidade do efluente com o panorama observado na literatura, e os padrões normativos vigentes.

A etapa de revisão foi fundamentada nas diretrizes da metodologia de Whittemore e Knafl (2005) adaptada com elementos de transparência do protocolo PRISMA 2020 (Page et al., 2021), incluindo a documentação do processo de seleção dos estudos. Ainda, o método PICo adaptado foi utilizado na construção da pergunta principal do trabalho, definindo as AC mistas como População/Fenômeno; a caracterização qualitativa (sendo parâmetros físico-químicos e os microbiológicos) e quantitativa (vazão e geração per capita) como interesse; e as edificações residenciais do Brasil como o contexto. A partir dessa estrutura, definiu-se a questão norteadora: "Qual é o perfil de variabilidade qualiquantitativa das águas cinzas geradas em edificações residenciais brasileiras, no período de 2005 a 2026, e como esses parâmetros se alinham aos requisitos de reúso não potável da NBR 16783:2019?". A síntese do percurso metodológico adotado para a execução da revisão integrativa está sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 01.

O levantamento bibliográfico foi conduzido utilizando as bases *Scielo, Scopus, Google Scholar, Web of Science,* Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e ao Repositório Institucional da Universidade Federal de Santa Catarina (RI UFSC), utilizando ferramentas como a truncagem e operadores booleanos na formulação da *string* de busca. Foram adotados como critérios de inclusão artigos, teses e dissertações publicados nos idiomas português e inglês entre os anos de 2005 a 2026, e como critérios de exclusão, artigos de revisão, estudos que não analisaram edificações residenciais e no território brasileiro. A estratégia de busca foi estruturada utilizando truncagem (*) e operadores booleanos (AND/OR) para o cruzamento das palavras-chave nos idiomas português e inglês, resultando na seguinte string de busca: *("greywater" OR "graywater" OR "águas cinzas" OR "água cinza") AND ("characterization" OR "caracterização" OR "quali*" OR "quanti*" OR "vazão" OR "flow") AND ("Brazil" OR "Brasil")*.

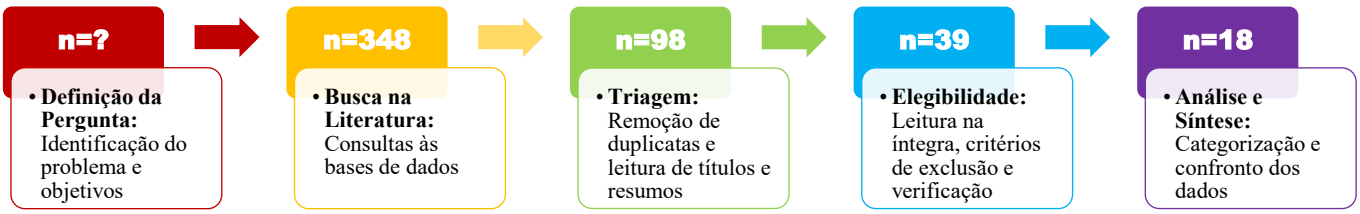


Figura 01: Fluxograma metodológico para a revisão integrativa.
Fonte: Autoria própria (2026) baseado em Whittemore e Knafl (2005).

O processo de seleção sistemática iniciou-se pelo levantamento inicial, que retornou um total de 348 documentos brutos distribuídos entre as bases Google Scholar (236), BDTD (68), Web of Science (23), Scopus (13), RI UFSC (4) e SciELO (3). Após a aplicação dos critérios de inclusão, leitura de títulos e resumos, e remoção de duplicatas, 98 trabalhos foram triados. Subsequentemente, na etapa de elegibilidade, 39 artigos foram avaliados integralmente, resultando, por fim, em uma amostra final consolidada de 18 trabalhos (n=18), selecionados com base nos critérios de exclusão, que possibilitaram a construção da matriz de dados para comparação com a caracterização experimental.

A etapa prática deste estudo foi conduzida no Laboratório de Reúso de Águas (LaRA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e as coletas de AC foram realizadas em uma residência unifamiliar de aproximadamente 80 m² e pavimento único, localizada em um condomínio horizontal no bairro Ribeirão da Ilha, região sul de Florianópolis/SC. A edificação é composta por dois quartos, sala, um banheiro, cozinha e área de serviço equipada com tanque e máquina de lavar roupas (MLR/TQ), abrigando dois moradores. Os pontos de coleta foram definidos com base nas fontes geradoras de AC existentes, englobando o lavatório (a), o chuveiro, a pia da cozinha (b) e o conjunto MLR/TQ (c), enquanto o sistema de coleta consistiu na conexão de um sifão à saída de cada ponto gerador, direcionando o fluxo para reservatórios graduados de 100 L. O volume acumulado foi registrado separadamente por ponto de geração e todos os efluentes coletados foram posteriormente levados à um tanque de equalização (d) para a homogeneização final, assim como ilustrado na Figura 02.

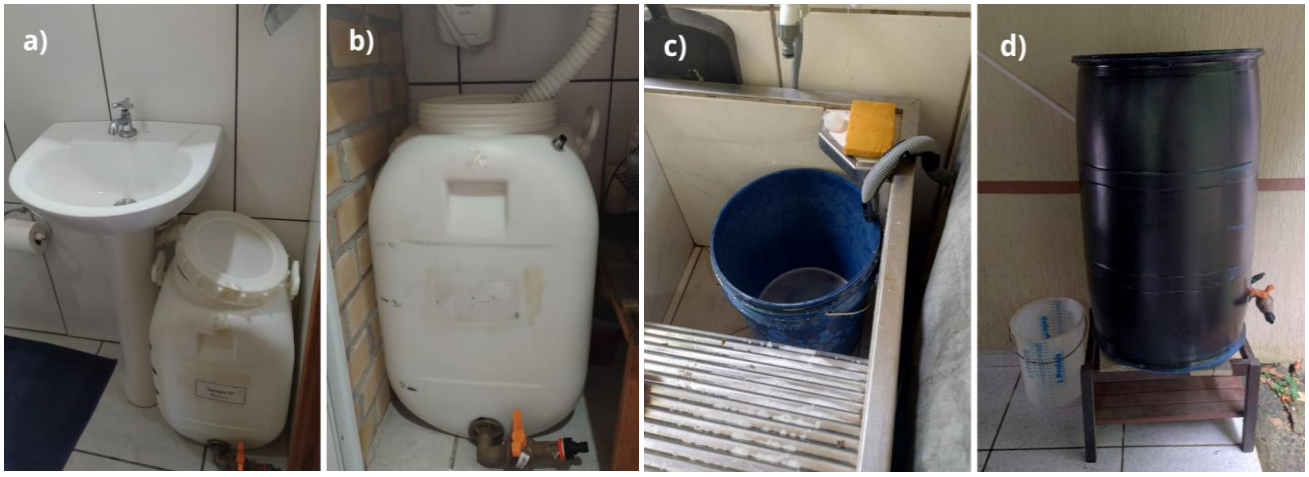


Figura 02: Pontos de coleta e reservatório de águas cinzas.
Fonte: Autoria própria (2026). Legenda: a) lavatório, b) pia da cozinha, c) MLR/TQ, d) tanque de equalização.

Para estimar a contribuição de cada fonte geradora, a caracterização quantitativa baseou-se em medições diretas de vazão, de acordo com uma adaptação das metodologias utilizadas por Ghisi e Ferreira (2007), Couto (2012) e Santos (2019). Foram realizadas três campanhas de monitoramento durante os meses de fevereiro e março de 2026, com duração de 24 horas contínuas (das 07h00 às 07h00 do dia subsequente). Durante as campanhas, registraram-se a temperatura e as condições climáticas, fatores que podem influenciar o comportamento dos usuários e a geração de efluentes. A partir destes dados, a geração per capita diária de AC foi estimada conforme a Equação (01) abaixo:

$$q = \frac{V}{(T \,.\, U)} \qquad (01)$$

Onde: *q é geração per capita de água cinza por dia (L/hab.dia); V é o volume mensurado (L); T é o tempo de coleta (d) e U é número usuários ou habitantes.*

A seguir, deu-se início às análises qualitativas, para quais as AC foram coletadas e acondicionadas em frascos sob refrigeração entre 2 °C e 4 °C, em conformidade com as diretrizes dos Standard Methods (APHA, 2017). As análises laboratoriais físico-químicas foram executadas em até 48 horas após a coleta, abrangendo parâmetros como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5), Nitrogênio Total (NT), Nitrogênio Amoniacal (NH_4^+), ortofosfatos, surfactantes, série de sólidos, turbidez, Condutividade Elétrica (CE) e pH, conforme indicado na Tabela 01. Para as análises microbiológicas, realizadas em até 24 horas, empregou-se o método Colilert®/Quanti-Tray para a detecção e quantificação de *E. coli* e coliformes totais.

Parâmetro	Metodologia - Standard Methods	Parâmetro	Metodologia - Standard Methods
DQO	5220 D – Closed Reflux, Colorimetric Method	SSV	2540 E – Volatile Suspended Solids (VSS)
DBO_5	5210 B – 5-Day BOD Test	Surfactantes	5540 C – MBAS Method
NT	4500-N C – Persulfate Method	Turbidez	2130 B – Nephelometric Method
$N–NH_4^+$	4500-NH_3 C – Nesslerization Method	CE	2510 B – Laboratory Method
$P–PO_4^{3-}$	4500-P C – Vanadomolybdophosphoric Acid Method	pH	4500-H^+ B – Electrometric Method
SST	2540 D – Total Suspended Solids (TSS)		

Tabela 01: Análises físico-químicas realizadas nas AC brutas do estudo experimental.
Fonte: APHA et al. (2017).

Por fim, os dados quantitativos e qualitativos das AC analisadas juntamente dos extraídos da revisão integrativa foram submetidos à análise estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, mínimos e máximos e Coeficiente de Variação (CV)) para a consolidação de perfil característico. A avaliação do potencial de reúso não potável do efluente do presente estudo foi conduzida pela comparação dos resultados físico-químicos e microbiológicos com a diretriz de qualidade nacional e o levantamento bibliográfico. Para a determinação das restrições de uso, adotaram-se os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16783:2019, avaliando a qualidade das AC quanto à finalidade de reúso (ABNT, 2019).

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos a partir da análise estatística da amostra estudos (n=18) e os do presente estudo experimental foram compilados e analisados em dois eixos principais: os aspectos quantitativos de geração, e a caracterização físico-química e microbiológica confrontada com as diretrizes da ABNT NBR 16783:2019. Os efluentes foram classificados em águas cinzas claras (ACC), águas cinzas escuras (ACE) e águas cinzas mistas (ACM), correspondendo, respectivamente, aos efluentes vindos

dos lavatórios, chuveiros, máquina de lavar roupas e tanque; aos efluentes oriundos da pia de cozinha e lava-louças; e à combinação dessas correntes (Fiori et al., 2006). As ACC apresentam coloração mais clara e menor concentração de poluentes em comparação aos demais efluentes domésticos, ao passo que as ACE geralmente possuem maior presença de matéria orgânica e óleos e gorduras, que aumentam sua complexidade. Sobretudo, as ACM também apresentam grande potencial de aplicação, uma vez que não possuem aporte de efluentes da bacia sanitária (Peters, 2006).

Introduzindo o primeiro eixo, a Tabela 02 apresenta a análise estatística dos resultados quantitativos de geração total e *per capita* obtidos no presente estudo e na revisão integrativa.

Parâmetro/Fonte	**Estudo Experimental[1]**		**Autores (n=11)[2]**		**Autores (n=3)[3]**	
Tipologia de AC	**ACM**		**ACM**		**ACC**	
Geração	Total (L/dia)	*per capita* (L/hab.d)	Total (L/dia)	*per capita* (L/hab.d)	Total (L/dia)	*per capita* (L/hab.d)
Média	176,2	88,1	757	101	285	69
Desvio Padrão	16,31	8,16	1037,12	33,45	53,03	34,83
Mediana	172,5	86,25	401	100	285	62
Mínimo – Máximo	162 -194	81- 97	169 - 3092	60 - 150	247 - 1037	39 - 107,4
CV	9,26%	9,26%	137,10%	33,21%	18,63%	50,18%

Tabela 02: Características quantitativas de águas cinzas provenientes de instalações residenciais. Fonte: [1] [Autoria própria (2026)]; [2] [Souza et al. (2023), Pertel (2009), Oliveira (2014), Costa et al. (2022), Magalhães et al. (2021), Peters (2006), Fiori et al. (2006), Rosa (2019), Cruz (2021)]; e [3] [Busico (2019), Magalhães et al. (2021), Pires (2012)]. Legenda: ACM - águas cinzas mistas, ACE - águas cinzas escuras e ACC - águas cinzas claras.

Observa-se que a geração *per capita* no presente estudo (88,1 L/hab.d) encontra-se próxima à média reportada para ACM na literatura (101 L/hab.d), porém com uma variabilidade significativamente inferior. O coeficiente de variação (CV) obtido neste estudo foi de apenas 9,26%, evidenciando estabilidade dos dados, enquanto os valores da literatura indicam maior dispersão, especialmente para ACM em termos de geração total (CV = 137,10%) e para ACC em termos per capita (CV = 50,18%). Essa diferença evidencia que, embora existam valores médios representativos, a geração de AC é fortemente dependente de fatores locais, como hábitos de consumo, frequência de uso de equipamentos, número de usuários e características da edificação (Eriksson et al., 2002; Shaikh; Ahammed, 2020). Neste trabalho, a baixa variabilidade pode ser atribuída ao controle das condições experimentais e à constância do perfil de consumo da residência unifamiliar analisada, enquanto a elevada dispersão observada na literatura reflete a heterogeneidade dos cenários avaliados, embora tenham sido selecionados estudos com perfis semelhantes, variando entre edificações e residências unifamiliares urbanas e rurais (Souza et al., 2023, Pertel, 2009).

A análise das medianas calculadas reforça esse perfil. No estudo experimental, a proximidade entre média (88,1 L/hab.d) e mediana (86,25 L/hab.d) indica uma distribuição homogênea e ausência de valores extremos relevantes. Em contrapartida, na literatura, observa-se maior amplitude nos dados, especialmente para ACM, cuja geração total varia de 169 a 3092 L/dia, com mediana de 401 L/dia e média de 757 L/dia, evidenciando a presença de valores extremos associados a diferentes escalas de estudo. Para ACC, embora a dispersão seja menor em termos de geração total (CV = 18,63%), a variabilidade per capita permanece elevada, com valores entre 39 e 107,4 L/hab.d.

Além disso, observa-se que a geração per capita média de ACM (101 L/hab.d) é superior à de ACC (69 L/hab.d), o que pode ser explicado pela composição predominantemente da segunda por águas de chuveiros e lavatórios, enquanto as ACM incluem também contribuições de cozinha e lavanderia, que podem representar volumes significativos do todo. Não obstante, a variabilidade mais elevada observada para ACC (CV = 50,18%) pode ser atribuída à natureza altamente dependente do comportamento dos usuários. As diferenças na escala dos estudos podem se comportar como um *contextual outlier* dentre os dados, ou seja, um padrão que não se conforma a uma noção bem definida de normalidade entre os valores analisados (Singh e Upadhyaya, 2012). Nesse contexto, a variação temporal da geração de AC tem influência direta no dimensionamento e na operação de sistemas descentralizados de tratamento (Spychala et al., 2020).

Complementarmente, a Figura 03 apresenta a distribuição percentual da geração de águas cinzas por fonte, permitindo interpretar como os volumes totais discutidos anteriormente se distribuem entre os diferentes pontos geradores. Observa-se, inicialmente, que em ambos os cenários as maiores contribuições estão associadas ao conjunto MLR/TQ e aos chuveiros, confirmando o papel predominante dessas fontes na geração de AC em ambientes residenciais. No estudo experimental, a maior parcela foi atribuída ao MLR/TQ (41,0%), seguida pelos chuveiros (24,0%) e pela cozinha (26,1%), enquanto os lavatórios representaram a menor contribuição (9,3%). Esse padrão indica uma maior influência das atividades de lavagem de roupas na residência analisada, possivelmente associada à frequência de uso do tanque e da máquina (com dois usos diários registrados neste estudo), além de volume elevado por ciclo (chegando a 71, 65 e 80 litros por dia nas três coletas realizadas). Além disso, a contribuição significativa da cozinha sugere hábitos de consumo que envolvem elevado uso de água, potencialmente relacionado à lavagem de utensílios e preparo de alimentos.

Por outro lado, os dados da revisão integrativa mostram uma distribuição mais equilibrada, com destaque para os chuveiros (34,6%) e para o conjunto MLR/TQ (35,2%), seguidos pela cozinha (19,0%) e pelos lavatórios (11,7%). Esse padrão reforça que, em escala mais ampla, os chuveiros tendem a assumir maior relevância na geração de AC, devido à frequência de uso em relação ao conjunto MLR/TQ e ao volume associado aos banhos (Fiori et al., 2006; Peters, 2006; Rosa, 2019).

De forma geral, os resultados demonstram que a caracterização quantitativa das AC deve ser analisada de forma integrada à sua origem e suas características gerais, que são determinantes para a qualidade do efluente, uma vez que as ACM e

principalmente as ACE são reconhecidas por introduzir maior carga orgânica, sólidos e compostos químicos, como os surfactantes (Fiori et al., 2006; Leal et al., 2011).Dessa forma, realizar um estudo prévio à adoção de estratégias como a segregação e tratamento na fonte torna-se fundamental para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, seguros e adequados às condições reais de operação (Bharti et al., 2023; Leal et al., 2011).

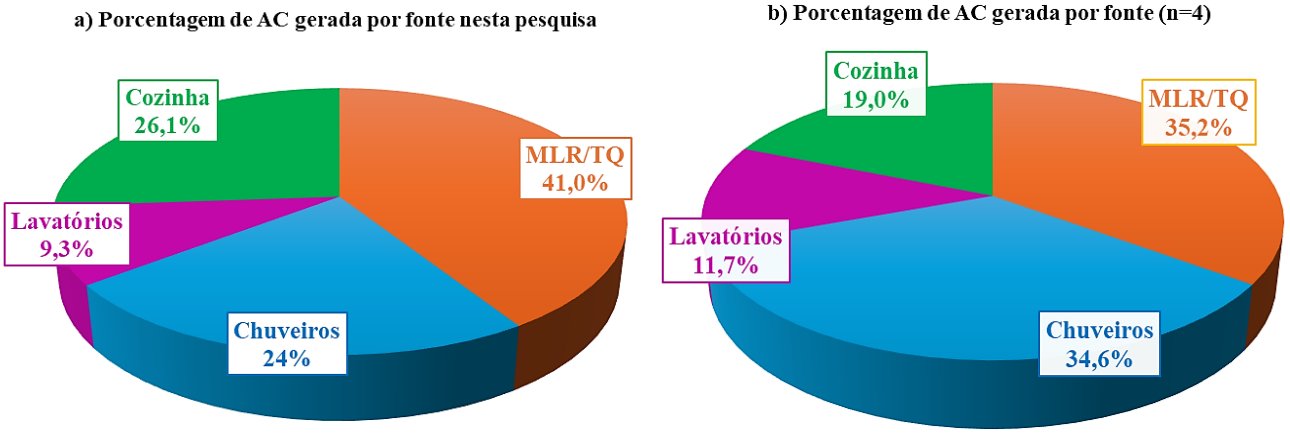


Figura 03: Percentual de geração de AC residencial por fonte.
Fonte: a) Autoria Própria (2026); b) Peters (2006), Busico (2019), Fiori et al. (2006) e Rosa (2019).

Visto isso, a integração entre os resultados da Tabela 02 e da Figura 03 evidencia que a variabilidade observada na literatura não está relacionada apenas ao volume total gerado, mas também à contribuição relativa de cada fonte, que pode variar significativamente em função de fatores como número de moradores, hábitos de consumo, frequência de uso de equipamentos e características socioeconômicas. Essa variabilidade reforça a necessidade de abordagens descentralizadas e específicas para o dimensionamento de sistemas de tratamento e reúso, uma vez que a adoção de valores médios da literatura pode não representar adequadamente a realidade local. Ainda, essa relação é fundamental para a interpretação dos resultados qualitativos, uma vez que a composição físico-química do efluente está diretamente associada às atividades que lhe deram origem, como em fontes com maior carga poluidora, como a pia da cozinha (ACE), que influencia diretamente nos parâmetros de qualidade como DQO, sólidos e surfactantes.

A investigação dos parâmetros físico-químicos das AC é fundamental para avaliar suas propriedades e identificar contaminantes que possam comprometer o reúso, como compostos orgânicos e inorgânicos, sólidos suspensos e nutrientes, considerados fatores determinantes para a definição dos procedimentos do posterior tratamento (Pires, 2012). Assim, estão apresentados na Tabela 03, os resultados da caracterização físico-química e microbiológica das águas cinzas avaliadas no estudo experimental (EE), os valores observados na literatura, e a norma vigente como limite comparativo, denotando como o perfil quantitativo anteriormente discutido reflete, também, na qualidade do efluente gerado.

Observa-se de início que apesar dos padrões da NBR 16783:2019 representarem as principais diretrizes nacionais de reúso não potável (ABNT, 2019), a norma apresenta lacunas importantes, com a ausência de limites para diversos contaminantes e parâmetros relevantes, como DQO, ortofosfato, amônia, nitrogênio total, alumínio, surfactantes, sólidos suspensos, dentre outros. Essa ausência evidencia a escassez de regulamentações abrangentes no Brasil e aponta para a necessidade de desenvolvimento de normas complementares, assim como para a realização de estudos que integrem avaliação de riscos à saúde e ao meio ambiente, principalmente em sistemas descentralizados de tratamento de águas cinzas.

Quanto às médias qualitativas relatadas nos experimentos e dispostas na Tabela 03 abaixo, o pH médio de 6,3 apresentou-se próximo à neutralidade, semelhante à média da literatura para ACM (7,19), ambos atendendo aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 16783:2019 de 6,0 a 9,0. Essa condição é tecnicamente favorável, pois reduz a necessidade de correções químicas prévias e favorece a aplicação de processos biológicos e físico-químicos.

Adicionalmente, a carga orgânica (DQO) do estudo experimental (835,3 mg/L) apresentou-se elevada, superando a média da literatura para ACM (774,19 mg/L) e das ACC (574,3 mg/L). Esse valor reflete diretamente a contribuição da pia da cozinha (como nas ACE, com 2331,0 mg/L de DQO), principal responsável pela introdução de óleos, graxas e compostos orgânicos complexos, conforme descrito por Leal et al. (2011) e Eriksson et al. (2002). Embora as normas brasileiras não estabeleçam limites para DQO, os valores elevados estão associados ao alto consumo de oxigênio dissolvido e à geração de odores. Paralelamente, a DBO_5 (264,7 mg/L) indica que parcela significativa dessa carga é biodegradável.

Já as concentrações de NT (15,3 mg/L) e ortofosfatos (2,9 mg/L) foram relativamente moderadas, assim como o esperado em efluentes sem contribuição de águas negras, também atendendo aos limites normativos para reúso. Ainda assim, as AC carecem de monitoramento em aplicações como infiltração no solo ou irrigação, dado seu potencial de eutrofização (Pires, 2012). Em contrapartida, os surfactantes (81,2 mg/L) demonstraram valor crítico, muito superior ao limite estabelecido pela norma (0,5 mg/L). Essa concentração costuma ser relacionada ao uso intensivo de detergentes e sabões, representando um fator limitante relevante, dado que surfactantes podem inibir processos biológicos, reduzir a transferência de oxigênio e causar formação de espuma persistente (Eriksson et al., 2002).

Referência	Tipo AC	pH	CE (µS/cm)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Ortofosfato (mg/L)	N–NH_4^+ (mg/L)	NT (mg/L)	Al (mg/L)	DBO (mg/L)
Autores[1] (n=6)	**ACC**	7,7 ± 1,2	744,0 ± 763,3	43,4 ± 46,5	574,3 ± 390,0	5,1 ± 0,0	8,4 ± 4,4	74,3 ± 73,2	-	83,0 ± 52,8
Autores[2] (n=1)	**ACE**	5,5 ± 0	400,0 ± 0	242,0 ± 0	2331,0 ± 0	-	-	9,5 ± 0	-	-
Autores[3] (n=11)	**ACM**	7,19 ± 1,19	1929,46 ± 2139,72	146,18 ± 146,03	774,19 ± 480,86	27,97 ± 47,58	5,38 ± 3,55	18,14 ± 23,88	-	420,00 ± 280,41
EE[4]		6,3 ± 1,1	378,1 ± 263,2	175,0 ± 53,7	835,3 ± 86,9	2,9 ± 1,2	4,3 ± 1,7	15,3 ± 3,2	0,04 ± 0,03	264,7 ± 34,9
Mediana EE	-	6,7	271,0	145,0	836,0	2,9	3,9	14,0	0,0	278,3
Mín-Máx EE		5,0 - 7,0	185,3 - 678,0	143,0 - 237,0	748,0 - 921,7	1,8 - 4,1	2,9 - 6,1	13,0 - 19,0	0,02 - 0,07	225,0 - 290,7
NBR 16783:2019[5]	**-**	**6,0–9,0**	**≤ 3200**	**≤ 5**	-	-	-	-	-	**≤ 20**

Referência	Tipo AC	Surfactantes (mg/L)	ST (mg/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes totais (NMP ou UFC/100 mL)	*E. coli* (NMP ou UFC)
Autores[1] (n=6)	**ACC**	3,6 ± 1,5	1649,1 ± 1899,6	-	357,6 ± 371,8	$2,15\times10^6 \pm 3,84\times10^6$	$1,80\times10^9 \pm 3,60\times10^9$
Autores[2] (n=1)	**ACE**	-	-	-	1109,0 ± 0	$2,40 \times 10^7 \pm 0$	$2,10\times10^6 \pm 0$
Autores[3] (n=11)	**ACM**	29,90 ± 0,00	1459,6 ± 764,7	-	208,70 ± 130,78	$1,65\times10^7 \pm 2,46\times10^7$	$6,82\times10^5 \pm 1,12\times10^6$
EE[4]		81,2 ± 93,3	720,5 ± 62,2	332,8 ± 36,1	371,7 ± 46,7	$>2,42 \times 10^5$	$1,47\times10^5 \pm 1,29\times10^5$
Mediana EE	-	81,2	695,6	337,3	353,0	$>2,42 \times 10^5$	$1,99\times10^5$
Mín-Máx EE		15,2 - 147,1	674,7 - 791,3	294,7 - 366,5	337,3 - 424,8	-	$8,30\times10^2$ - $2,42\times10^5$
NBR 16783:2019[5]	**-**	-	-	**≤ 2000**	**≤ 100**	-	**≤ 200**

Tabela 03: Síntese da caracterização qualitativa de AC residenciais e comparação com a norma. Fonte: [4] [Autoria própria (2026)]; [1] [Resende (2022), Fiori et al. (2006), Figueiredo et al. (2019), Costa (2020), Rosa (2019) e Magalhães et al. (2021)]; [2] [Figueiredo et al. (2019)]; [3] [Monteiro (2023), Oliveira (2014), Freitas (2011), Costa et al. (2022), Pires (2012), Pansonato (2010), Figueiredo et al. (2019), Valle et al. (2026), Peters (2006), Magalhães et al. (2021)]; e [5] [ABNT (2019)]. Legenda: [4] EE - Estudo experimental.

Enquanto isso, a turbidez (175,0 ± 53,7 NTU) apresentou-se superior à média reportada na literatura para ACM (146,18 NTU) e excedeu os limites estabelecidos para reúso. Mesmo para as classes menos restritivas (≤ 5,0 NTU), os valores observados indicam a necessidade de remoções superiores a 95% para atendimento aos padrões normativos. Esse comportamento está diretamente associado aos SST (371,7 mg/L), que representam mais de 50% dos sólidos totais (720,5 mg/L), havendo predominância de material particulado e coloidal. Esse perfil incentiva a aplicação de processos de separação física, como as membranas, ao passo que evidencia elevado potencial de colmatação *(fouling*), especialmente devido à contribuição da lavanderia e da cozinha (Spychala et al., 2020).

Ainda assim, o resultado indica que as concentrações reais são ainda superiores, reforçando a presença de vida microbiana associada a atividades como higiene pessoal, lavagem de roupas e manipulação de alimentos, o que reforça a forte influência de fatores comportamentais na composição das AC (Eriksson et al., 2002).

Em suma, os resultados demonstram que, embora a geração de AC apresente relativa estabilidade quantitativa no contexto experimental, sua qualidade é significativamente impactada pelas fontes geradoras e pelo aporte de cargas poluidoras das mesmas. Comparando os dados da Tabela 03 com as normas, verifica-se que nem as AC brutas do experimento, tampouco as levantadas na literatura, atendem boa parte dos critérios de qualidade estabelecidos para reúso não potável principalmente quanto à turbidez, SST, surfactantes e *E. coli*. Em consonância, a contribuição de ACE, especialmente da pia de cozinha (26,1 a 19% do volume total), eleva a DQO e a complexidade do efluente, necessitando do emprego de sistemas de tratamento capazes de remover de forma eficiente os contaminantes.

Considerações Finais

O perfil qualiquantitativo das AC residenciais no contexto brasileiro durante os últimos 20 anos levantado evidencia a influência da variabilidade como um dos principais fatores influenciando o desempenho e a viabilidade de sistemas de reúso não potável. A análise experimental conduzida em Florianópolis/SC indicou uma geração per capita de 88,1 L/hab.d, valor compatível com a literatura, e com variabilidade relativamente reduzida, o que reforça a consistência dos dados coletados e a importância da realização de estudos locais para o dimensionamento de sistemas de tratamento descentralizados.

Sob o ponto de vista qualitativo, foi constatado que a composição do efluente é fortemente influenciada pela inclusão de ACE da pia de cozinha, que eleva a carga orgânica e a complexidade do efluente. As concentrações observadas de DQO e surfactantes evidenciam um efluente mais carregado em relação as ACC, enquanto os indicadores microbiológicos, com valores de *E. coli* superiores a $2{,}42\times10^5$ NMP/100 mL, confirmam a presença de risco sanitário, mesmo sem a contribuição de águas negras. A comparação destes e dos dados levantados na revisão integrativa com os padrões estabelecidos pelas normas vigentes demonstrou que o efluente bruto não atende aos critérios de qualidade para reúso não potável, principalmente em função da turbidez, dos sólidos suspensos, dos surfactantes e da carga microbiológica. Por fim, conclui-se que, embora as AC representem uma alternativa promissora na redução da demanda de água não potável em edificações urbanas, sua utilização segura depende da compreensão de sua variabilidade qualiquantitativa e da adoção de estratégias de tratamento compatíveis.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), Edital 21/2024, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Laboratório de Reúso de Águas (LaRA) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Relatório de gestão e situação dos recursos hídricos**: síntese 2023. Brasília, DF: ANA, 2023.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd ed. Washington: American Public Health Association, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16783:2019**: Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações – Requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BHARTI, M.; DAS, P. P.; PURKAIT, M. K. A review on the treatment of water and wastewater by electrocoagulation process: Advances and emerging applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 111558, 2023.

BRASIL. [Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020]. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento [...]**. Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 4 abr. 2026.

BUSICO, R. M. **Projeto para reuso de águas cinzas em uma residência unifamiliar**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

COSTA, J. P. S. **Caracterização, tratamento e reúso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

COSTA, R. O. *et al*. Tratamento de água cinza para reúso agrícola no semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 767-776, 2022.

COUTO, M. C. C. **Potencial de economia de água potável por meio do uso de fontes alternativas em um edifício residencial em Florianópolis**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

CRUZ, J. S. **O reúso de águas cinzas na agricultura familiar: benefícios, desafios e perspectivas no semiárido nordestino**. 2021. Monografia (Especialização em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

ERIKSSON, E. *et al*. Characteristics of greywater. **Urban Water**, v. 4, n. 1, p. 85-104, 2002.

FIGUEIREDO, I. C. S. **Tratamento de esgoto na zona rural: diagnóstico participativo e alternativas tecnológicas**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

FIORI, M. G. *et al*. Aproveitamento de águas cinzas para fins não potáveis em residências. In: SEMINÁRIO DE GESTÃO DA ÁGUA EM EDIFICAÇÕES, 3., 2006, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: 2006.

FREITAS, J. G. **Reaproveitamento de águas cinzas e pluviais**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GHISI, E.; FERREIRA, D. F. Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 42, n. 4, p. 1912-1922, 2007.

LEAL, L. *et al*. Characterization and biological treatment of greywater. **Water Science and Technology**, v. 63, n. 8, p. 1661-1668, 2011.

MAGALHÃES, R. O. C. *et al*. Tratamento de água cinza visando o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, v. 15, n. 1, p. 1-15, 2021.

MONTEIRO, P. A. M. *et al*. Viabilidade do reuso de águas cinzas em residências no Brasil: parâmetros técnicos e requisitos legais. **Revista Internacional de Ciências**, v. 13, n. 3, p. 238-260, 2023.

OLIVEIRA, S. M. **Caracterização de águas cinzas e negras de origem residencial e análise da eficiência de reator anaeróbio com chicanas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **The Sustainable Development Goals Report 2025**. New York: United Nations, 2025.

PAGE, M. J. *et al*. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, 2021.

PANSONATO, N. **Caracterização e tratamento de águas cinzas visando o reúso em edificações**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

PERTEL, M. **Caracterização qualitativa e quantitativa de águas cinzas e avaliação de um sistema de reúso em um edifício residencial de baixa renda**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PETERS, M. R. **Reúso de águas cinzas para descarga em bacias sanitárias**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PIRES, L. H. P. **Potencial de economia de água potável através do reúso de águas cinzas em uma residência unifamiliar**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

REN, X. *et al*. Removal of personal care products in greywater using membrane bioreactor and constructed wetland methods. **Science of the Total Environment**, v. 797, p. 148773, 2021.

RESENDE, Ingrid Daiane. **Avaliação do desempenho do processo de ultrafiltração aplicado a efluentes de lavanderia visando o reúso e sua viabilidade ambiental**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos e Processos) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

ROSA, M. V. S. **Avaliação da viabilidade de reúso de águas cinzas claras em residências unifamiliares**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

SANTOS, G. O. **Caracterização de águas cinzas e proposta de sistema de tratamento para reúso em edificação escolar**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

SHAIKH, I. N.; AHAMMED, M. M. Quantity and quality of greywater and its reuse in the household: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 273, 111108, 2020.

SINGH, K.; UPADHYAYA, S. Outlier detection: applications and techniques. **International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)**, v. 9, n. 1, p. 307, 2012.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022.

SOUZA, V. C. *et al*. Reúso de águas cinzas em residências unifamiliares: avaliação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 14, n. 1, p. 45-58, 2023.

SPYCHALA, M. *et al*. Greywater Characterization and Treatment by Using a Multistage Filtration System. **Sustainability**, v. 12, n. 11, 4611, 2020.

VALLE, Daniela Silva Gomes Moreira do *et al*. Greywater use in anaerobic digestion of cattle manure: Advancing biogas yield, energy efficiency, and digestate valorization for environmental sustainability in semi-arid regions. **Science of the Total Environment**, v. 1016, 181439, 2026.

VAN DE WALLE, A. *et al*. Characterization and classification of greywater: A review. **Water Research**, v. 243, 120358, 2023.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

BIOAUMENTACIÓN CON *Bacillus thuringiensis* INMOVILIZADO EN CÁSCARAS DE ARROZ PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE CELULOSA EN LAGUNA AIREADA FACULTATIVA A ESCALA PILOTO

Jose Antonio Villamizar Florez, Isabela Rita dos Santos Rossi, Esther Soares Assunção Maia, Luiza Silva Dias, Gustavo Henrique Couto, Claudia Regina Xavier

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: joseantonioflorez@alunos.utfpr.edu.br; isabelarossi@alunos.utfpr.edu.br; estherassuncao@alunos.utfpr.edu.br; luizadias.sn@gmail.com; cxavierutfpr@gmail.com; ghcouto@gmail.com

Palavras-chave: tratamento biológico; cáscaras de arroz; bactérias autóctonas

Resumen

La industria de la celulosa genera efluentes con alta carga de materia orgánica y compuestos recalcitrantes derivados de la lignina, cuyo tratamiento en lagunas aireadas facultativas (LAF) presenta limitaciones. Este estudio evaluó la bioaumentación mediante *Bacillus thuringiensis* inmovilizado en cáscaras de arroz en una LAF piloto de 1 m^3 operada durante 112 días en paralelo a una LAF industrial en Curitiba, Brasil. La operación se desarrolló en tres etapas: estabilización, choques orgánicos y choques con bioaumentación, bajo una carga orgánica volumétrica (COV) de 0,1 kg DQO·m^{-3}·d^{-1} y tiempo de retención hidráulica (TRH) de 2,45 ± 0,24 días. La dosis óptima del bioproducto se determinó mediante ensayos en lote, evaluando DQO, compuestos fenólicos totales, lignínicos, aromáticos, lignosulfónicos y color. En la LAF piloto se monitorearon estos mismos parámetros para evaluar la eficiencia del tratamiento en todas las etapas. En los ensayos en lote, la mayor remoción de DQO (56%) se alcanzó a 0,2 g·L^{-1} y 5 días de TRH, superando los controles. Durante la operación piloto, la bioaumentación permitió remociones medias de DQO y DBO_5 de 50% y 60%, respectivamente. El sistema frente a choques orgánicos tuvo remociones de 35% para la DQO y 44% para la DBO_5. La remoción de compuestos específicos fue variable, destacando mejoras en los compuestos fenólicos totales y turbidez, mientras que el color mostró menor respuesta de remoción. La fluorescencia obtenida mediante matrices de excitación-emisión evidenció biotransformación parcial de compuestos derivados de la lignina bajo bioaumentación. En conclusión, la bioaumentación con *B. thuringiensis* inmovilizado contribuye a la resiliencia y estabilización de la materia orgánica biodegradable en LAF, constituyendo una estrategia prometedora para mejorar el tratamiento de efluentes de la industria de celulosa.

Introducción

La industria de la celulosa es un sector clave de la economía global, destacándose Brasil como uno de los principales actores, con una producción de más 29 millones de toneladas en 2024, posicionándolo como el segundo mayor productor y el principal exportador a nivel mundial (IBÁ, 2025). Entre los procesos de obtención de celulosa a partir de fibras vegetales, destaca el pulpado químico o proceso Kraft, el cual demanda un elevado consumo de agua y genera efluente con alta carga de materia orgánica y compuestos recalcitrantes, especialmente derivados de la lignina (NUNES et al., 2022). Estos efluentes son comúnmente tratados mediante lagunas aireadas facultativas, que pueden remover hasta el 80% de la materia orgánica; sin embargo, presentan limitaciones en la degradación de compuestos de origen lignínicos, así como en la remoción del color asociado (COELHO et al., 2024). En este contexto, la bioaumentación surge como una alternativa para mejorar su tratamiento mediante la incorporación de microorganismos específicos, los cuales pueden ser aplicados de forma inmovilizada para aumentar su estabilidad en el sistema (GUPTA; KAPOOR, 2024). En función de lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la bioaumentación *con Bacillus thuringiensis* inmovilizado en cascaras de arroz en una laguna aireada facultativa a escala piloto para el tratamiento de efluentes de la industria de celulosa.

Materiales y Métodos

Para determinar la dosis optima del bioproducto a utilizar en la LAF a escala piloto durante la etapa de bioaumentación, se realizó un ensayo en lote basado en un diseño compuesto central, en el que se evaluaron tres concentraciones de bioproducto (A: 0,2 g·L^{-1}; B: 0,5 g·L^{-1}; C: 1,0 g·L^{-1}) y tres TRH (2, 5 y 7 días) bajo aireación continua, empleando la relación de nutrientes de 100:0,5:0,1 para DQO:N:P e inoculo inicial de biomasa de 70 mg SSV·L^{-1}, siendo el punto central la concentración B (0,5 g·L^{-1}) y un TRH de 5 días. Adicionalmente, se consideraron los siguientes controles: solamente el efluente (E), efluente más biomasa (E+Bi) y efluente con cáscaras sin biomasa o bacterias inmobilizadas (E+Cas). La dosis fue definida por el software estadístico Minitab mediante el índice de deseabilidad compuesta.

La laguna aireada facultativa (LAF) a escala piloto fue instalada y operada en paralelo a una LAF de una industria de celulosa localizada en la Región Metropolitana de Curitiba. Para su simulación, se utilizó un reactor de fibra de vidrio de 1 m^3, adaptado con un tabique transversal posicionado a 2/3 de la longitud desde la entrada, diferenciándose una zona de aireación, con concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 2,0 mg·L^{-1}, y una zona de sedimentación de sólidos. El sistema fue aireado mediante dos bombas de aire (BOYU SC-7500) y operado en condiciones ambientales, siendo inoculado inicialmente con

biomasa (70 mg SSV·L⁻¹) y una relación de nutrientes de 100:0,5:0,1 para DQO:N:P. El afluente fue conducido por gravedad desde una laguna de decantación primaria, controlándose el caudal para mantener una carga orgánica volumétrica de aproximadamente 0,1 kg DQO·m⁻³·d⁻¹ y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 2,45 ± 0,24 días, mientras que el efluente tratado fue descargado en la LAF de la industria. El sistema fue operado durante 112 días en tres etapas: i) estabilización; ii) choques orgánicos, en los cuales se aplicó un efluente de mayor concentración durante 4 horas para incrementar la carga orgánica volumétrica en cinco veces; iii) choques orgánicos con bioaumentación, bajo condiciones similares a la etapa anterior, en los que se adicionaron bacterias inmovilizadas en cáscaras de arroz (bioproducto) en una dosis por evento.

En la LAF piloto la eficiencia fue evaluada mediante la remoción de DQO, DBO_5 (APHA, 2022), compuestos fenólicos totales (CFT), compuestos lignínicos (CL), compuestos aromáticos (CA), compuestos lignosulfónicos (CLS), color y turbidez (NUNES et al., 2022), y, de forma complementaria, se analizó la fluorescencia de la materia orgánica durante las etapas ii y iii por medio de matrices de excitación-emisión (MEE) en el rango de 220–540 nm y 240–550 nm, empleando la técnica de *peak-picking* (RODRÍGUEZ et al., 2022). En el ensayo en lote se evaluaron DQO, CFT, CL, CA, CLS y color.

Resultados y Discusión

Evaluación de la bioaumentación en lote con *Bacillus thuringiensis*

En la Figura 1 se muestran las remociones de la DQO, compuestos específicos y color durante el ensayo de bioaumentación en lote.

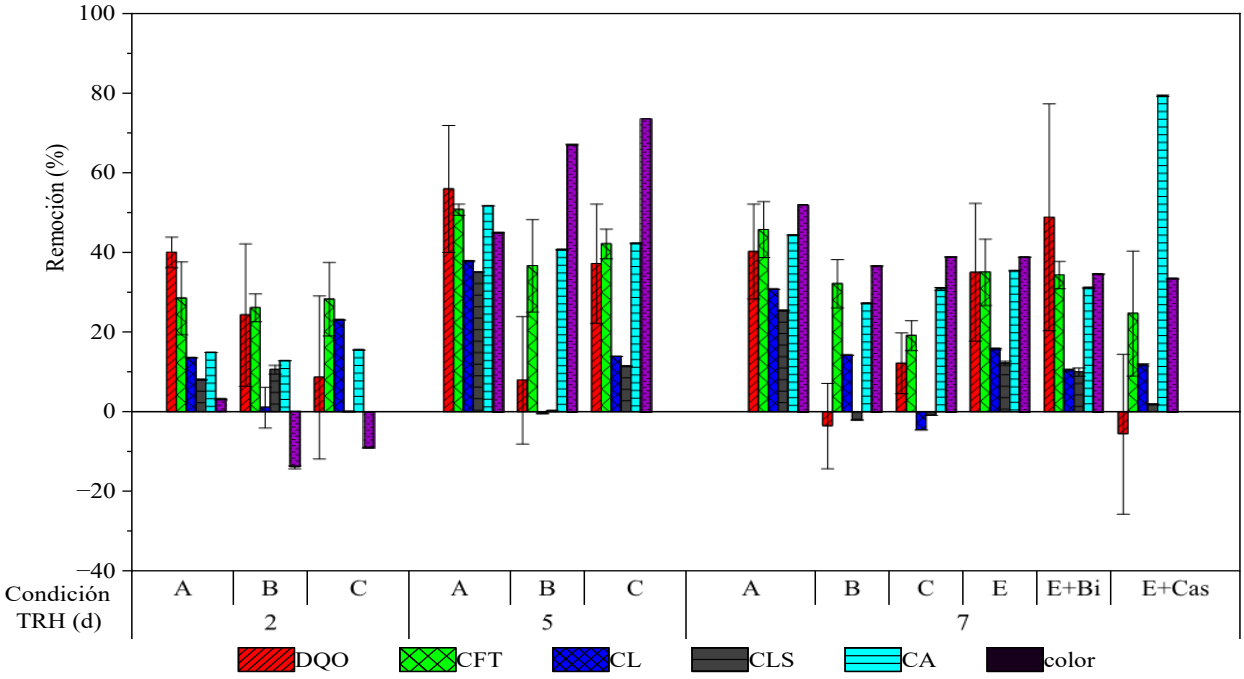


Figura 1: Desempeño de la bioaumentación en la remoción de DQO y compuestos específicos en el ensayo por lote. Fuente: Los autores (2026)

La mayor remoción se obtuvo en la concentración A (0,2 g·L⁻¹) a los 5 días, con 56% de remoción de la DQO. En las mismas condiciones se alcanzaron 51% de CFT, 38% de CL, 52% de CA y 35% de CLS, superando los resultados de Nunes et al. (2021), donde la misma bacteria estudiada de forma libre asociada a biomasa presentó remociones inferiores al 30% para la DQO y los compuestos específicos. La remoción de color fue de 45%, mayor que el 4% reportado por los autores. El control del efluente solo con aireación (E) en el día 7 promovió cierta remoción, aunque sin superar el tratamiento óptimo (concentración A, día 5). El tratamiento con biomasa (E+Bi) alcanzó 55% de DQO y aproximadamente 30% en los demás compuestos, mientras que el uso exclusivo de cáscaras (E+Cas) no removió DQO ni CLS, pero redujo los CA en 80%. A partir del día 5 se observó una disminución de la eficiencia del sistema, posiblemente asociada a desorción, recombinación o estabilización de productos intermedios persistentes (PEITZ; XAVIER, 2020).

El índice de deseabilidad compuesta indica qué tan cercanas están las condiciones evaluadas a la mejor solución, donde un valor más próximo a 1 representa un mayor desempeño (JIMÉNEZ et al. 2022). Las condiciones óptimas encontradas fueron de 0,2 g·L⁻¹ de bioproducto y aproximadamente 5 días de TRH, con un índice de 0,903.

Operación de la LAF piloto

En la Figura 2 son presentados la configuración y monitoreo operacional de la LAF a escala piloto durante 112 días.

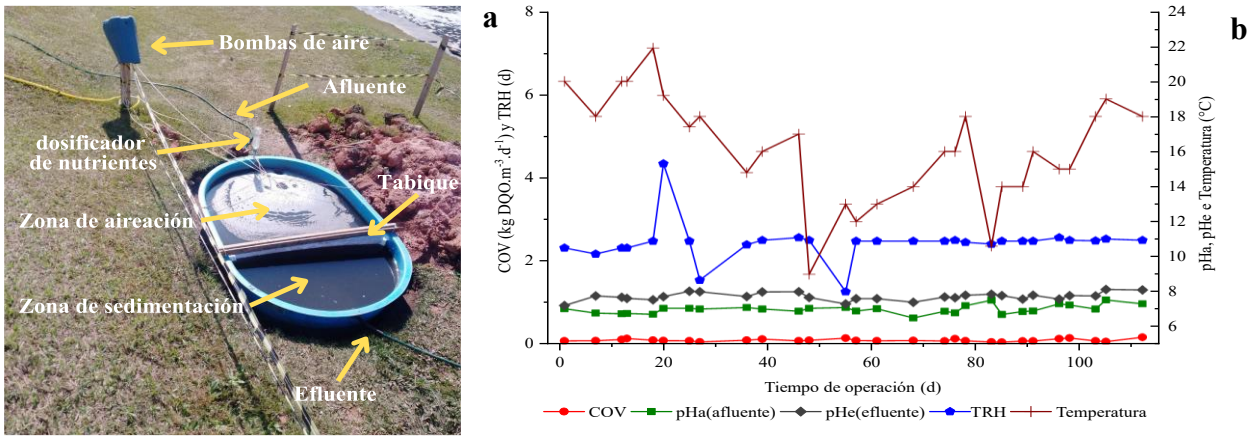


Figura 2: Configuración del sistema y desempeño operacional de la LAF a escala piloto: a) identificación de componentes y b) monitoreo de parámetros operacionales durante 112 días.
Fuente: Los autores (2026)

Durante la operación de la LAF piloto, el afluente presentó valores medios de pH de 7,00 ± 0,24, mientras que el efluente alcanzó 7,73 ± 0,22; este incremento puede estar asociado a la formación de carbonatos en la zona de sedimentación (VON SPERLING, 2017). La temperatura fluctuó entre 7 y 22 °C, evidenciando que el sistema operó bajo condiciones ambientales. El tiempo de retención hidráulica (TRH) se vio afectado a partir del día 27, debido a un choque hidráulico ocasionado por precipitación pluvial y el taponamiento del dispositivo de entrada. En días posteriores, el sistema fue sometido a choques de carga no planificados, los cuales comprometieron temporalmente la eficiencia del tratamiento

Desempeño de la remoción de materia orgánica (DQO y DBO_5)

Durante la etapa de estabilización en la LAF piloto las remociones máximas alcanzadas fueron de 72% para la DQO y 75% para la DBO_5. En esta etapa, la ocurrencia de choques hidráulicos y orgánicos no previstos, a partir del día 27 de operación, influyó en la eficiencia de la LAF piloto. En procesos industriales, pueden presentarse fugas accidentales de residuos provenientes de la digestión del proceso Kraft hacia el sistema biológico, afectando la biomasa y provocando reducciones de hasta 50% en la remoción de DQO (HIDD et al., 2025). Durante la etapa de aplicación de choques, equivalentes a cinco veces la carga orgánica, la remoción media de DQO fue de 35%, mientras que la DBO_5 se ubicó en 44%. En la etapa de bioaumentación, las remociones medias alcanzaron valores de 50% para la DQO y 60% para la DBO_5. En la Figura 3 se presentan diagramas de caja (*boxplots*) que ilustran la distribución y variabilidad de la DQO y la DBO_5 en las etapas de estabilización (A), aplicación de choques (B) y aplicación de choques con bioaumentación (C).

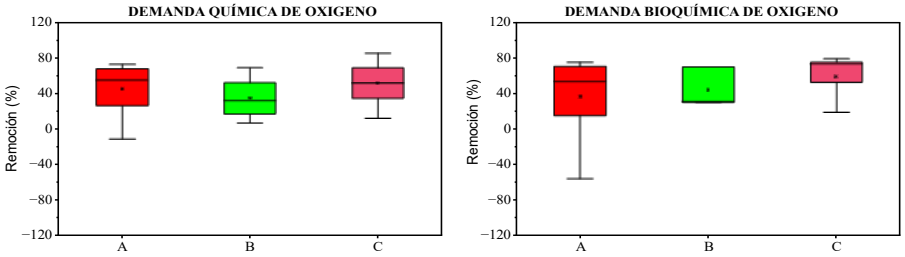


Figura 3: Eficiencia de remoción de la materia orgánica medidas en DQO y DBO_5 durante las etapas de (A) estabilización, (B) aplicación de choques de 5 veces la COV y (C) aplicación de choques y aplicación de bioaumentación.
Fuente: Los autores (2026)

En la etapa de estabilización, la DQO, presentó mayor dispersión, mientras que el choque redujo la eficiencia de remoción. En la bioaumentación se observa una recuperación del sistema con menor variabilidad. En el caso de la DBO_5, se evidenció mayor dispersión durante la estabilización, lo que indica una mayor sensibilidad a las perturbaciones; sin embargo, tras la bioaumentación se observa una mayor eficiencia y un comportamiento más estable.

Desempeño de la remoción de los compuestos específicos (CFT, CL, CA, CLS), color y turbidez

Las remociones, expresadas como valores promedio, de los CFT fueron de 19%, 11% y 30% en las etapas de estabilización, choques y bioaumentación, respectivamente. Para los CL, CA y CLS, las remociones durante la estabilización fueron de 16%, 13% y 9%. Durante los eventos de choque, las remociones disminuyeron en CL (6%) y CA (5%), mientras que los CLS mostraron un incremento de 19%. En la etapa de bioaumentación, se obtuvieron remociones de 14% en CL, 8% en CA y 19% en CLS. En cuanto al color, se observaron remociones de 23% y 25% en las etapas de estabilización y choques,

respectivamente, sin remoción en la bioaumentación. Por su parte, la turbidez presentó remociones de 34%, 64% y 66% en las etapas de estabilización, choques y bioaumentación, respectivamente. En la Figura 4 son presentados los diagramas de caja (*boxplots*) que ilustran la distribución de los parámetros evaluados en el sistema LAF a escala piloto.

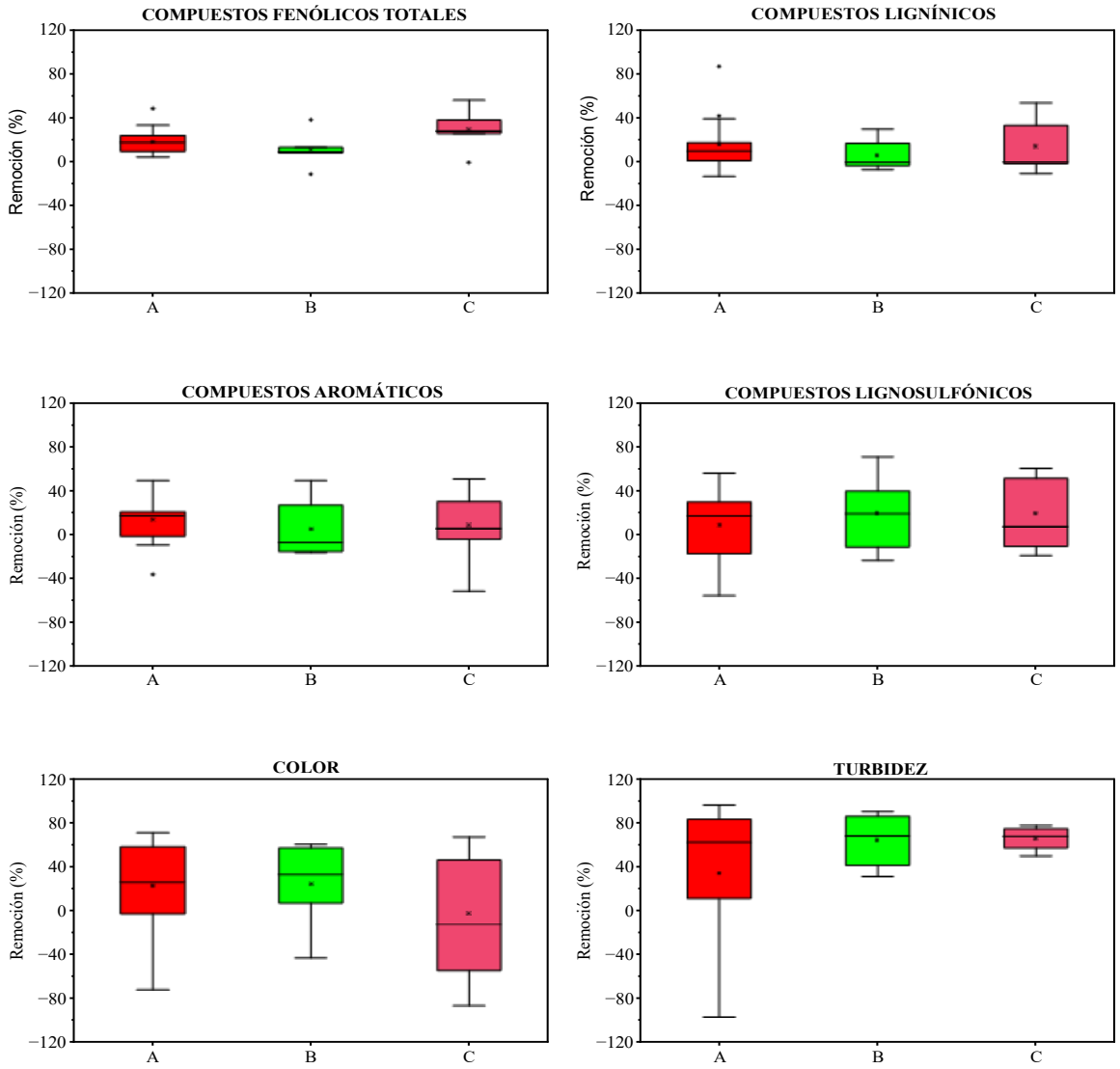


Figura 4: Eficiencia de remoción de los compuestos específicos (CFT, CL, CA, CLS), color y turbidez durante las etapas de (A) estabilización, (B) aplicación de choques de 5 veces la COV y (C) aplicación de choques y aplicación de bioaumentación.
Fuente: Los autores (2026)

De manera general, los resultados evidencian que los choques impactaron negativamente la eficiencia de remoción en todos los parámetros evaluados, incrementando la variabilidad del sistema. Por el contrario, durante la bioaumentación se observa una mayor estabilidad, particularmente en los CFT y la turbidez. El color y la turbidez fueron los parámetros más afectados por los choques no planificados durante la estabilización. Asimismo, los compuestos específicos presentaron episodios de baja o nula remoción, lo que confirma su naturaleza recalcitrante y posibles procesos de biotransformación parcial (NUNES et al., 2022).

Evaluación de la materia orgánica mediante matrices de fluorescencia excitación-emisión (MEE) en condiciones de choque con y sin bioaumentación

Se evaluó la materia orgánica mediante matrices de fluorescencia excitación-emisión (MEE), identificándose los picos T1 (277/310 nm) y T2 (220/313 nm), asociados a subproductos microbianos, estructuras aromáticas y grupos fenólicos; el pico M (310/415 nm), se ha reportado su relación con compuestos lignosulfónicos; y el pico A (221/421 nm), está vinculado a ácidos húmicos y derivados de la lignina (RODRIGUEZ et al., 2022). En la Figura 5 se presenta la variación de la fluorescencia durante el tratamiento biológico: las imágenes (a) y (b) corresponden al efluente colectado el día del choque y tres días después, sin bioaumentación, respectivamente; mientras que (c) y (d) representan las mismas condiciones con bioaumentación.

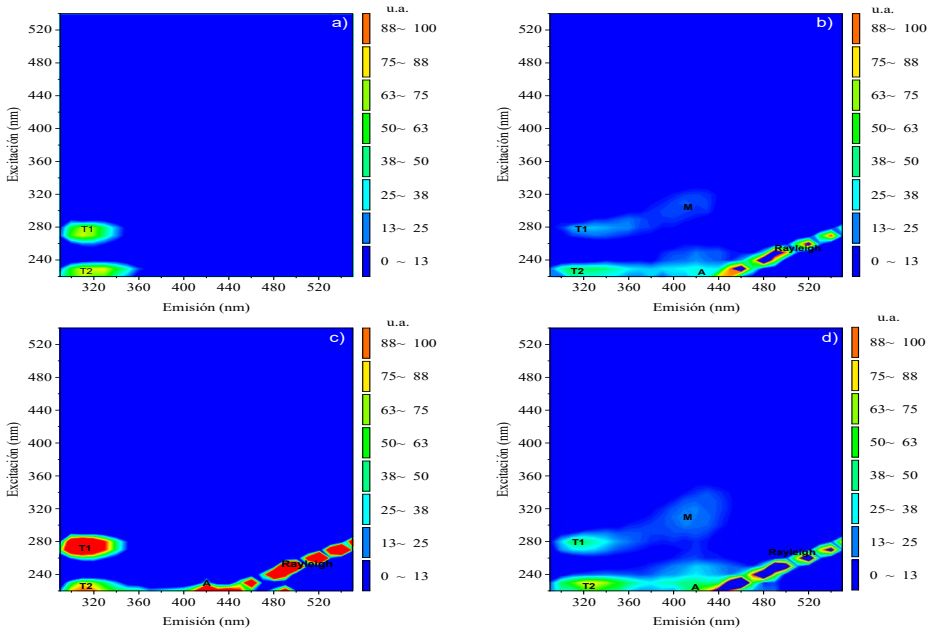


Figura 5: Evaluación de la materia orgánica mediante matrices de fluorescencia excitación-emisión (MEE) en condiciones de choque con y sin bioaumentación. (a) y (b): efluente colectado el día del choque y tres días después, respectivamente, sin bioaumentación; (c) y (d): efluente colectado el día del choque y tres días después, respectivamente, con bioaumentación. La intensidad de fluorescencia se expresa en unidades arbitrarias (u.a.). Fuente: Los autores (2026)

Los picos T1 y T2 se redujeron aproximadamente en 74% y 42% bajo condiciones de choque, mientras que con bioaumentación las reducciones fueron de 76% y 15%, respectivamente. Esta disminución puede atribuirse a procesos de biotransformación y consumo microbiano de estructuras aromáticas y grupos fenólicos asociados a la lignina, los cuales contribuyen a la fluorescencia en esa región (RODRÍGUEZ et al., 2022). Asimismo, a los tres días de tratamiento, en ambas condiciones, emergieron los picos A y M, lo que indica la formación de metabolitos microbianos y compuestos derivados de la degradación de la lignina.

La intensidad de fluorescencia registrada puede estar influenciada por las características del afluente, particularmente por la alternancia operacional de la industria en la producción de celulosa, incluyendo el uso de materia prima proveniente de papel reciclado, la cual presenta menor contenido de compuestos específicos de la lignina. Asimismo, la exposición a la luz solar puede contribuir a la degradación de los compuestos fluorescentes presentes. Esto podría explicar, en parte, la ausencia inicial de los picos M y A en ambas condiciones evaluadas.

Consideraciones finales

Los ensayos en lote permitieron determinar la dosis óptima del bioproducto y mostraron que la bioaumentación con *Bacillus thuringiensis* inmovilizado en cáscaras de arroz promovió mayores niveles de remoción de DQO y compuestos específicos en comparación con los controles, indicando una mejora en el desempeño del sistema. Durante la operación de la LAF piloto se evidenció que los choques hidráulicos y orgánicos incrementaron la variabilidad del sistema e indicaron baja remoción de contaminantes. La bioaumentación en la LAF piloto contribuyó a la recuperación y estabilización de la materia orgánica biodegradable; sin embargo, su efecto sobre los compuestos específicos fue variable. Los cambios observados en las señales de fluorescencia concuerdan con la remoción parcial de estos compuestos, sugiriendo procesos de biotransformación más que de mineralización completa. El uso de *Bacillus thuringiensis* inmovilizado en cáscara de arroz mostró potencial para mejorar la resiliencia del sistema bajo condiciones de perturbación.

Agradecimentos

Los autores agradecen, a la Universidade Tecnológica Federal do Paraná, la Fundação Araucária CP 17/2023 y CP 23/2023, el CNPq CP 68/2022, la industria COCELPA ACT 23064.040994/2024-33, el Laboratório de Tratamento de Águas Residuárias (LATAR), el Laboratório Multiusuários de Análises Químicas (LAMAQ), el Laboratório Multiusuários de Equipamentos e Análises Ambientais (LAMEAA), al Laboratório de Pesquisa Relacionada à Biomassa e Bioenergia (LAPREBB) y al Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR-Curitiba.

Referências Bibliográficas

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 24. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2022.

COELHO, B. D.; CARVALHO, J.; COUTO, G. H.; ALMEIDA, J. D. de; CELINSKI, F.; XAVIER, C. R. Bioaugmentation with *Advenella kashmirensis* for the treatment of a kraft pulp effluent by aerated lagoon. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 18, n. 5, e2935, 2023. DOI: 10.4136/ambi-agua.2935.

GUPTA, G. K.; KAPOOR, R. K. Recent advances in eco-friendly technology for decontamination of pulp and paper mill industrial effluent: a review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 3, p. 275, 2024. DOI: 10.1007/s10661-024-12399-3.

JIMÉNEZ, F.; FERNÁNDEZ, Á.; CÁDIZ, M. de la L.; LOZANO, J.; OLIVER, R.; ALAÑÓN, M. E.; CASTANGIA, I.; SEGURA, A.; ARRÁEZ, D. Application of response surface methodologies to optimize high-added value products developments: cosmetic formulations as an example. **Antioxidants**, v. 11, n. 8, p. 1552, 2022. DOI:10.3390/antiox11081552

IBÁ (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ARVORES). **Relatório anual** 2025.

NUNES, J.; SILVA, M.; COUTO, G.; FLÔR, I.; VICENTE, V.; ALMEIDA, J.; CELINSKI, F.; XAVIER, C. Bacterial diversity in aerated facultative lagoon treating kraft cellulose effluent with bioaugmentation. **BioResources**, v. 17, n. 4, p. 6556-6568, 2022. DOI: 10.15376/biores.17.4.6556-6568.

PEITZ, C.; XAVIER, C. Moving bed biofilm reactor for treatment of Kraft pulp effluent with high organic load rate. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 15, n. 4, p. 1–14, 2020. DOI: 10.4136/ambi-agua.2512.

RODRÍGUEZ, F.; ORTEGA, B.; GONZÁLEZ, Á.; BELLIDO, A. Comprehensive characterization of industrial wastewaters using EEM fluorescence, FT-IR and ^{1}H NMR techniques. **Science of the Total Environment**, v. 805, p. 150417, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150417.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

INFLUÊNCIA DE CHICANAS PERFURADAS NA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DE UM CONTACTOR MULTICANAIS DE OZÔNIO: UMA ANÁLISE COM FERRAMENTAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

1Ionatan Anton Schroer, 2Bethania Brochier, 3Amanda Gonçalves Kieling,
1 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: Ionatan.schroer@gmail.com; 2 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: bethaniab@unisinos.br; 3 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: amandag@unisinos.br

Palavras-chave: Distribuição do Tempo de Residência (RTD); CFD; Tratamento de Efluentes.

Resumo

A crescente preocupação com contaminantes emergentes em efluentes e a necessidade de processos avançados de tratamento têm ampliado o uso de processos avançados de oxidação, entre os quais a ozonização se destaca pela elevada capacidade oxidativa e aplicação consolidada em etapas de polimento. Entretanto, a eficiência do processo não depende apenas da dose aplicada, sendo fortemente condicionada pela hidrodinâmica do reator, que governa a mistura, o contato efetivo entre ozônio e contaminantes e a distribuição do tempo de residência (RTD), podendo favorecer curtos-circuitos hidráulicos e zonas de estagnação. Nesse contexto, o impacto de modificações geométricas em um contactor multicanais de ozônio foi avaliado com ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD). Três configurações foram propostas e comparadas: (i) caso base com chicanas tradicionais; (ii) caso com três chicanas perfuradas, e (iii) caso híbrido, com a primeira chicana sólida e as duas subsequentes perfuradas. O foco da análise se concentrou no comportamento hidrodinâmico e na distribuição do tempo de residência (RTD). As simulações foram conduzidas pelo método dos volumes finitos, o domínio foi simplificado para bidimensional, com escoamento monofásico incompressível em regime turbulento e modelo de turbulência k-ε padrão. A RTD foi obtida por injeção de traçador inerte via *step input*, permitindo a extração de t_{10}, t_{50}, t_{90}, e do índice de dispersão *MDI*. Os resultados da simulação numérica foram validados por estudo de independência de malha (GCI) e por validação e verificação quantitativa contra referências experimentais e numéricas da literatura. Os resultados evidenciam que as chicanas perfuradas aplicadas integralmente podem induzir curto-circuito hidráulico, reduzindo t_{10} em 31% e elevando a dispersão *MDI* em 62%. O caso híbrido reduziu o curto-circuito, porém manteve regiões de maior residência. Conclui-se que a distribuição e posicionamento de chicanas perfuradas influenciam fortemente a eficiência hidráulica do contactor, e que a CFD, em conjunto da avaliação dos indicadores hidrodinâmicos são uma ferramenta adequada para orientar ajustes de geometria e condições operacionais visando maior efetividade do processo.

1. Introdução

A crescente preocupação com a presença de contaminantes emergentes em efluentes líquidos, como produtos farmacêuticos e compostos orgânicos persistentes, impulsiona a busca por tecnologias de tratamento mais eficazes. Nesse contexto, a ozonização destaca-se como um Processo de Oxidação Avançada promissor, capaz de degradar esses poluentes que resistem aos métodos convencionais (Tarigan *et al.*, 2025). Devido a sua alta instabilidade e reatividade como oxidante, o ozônio precisa ser gerado e empregado *in situ*, sendo utilizado tanto em sistemas de desinfecção da água (Sasáková *et al.*, 2021) quanto em estações de tratamento de efluentes industriais (Leontieff *et al.*, 2025), contribuindo diretamente para a proteção dos ecossistemas aquáticos e a saúde pública ao garantir a qualidade da água descartada no meio ambiente.

Embora o ozônio seja um agente oxidante comprovadamente eficaz, a eficiência geral do processo e, consequentemente, o impacto ambiental positivo, depende muito da hidrodinâmica do reator, que facilita o contato entre o gás e o líquido, além da transferência de massa e da reação de degradação dos contaminantes. A existência de áreas sem fluxo, curtos-circuitos hidráulicos ou recirculações intensas pode afetar a uniformidade da distribuição do tempo de residência (RTD) e diminuir a eficiência do oxidante (Peng *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2013).

A fluidodinâmica computacional (CFD) vem se estabelecendo como uma ferramenta robusta para a análise de contactores de ozônio, possibilitando a avaliação de fenômenos complexos de mistura, dispersão e transferência de massa com baixo custo computacional e ótima correlação com dados experimentais (Anton Schroer *et al.*, 2023; Cruz *et al.*, 2025; Elaissaoui Elmeliani *et al.*, 2024). Estudos anteriores mostraram a capacidade dessa metodologia para prever não apenas a dispersão do ozônio em fase gasosa, mas também o comportamento de sistemas reacionais multicanais, fornecendo suporte para a criação de geometrias otimizadas(Chen *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2024).

Dentro desse cenário, o estudo atual propõe uma análise numérica bidimensional do fluxo em um reator estilo contactor de ozônio multicanal, visando avaliar o impacto de alterações geométricas simples, como a adição de chicanas perfuradas, na eficiência hidrodinâmica. A pesquisa foi realizada unicamente por meio de simulação CFD, possibilitando a determinação da distribuição do tempo de residência (RTD) e de índices hidráulicos representativos (t_{10}, t_{50}, t_{90} e MDI). Tal prática visa ao desenvolvimento de sistemas de tratamento mais eficientes e sustentáveis, promovendo a gestão ambiental responsável dos recursos hídricos.

2. Material e Métodos

Os materiais e métodos adotados neste trabalho foram definidos para analisar o efeito das alterações geométricas de um contator de ozônio, avaliando o impacto sobre a eficiência e hidrodinâmica. A metodologia empregada no trabalho baseia-se exclusivamente em simulações CFD, considerando um escoamento monofásico, incompressível e turbulento, que, através da injeção de um traçador inerte, possibilita determinar os indicadores de performance hidrodinâmica do sistema.

2.1 Geometria e configuração dos casos simulados

A geometria analisada é baseada em um contactor multicanais de ozônio, composto de câmaras interligadas por chicanas alternadas. Para a análise numérica deste trabalho, a geometria foi simplificada para um domínio bidimensional (2D planar), apresentada na Figura 1, o que reduz o custo computacional.

Três configurações foram analisadas:

Caso A: Chicanas sólidas, configuração de referência apresentada na Figura 1. Representa a geometria convencional analisada em estudos experimentais e numéricos prévios de Kim et al. (2010) e Peng et al. (2021).

Caso B: As chicanas sólidas foram substituídas por chicanas perfuradas, para avaliar o impacto na difusão dentro do reator. As chicanas perfuradas possuem furos de 4,86 mm, com um espaçamento de 7,2 mm.

Caso C: Foi proposto após avaliação dos resultados verificados no caso B, assim, a primeira chicana sendo sólida e as duas subsequentes perfuradas, ficando como um caso híbrido entre o Caso A e Caso B.

A malha computacional foi gerada com elementos quadrilaterais estruturados, apresentando refinamento localizado nas regiões entre as câmaras e próximo às paredes e chicanas, onde ocorrem gradientes mais expressivos de velocidade. Um detalhe da malha utilizada está apresentado na Figura 1. O estudo de independência de malha foi conduzido conforme o método de GCI (*Grid Convergence Index*) proposto por Celik et al. (2008) e recomendado pela ASME (*American Society of Mechanical Enginers*). Três malhas de diferentes densidades foram testadas com fatores de refinamento entre 1,3. Os resultados de velocidade média na linha de controle (x = 0,3 m que pode ser vista na Figura 1) foram a base para o cálculo do GCI.

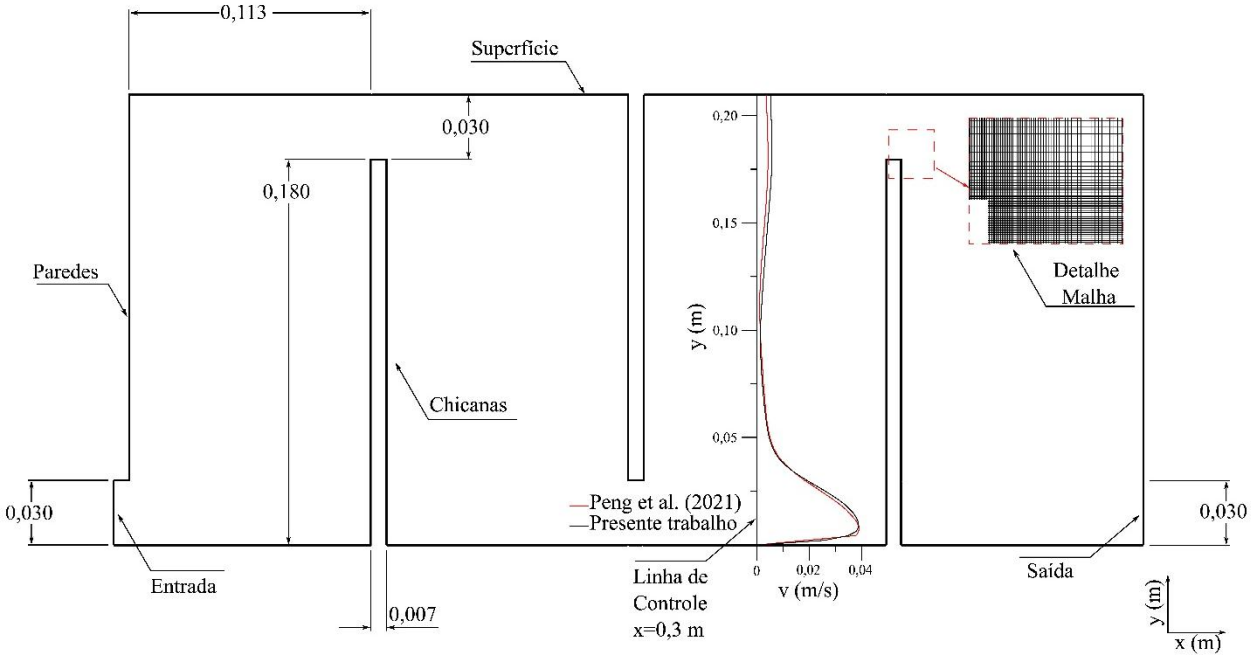


Figura 1: Geometria de referência, com detalhe da malha computacional e resultado de velocidade.
Fonte: Os autores.

2.2 Formulação matemática e modelagem numérica

A modelagem do escoamento é baseada nas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, solucionadas pelo método dos volumes finitos. O fluido foi considerado incompressível, newtoniano e isotérmico, composto por água líquida em regime turbulento. O modelo baseia-se na formulação geral da equação da continuidade:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

onde ρ representa a massa específica do fluido e $\vec{v}$ a velocidade linear.

A conservação da quantidade de movimento é expressa pela equação Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) (2):

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] \quad (2)$$

em que p é a pressão estática, μ a viscosidade dinâmica e μ_t a viscosidade turbulenta determinada a partir do modelo de turbulência.

O modelo de turbulência utilizado foi o k-ε padrão, largamente utilizado em escoamentos de contactores (Launder e Spalding, 1974). As equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação turbulenta (ε) são dadas por:

$$\rho(\vec{v}\cdot\nabla k) = \nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + Gk - \rho\varepsilon \quad (3)$$

$$\rho(\vec{v}\cdot\nabla \varepsilon) = \nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

onde G_k representa a produção de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade. As constantes adotadas foram de, $C_{2\varepsilon} = 1{,}92$, $\sigma_k = 1{,}0$, $\sigma_\varepsilon = 1{,}3$ e $C_\mu = 0{,}09$. A viscosidade turbulenta (μ_t) é obtida a partir da relação,

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

A simulação foi conduzida em regime estacionário até atingir convergência. Após a convergência do regime estacionário, foi introduzido um traçador, cuja concentração C segue à equação de transporte:

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{v}C) = \nabla\cdot[(\Gamma+\Gamma_t)\nabla C] \quad (6)$$

onde Γ é a difusividade molecular e Γ_t a difusividade turbulenta, relacionada à viscosidade turbulenta por:

$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{Sc_t} \quad (7)$$

com número de Schmidt turbulento $Sc_t = 0{,}7$. A concentração do traçador na entrada foi definida como $C_{in} = 1$, enquanto o domínio foi considerado inicialmente livre de traçador $C_0 = 0$. A concentração média de saída foi registrada em função do tempo, obtendo-se a função cumulativa de distribuição de tempo de residência:

$$F(\theta) = \frac{C_{out}(\theta) - C_0}{C_{in} - C_0}$$

A partir de $F(t)$ foram calculados os parâmetros hidráulicos característicos do contactor, t_{10}, t_{50}, t_{90} (tempos característicos associados à fração do fluido de 10, 50 ou 90%, respectivamente, que já saiu do sistema), o tempo médio de residência (τ_{exp}) e o índice de dispersão *MDI* = t_{90}/t_{10}, que permitem avaliar a eficiência hidráulica e a uniformidade do escoamento. O tempo adimensional θ foi calculado pela razão entre o t, e o tempo médio de residência τ_{exp}.

2.3 Condições de contorno e métodos numéricos

A entrada de fluido foi definida por uma velocidade constante de 0,029 m/s, mesma utilizada nos estudos experimentais de Kim et al. (2010). A pressão estática foi definida como zero na saída, e as paredes laterais foram consideradas impermeáveis com condição de não deslizamento, a parede superior foi definida como simetria, para simplificar a condição de superfície do fluido em contato com o ambiente.

A dispersão do traçador foi modelada pelo *Species Transport* como um reagente inerte. A entrada do traçador seguiu o método de *Step input*, no qual a condição de contorno na entrada foi definida como nula até a convergência do caso em estado estacionário. Quando convergido, a concentração do traçador na entrada foi definida como 100%. Na saída, utilizou-se uma condição de gradiente nulo.

As equações foram resolvidas pelo método *Simple* de acoplamento pressão–velocidade, com discretização espacial de segunda ordem e convergência definida para resíduos inferiores a 1×10^{-6}. O passo de tempo da simulação transiente foi definido como 0,5 s.

3. Resultados

Os resultados foram organizados em três etapas, primeiramente, a avaliação de independência de malha, para assegurar a não influência de efeitos de malha nos resultados. Em seguida, o modelo é validado e verificado quantitativamente frente a resultados da literatura. Por fim, discute-se a influência de chicanas perfuradas sobre a hidrodinâmica do reator, por meio da comparação entre contornos de tempo de vida, vetores de velocidade e parâmetros derivados da distribuição do tempo de residência (RTD).

3.1 Independência da malha

Para verificar a independência da malha numérica dos resultados obtidos, foi conduzido um estudo de convergência de malha utilizando o método *Grid Convergence Index* (GCI) proposto por Celik et al. (2008). Foram geradas três malhas: uma mais refinada, uma intermediária e uma grosseira. A malha mais refinada possuía 295.556 elementos, a malha intermediária, usada como base, com 172.800, e a malha grosseira com 97.080. O fator de refinamento entre cada par de malhas apresentou valores maiores que 1,3, conforme recomendado pelo método.

O erro relativo médio entre a malha intermediária e a malha refinada foi de aproximadamente 1,00%, enquanto o erro entre a malha base e a malha grosseira foi de 1,86%. A mediana apresentou valores de 0,39% para a base–refinada e de 0,81% para a base–grosseira. Os valores máximos de erro relativo foram de 4,2%. Todos os valores encontrados para as malhas avaliadas estão abaixo da referência de boa prática da literatura de 5% de erro médio no GCI, de forma que os valores máximos podem ser considerados *outliers* quando comparados com a média e a mediana. Estes resultados encontrados demonstram que são independentes de fenômenos de malha. Desta forma a malha intermediária foi utilizada como base para a construção da malha

dos estudos de caso, visando reduzir o custo computacional ao utilizar a malha mais refinada, e ter maior detalhamento de resultados quando comparado com a malha grosseira.

3.2 Validação quantitativa

A validação quantitativa do modelo numérico foi realizada por meio da comparação com resultados experimentais de Kim et al. (2010) e , onde o sistema estudado pelos autores é análogo à geometria base. A Figura 2, apresenta o perfil da concentração de traçador na saída do sistema em função do tempo adimensional.

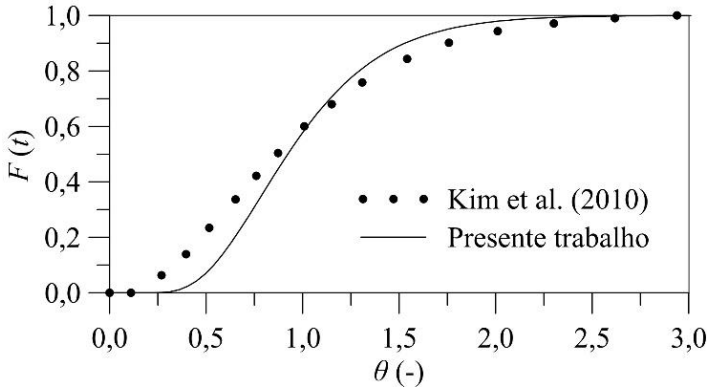


Figura 2: Perfil da concentração de traçador na saída do reator.
Fonte: Os autores.

O coeficiente de determinação R^2 obtido foi de 0,9830, o erro quadrático médio foi de 0,0701, e o erro médio absoluto foi de 0,0525, esses valores demonstram que o modelo apresenta forte correlação ao experimental e não apresentou valores distantes da referência. O viés médio apresentou valor negativo de −0,0229 indicando que concentração do traçador da simulação está atrasada quando comparada à experimental. Esse comportamento se manteve até aproximadamente uma concentração acumulada de 0,65 e θ de 1,1. Ainda assim, essa diferença é pequena e não compromete a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento global. Esse atraso pode ser referente ao modelo de turbulência escolhido, simplificações da difusividade do traçador, simplificações geométricas, entre outras. Com base nestes resultados, conclui-se que o modelo numérico apresenta comportamento consistente com a literatura experimental, validando sua aplicação para os estudos de distribuição do tempo de residência.

3.2 Verificação quantitativa

A verificação quantitativa do modelo numérico foi realizada utilizando os resultados apresentados por Han et al. (2024), que analisaram a mesma geometria empregada no estudo experimental de Kim et al. (2010).

Para a verificação, foi utilizado o perfil da velocidade média ao longo de uma linha de controle posicionada a 0,3 m da entrada. O resultado da velocidade assim como o local onde ela se encontra estão apresentados na Figura 1. A comparação da velocidade em uma linha de controle é interessante pois, o perfil de velocidade local é altamente sensível a variações da modelagem matemática e numérica. No estudo de Han *et al.* (2024), o escoamento foi avaliado tridimensionalmente, enquanto o presente trabalho em foi bidimensional. Apesar dessa diferença, os resultados mostraram excelente concordância. O coeficiente de determinação obtido foi de 0,9944, o erro quadrático médio foi de 0,0012, o erro médio absoluto foi de 0,0010.

Esses resultados indicam que os modelos numéricos e matemáticos adotados neste trabalho representam os fenômenos fluidodinâmicos, mesmo quando comparado a uma solução numérica 3D da literatura. Dessa forma, conclui-se que o modelo numérico se encontra verificado quantitativamente.

3.3 Influência da Chicana Perfurada

A análise qualitativa dos estudos de caso proposto seguiu com a análise dos contornos do tempo de vida do fluido no interior do reator e dos vetores de velocidade, apresentados na Figura 3 e complementada pelos parâmetros característicos da distribuição do tempo de residência (RTD), sumarizados na Tabela 1. No contorno de tempo de vida, cores azuladas representam baixa residência, enquanto cores avermelhadas indicam regiões de maior retenção local. Nas três representações da Figura 3, os vetores foram plotados na mesma escala, de modo que vetores maiores representam maior velocidade local. Foram avaliadas três configurações: o Caso A, geometria base com as chicanas sólidas (Figura 3-a), o Caso B, com três chicanas perfuradas (Figura 3-b), e por último, um caso C, híbrido (Figura 3-c), proposto a partir das observações verificadas no caso com as chicanas perfuradas, no qual a primeira chicana foi mantida sólida e as duas subsequentes foram modeladas como perfuradas.

No Caso A de base, observa-se um comportamento regular do escoamento. Tanto o campo de vetores velocidades quanto à distribuição do tempo de vida apresentam maior uniformidade por todo o reator, com ausência de regiões de acúmulo local do fluido, não apresentando curtos-circuitos. Consistente com os parâmetros de RTD, que apresenta $t_{10} = 0{,}55$, $t_{50} = 0{,}96$, $t_{90} = 1{,}59$ e $MDI = 2{,}89$.

Parâmetros hidráulicos	Caso A: Base	Caso B: 3 chicanas perfuradas	Caso C: 2 chicanas perfuradas
t_{10}	0,55	0,38	0,53
t_{50}	0,96	0,85	0,99
t_{90}	1,59	1,78	1,92
MDI	2,89	4,68	3,64

Tabela 1: Parâmetros da distribuição do tempo de residência.
Fonte: Os autores.

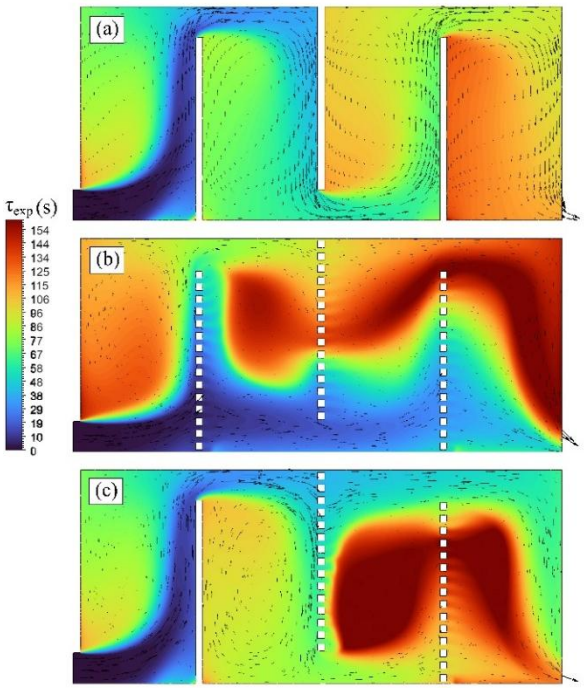


Figura 3: Contornos do tempo de vida do fluido. Caso base (a), Caso com 3 chicanas perfuradas (b) e caso com 2 chicanas perfuradas (c).
Fonte: Os autores.

Na configuração com as três chicanas perfuradas, avaliando o campo de vetores, observa-se que o escoamento ao atingir a primeira chicana sofre uma deflexão, direcionando-se parcialmente para a região superior do reator, que apresenta maior permeabilidade devido à abertura, enquanto uma fração do fluido atravessa a chicana, mantendo uma trajetória mais direta. Como consequência, forma-se um comportamento de curto-circuito hidráulico, que também pode ser identificado ao avaliar o contorno do tempo de vida, em que a região inferior apresenta valores muito menores, enquanto a região superior valores mais elevados. Esse comportamento é confirmado pela redução de t_{10} para 0,38, que indica uma saída prematura do fluido, e pelo aumento de MDI para 4,67, que caracteriza uma maior dispersão e menor uniformidade.

A partir do comportamento observado no caso com três chicanas perfuradas, foi proposto um terceiro caso para reduzir a tendência ao curto-circuito na região inferior. Na configuração híbrida, o campo vetorial indica velocidades mais elevadas do que no caso totalmente perfurado, resultado esperado com a volta da primeira chicana sólida. O caso tem um t_{10} de 0,53, que indica não apresentar a saída prematura do fluido, caso que foi observada no caso totalmente perfurado. Por outro lado, t_{90} aumenta para 1,93 e o MDI para 3,64, indicando uma dispersão superior ao caso base, porém menor que a do caso com três chicanas perfuradas.

O tempo de vida, nessa configuração, apresenta distribuição mais homogênea no domínio quando comparada ao caso com três chicanas perfuradas. Entretanto, permanecem regiões localizadas de tempo de vida elevado. Tais regiões podem ser potencialmente favoráveis para operações limitadas pela cinética, como a ozonização, uma vez que aumentam a exposição local do efluente ao reagente.

Conclusão

A otimização dos processos de ozonização para o tratamento de efluentes, especialmente no que tange à remoção de contaminantes emergentes, é intrinsecamente ligada ao controle hidrodinâmico dos contactores, com a aplicação de ferramentas avançadas como a Fluidodinâmica Computacional (CFD). Os resultados da pesquisa demonstraram a independência da malha numérica e a validação quantitativa do modelo em comparação com dados experimentais, atestando a robustez e a confiabilidade da simulação CFD. Essa capacidade de prever com precisão o comportamento do escoamento interno, incluindo a distribuição

do tempo de residência (RTD), é fundamental para identificar e mitigar problemas como curtos-circuitos hidráulicos e áreas de estagnação, que comprometem a eficiência da transferência de massa e a degradação dos poluentes. Nos estudos de caso, o caso base apresentou maior uniformidade com um MDI de 2,89, enquanto o caso com três chicanas perfuradas provocou um curto-circuito, com redução de t_{10} para 0,38 s, redução de 31% com o caso base, e aumento do MDI para 4,68, um aumento de 62% contra o caso base. Já o caso híbrido mitigou a saída prematura, contendo um t_{10} de 0,53 s, 4% maior que o caso base, porém manteve parte do fluido com maior residência, com o t_{90} de 1,93 s, aumento de 21%, e dispersão superior ao caso base com um MDI de 3,64, aumento de 26%, com regiões localizadas de maior tempo de vida, potencialmente relevantes para processos limitados por cinética dos reagentes.

Em termos de aplicação, a melhoria da eficiência hidráulica tende a aumentar a efetividade do ozônio, com potencial de reduzir consumo específico e custos operacionais, além de contribuir para efluentes de maior qualidade. Como trabalhos futuros, recomenda-se avaliar parametricamente a geometria das chicanas perfuradas, visando reduzir o curto-circuito sem aumentar a dispersão do fluido.

Referencias

ANTON SCHROER, I. et al. Study of ozone misting for sanitization of hospital facilities: A CFD approach. Ozone: Science and Engineering, v. 45, n. 3, p. 305–319, 2023.

CELIK, I. B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, v. 130, n. 7, p. 0780011–0780014, jul. 2008.

CHEN, X. et al. An improved CFD modeling approach applied for the simulation of gas–liquid interaction in the ozone contactor along with structure optimization. Chemical Engineering Journal, v. 384, 15 mar. 2020.

CRUZ, L. K. et al. Ozone Application for Inactivation of Escherichia coli in Air-Conditioned Environments for Food Production. Ozone: Science and Engineering, v. 47, n. 6, p. 607–616, 2025.

ELAISSAOUI ELMELIANI, M. E. A. et al. Optimizing the Disinfection Inactivation Efficiency in Wastewater Treatment: A Computational Fluid Dynamics Investigation of a Full-Scale Ozonation Contactor. Chemical Engineering and Technology, v. 47, n. 1, p. 46–55, 1 jan. 2024.

HAN, X. et al. Residence time and the concentration of microorganism in the ozone contactor: a CFD simulation on chamber deflectors. Environmental Science and Pollution Research, v. 31, n. 7, p. 11164–11177, 1 fev. 2024.

KIM, D. et al. Using 3D LIF to investigate and improve performance of a multichamber ozone contactor. Journal / American Water Works Association, v. 102, n. 10, p. 61–70, 2010.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS. COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS ANR ENGINEERING, v. 3, p. 269–289, 1974.

LEONTIEFF, D. A. et al. Ozone for Industrial Wastewater Treatment: Recent Advances and Sector ApplicationsProcessesMultidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 ago. 2025.

PENG, S. et al. The impact of turbulence models on the simulation of residence time distribution in a multichamber ozone contactor. Water Supply, v. 21, n. 7, p. 3976–3986, 1 nov. 2021.

SASÁKOVÁ, N. et al. Ozonization of Water, Retention of Ozone and Devitalization of Escherichia Coli in Water by Ozone. Folia Veterinaria, v. 65, n. 3, p. 40–50, 1 set. 2021.

TARIGAN, M. et al. The Occurrence of Micropollutants in the Aquatic Environment and Technologies for Their RemovalProcessesMultidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 mar. 2025.

ZHANG, J. et al. Hydraulic Efficiency in RANS of the Flow in Multichambered Contactors. 2013

AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE CORANTES EM EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO UTILIZANDO O FUNGO *Penicillium sp.*

1 Júlia Cezare do Santo, 2 Thiago Andrade Marques, 3 Valquíria Aparecida dos Santos Ribeiro, 4 Kátia Valéria Marques Cardoso Prates

1 UTFPR-LD, e-mail: juliacezare@alunos.utfpr.edu.br; 2 UTFPR-LD, e-mail: thiagomarques@utfpr.edu.br; 3 UTFPR-AP, e-mail: valquiria@utfpr.edu.br; 4 UTFPR-LD, e-mail: kprates@utfpr.edu.br

Palavras-chave: biorremediação; tratamento de efluentes; remoção de corantes.

Resumo

A indústria têxtil é uma das grandes geradoras de efluentes líquidos que possuem elevada concentração de corantes e outros compostos químicos envolvidos nos processos industriais, sendo caracterizados pela sua heterogeneidade. Esses efluentes apresentam, em geral, elevada toxicidade, forte coloração e baixa biodegradabilidade, dificultando seu tratamento exclusivamente por métodos físico-químicos. Assim, a biorremediação, especialmente por meio da utilização de fungos, conhecida como micorremediação, torna-se uma alternativa promissora e sustentável para a remoção desses compostos, principalmente os corantes, afinal muitos fungos possuem a capacidade de degradar moléculas complexas, promovendo a remoção total ou parcial destes poluentes. Dessa forma, o presente estudo objetivou avaliar a remoção de corantes de um efluente têxtil sintético utilizando o fungo filamentoso *Penicillium sp.*. Primeiramente, o efluente sintético foi preparado baseando-se no banho de tingimento utilizado convencionalmente na indústria, sendo composto por 1 litro de água destilada, 0,1g de corante azul turquesa reativo, 0,25g de cloreto de sódio (NaCl) e 0,15g de carbonato de sódio (barrilha). Posteriormente, o efluente foi caracterizado quanto ao parâmetros físico-químicos, apresentando pH alcalino (10,41), baixa turbidez (<0,10 NTU), condutividade elétrica de 888 µS/cm e baixa carga orgânica (DQO de 47,97 mg/L). O procedimento para micorremediação foi conduzido seguindo um delineamento composto central rotacional (DCCR), com 17 ensaios, avaliando os efeitos do pH inicial, tempo de cultivo e volume de inóculo, além disso também foi avaliada a eficiência dos ensaios com a presença de glicose como fonte suplementar de carbono e ensaios sem a glicose. Os ensaios foram realizados em condições controladas em laboratório e a eficiência de remoção de corantes foi determinada por meio da varredura de cor realizando análises espectrofotométricas antes e após a micorremediação. Os resultados destacaram que a adição de glicose influenciou significativamente no processo, beneficiando a atividade metabólica do fungo e, consequentemente, aumentando a eficiência de descoloração. A remoção variou de 27% a 91% nos ensaios com a adição de glicose, enquanto nos ensaios sem a glicose as porcentagens foram mais baixas, variando de 0,3% a 58%. Esses resultados evidenciam que o fungo apresentou capacidade de adaptação e remoção dos corantes, sendo mais ou menos eficiente dependendo das condições experimentais avaliadas e apresentando coerência com dados da literatura. A análise estatística, por meio da variância ANOVA, indicou que algumas das variáveis independentes foram significativas para o processo de remoção de corantes, todavia, não foi possível determinar os pontos ótimos do processo, o que sugere a presença de interações complexas entre os fatores avaliados. Ressalta-se, que os ensaios controle não apresentaram remoção significativa de cor, confirmando que a descoloração observada está associada à ação do microrganismo e não à degradação espontânea. Em geral, os resultados evidenciaram que o *Penicillium sp.* possui potencial na remoção de corantes e a micorremediação mostrou-se eficiente para efluentes têxteis, com destaque para os ensaios com suplementação de glicose. Assim, conclui-se que o processo se apresenta como uma alternativa viável, de baixo custo e mais sustentável para o tratamento de efluentes têxteis, possibilitando a complementação dos tratamentos físico-químicos e contribuindo diretamente para a minimização dos impactos ambientais associados à industrial têxtil.

Introdução

A indústria têxtil apresentou faturamento de R$ 215 bilhões no Brasil em 2024, evidenciando sua grande relevância econômica (ABIT, 2025). No entanto, esse setor demanda elevados volumes de água e, consequentemente, gera grandes volumes de efluentes, com alto potencial poluidor (Bezerra, 2015). Esses efluentes são compostos principalmente por corantes e substâncias químicas, caracterizando-se por intensa coloração, elevada toxicidade, recalcitrância e baixa biodegradabilidade (Buscio; Crespi; Gutiérrez-Bouzán, 2015).

Uma parcela significativa dos corantes empregados na indústria têxtil, estimada em cerca de 20%, não se liga às fibras e acaba sendo liberada nos efluentes (Mani; Chowdhary; Bharagava, 2019). A presença desses compostos nos corpos hídricos provoca impactos ambientais, como a redução da penetração de luz, causando potenciais danos aos ecosistemas aquáticos (Carneiro *et al*., 2010; Song *et al*., 2017). Além disso, métodos físico-químicos de tratamento, muitas vezes, não promovem a remoção eficiente desses poluentes (Peixoto; Marinho; Rodrigues, 2013), podendo mantê-los no meio sem degradação efetiva (Nawaz; Ahsan, 2014), o que reforça a necessidade de alternativas mais eficazes.

Nesse contexto, a micorremediação (biorremediação com fungos) destaca-se como uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes têxteis, afinal utiliza fungos capazes de bioacumular, biossorver e/ou biodegradar os poluentes por meio de enzimas extracelulares, dependendo de suas variações metabólicas (Dewi *et al*., 2018; Przystaś; Zabłocka-Godlewska; Grabińska-Sota, 2018). De acordo com Solís *et al*. (2012), esses microrganismos apresentam baixo custo e elevada adaptabilidade metabólica a diferentes fontes de carbono e nitrogênio, além do potencial de remoção parcial ou completa de poluentes (Bonassa, 2021).

Considerando este contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicação do fungo filamentoso *Penicillium* sp. na remoção de corantes em efluente têxtil sintético, visando ao desenvolvimento de alternativas mais eficientes e sustentáveis para seu tratamento.

Material e Métodos

A remoção de corantes presente no efluente têxtil sintético foi realizada utilizando o fungo *Penicillium sp*., seguindo as etapas apresentadas na Figura 01.~

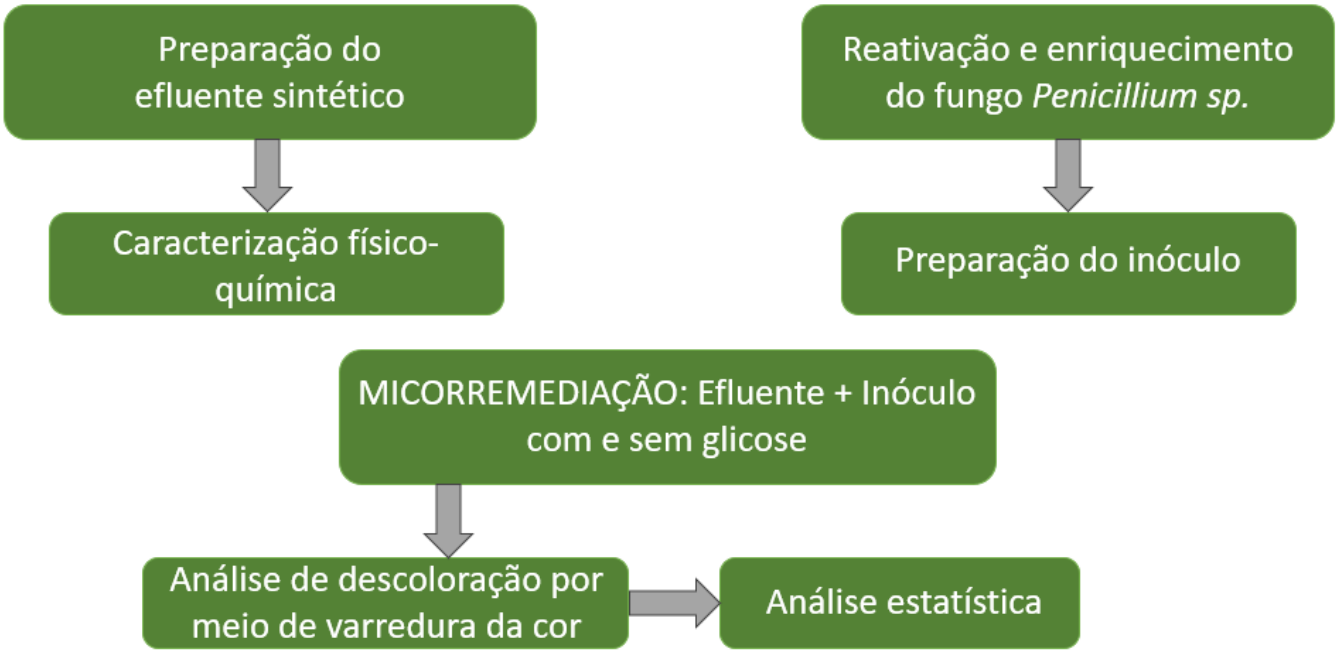


Figura 01: Diagrama das estapas gerais da metodologia.
Fonte: Autoria própria (2026)

Para a preparação do efluente sintético, adotou-se uma composição baseada em um banho de tingimento convencional da indústria, constituida por 1 litro de água destilada, 0,1g de corante azul turquesa reativo, 0,25g de cloreto de sódio (NaCl) e 0,15g de carbonato de sódio (barrilha). Destaca-se, que o efluente sintético foi utilizado no mesmo dia de sua preparação.

Após o preparo, realizou-se a caracterização do efluente em relação a determinados parâmetros de acordo com as metodologias do Standard Methods of Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017) e também a determinação do espectro de máxima absorbância por meio da varredura de cor. Estes itens estão apresentados no Quadro 01.

Parâmetro	Código (APHA, 2017)	Equipamento	Modelo/Marca	Comprimento de onda (nm)
pH	4500-H^+ B	pHmetro	PHB-550 Incoterm	-
turbidez	2130 B	turbidímetro	DLT WV Del Lab	-
condutividade elétrica	2510 B	condutivímetro	Thermo Scientific	-
DQO (Demanda Química de Oxigênio)	5220 D	espectrofotômetro	DR 5000 Hach	600
Determinação do espectro de máxima absorbância	-	espectrofotômetro	DR 5000 Hach	400-700

Quadro 01: Parâmetros de caracterização do efluente.
Fonte: Autoria própria (2026)

As cepas de *Penicillium sp.* utilizadas neste estudo foram disponibilizadas pela aluna Maria Eduarda Aranega Pesenti, que realizou o isolamento do microrganismo em seu trabalho de conclusão de curso (Pesenti, 2023). O fungo foi originalmente obtido a partir de lixiviado coletado na Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Londrina, localizada no distrito de Maravilha – PR, sendo posteriormente mantido em meio Ágar Sabouraud inclinado para conservação.

Para a reativação, o microrganismo foi transferido do meio inclinado para placas de Petri contendo meio sólido Ágar Sabouraud. As placas foram incubadas em estufa bacteriológica a 28 °C por um período de cinco dias. Após o desenvolvimento do fungo, as culturas foram armazenadas sob refrigeração, a aproximadamente 8 °C, até sua utilização.

A obtenção do inóculo também seguiu o protocolo descrito por Pesenti (2023). Inicialmente, uma fração da biomassa fúngica presente na placa foi coletada e transferida para 10 mL de meio líquido de enriquecimento, composto por Malte 2% e Peptona 0,2% (MA2). Em seguida, a cultura foi mantida em incubação sob agitação em shaker, a 140 rpm e 28 °C, durante quatro dias, sendo posteriormente empregada nos ensaios de biorremediação.

Antes do início da biorremediação, foi realizada a análise de cor do efluente por espectrofotometria UV-Vis, com varredura na faixa de 400 a 700 nm, a fim de determinar o comprimento de onda de máxima absorção, conforme metodologias descritas por Marín (2015) e Araújo *et al*. (2024). Esse procedimento foi realizado antes e após o tratamento, permitindo o cálculo da porcentagem de descoloração por meio da Equação (01), conforme aplicado por Zavilenski (2022). Ressalta-se que a absorbância inicial foi medida após o ajuste do pH, de acordo com os valores definidos no planejamento experimental.

$$Descoloração(\%) = \frac{Ainicial - Afinal}{Ainicial} \times 100 \qquad (01)$$

Onde: *Ainicial* é Absorbância inicial, antes da micorremediação e *Afinal* é Absorbância final, após a micorremediação.

Para montagem das unidades experimentais, baseou-se na metodologia aplicada por Bonassa (2021) com adaptações. Foram colocados em erlenmeyers de 250 mL, 100 mL de efluente, além disso foram preparados dois conjuntos experimentais, um com glicose (1g/100 mL) visando suplementar o efluente e outro sem a presença de glicose. Na Figura 02, observa-se a montagem das unidades experimentais.



Figura 02: Montagem das unidades experimentais.
Fonte: Autoria própria com auxílio de inteligência artificial (NotebookLM) (2026)

O volume de inóculo adicionado em cada amostra de efluente, bem como o pH inicial e o tempo de micorremediação foram estabelecidos de acordo com o delineamento composto central rotacional (DCCR). Neste estudo, para avaliar a influência destas variáveis na remoção da cor, utilizou-se um DCCR variando nos níveis codificados fatoriais (-1, 0 e 1) e axiais (-1,68 e 1,68) para os respectivos valores reais. Na Tabela 01 está representado este delineamento.

Além das unidades experimentais apresentadas no DCCR, realizou-se um ensaio controle, sem adição de inóculo, com e sem a presença de glicose, para observar se haveria degradação espontânea da cor. Após, considerando o tempo de cultivo estabelecido para cada unidade experimental, a degradação foi interrompida realizando a filtração à vácuo do efluente utilizando uma membrana de 1,2µm, obtendo assim a fração da biomassa retida na membrana e o extrato líquido, o qual foi submetido a nova varredura para a análise da remoção de cor.

Por fim, os resultados foram analisados por meio de variância (ANOVA) com um nível de 5% de significância (p-valor< 0,05) e construção do gráfico de Pareto no software StatSoft Statistica 12.5.

Ensaio	pH	Tempo de cultivo (dias)	Volume de inóculo (mL)
1	4.0 (-1)	4.0 (-1)	2.0 (-1)
2	4.0 (-1)	4.0 (-1)	5.0 (1)
3	4.0 (-1)	12.0 (1)	2.0 (-1)
4	4.0 (-1)	12.0 (1)	5.0 (1)
5	6.0 (1)	4.0 (-1)	2.0 (-1)
6	6.0 (1)	4.0 (-1)	5.0 (1)
7	6.0 (1)	12.0 (1)	2.0 (-1)
8	6.0 (1)	12.0 (1)	5.0 (1)
9	3.32 (-1.68)	8.0 (0)	3.5 (0)
10	6.68 (1.68)	8.0 (0)	3.5 (0)
11	5.0 (0)	1.27 (-1.68)	3.5 (0)
12	5.0 (0)	14.73 (1.68)	3.5 (0)
13	5.0 (0)	8.0 (0)	0.98 (-1.68)
14	5.0 (0)	8.0 (0)	6.02 (1.68)
15	5.0 (0)	8.0 (0)	3.5 (0)
16	5.0 (0)	8.0 (0)	3.5 (0)
17	5.0 (0)	8.0 (0)	3.5 (0)

Tabela 01: Delineamento Composto Central Rotacional.
Fonte: Autoria própria (2025)

Resultados e Discussão

Os resultados da caracterização do efluente sintético em relação aos parâmetros físico-químicos estão apresentados na Tabela 02.

Parâmetro	Efluente sintético
pH	10,41
Condutividade elétrica (µS/cm)	888
Turbidez (NTU)	<0,10
DQO (mg/L)	47,97
Espectro de Máxima Absorbância (nm)	665
Absorbância (abs)	1,324

Tabela 02: Caracterização do efluente sintético.
Fonte: Autoria própria (2026)

O efluente sintético apresentou características diretamente relacionadas à sua composição, destacando-se o pH elevado (10,41), que pode ser atribuído à presença de carbonato de sódio, que confere este caráter alcalino e pode influenciar tanto na estabilidade do corante quanto na atividade microbiana. A condutividade elétrica de 888 µS/cm indicou a presença de sais dissolvidos, principalmente cloreto de sódio, ainda que em baixa concentração. A turbidez reduzida (< 0,10 NTU) evidencia a ausência de sólidos suspensos, confirmando que os componentes estavam completamente dissolvidos. A DQO apresentou valor relativamente baixo (47,97 mg/L), coerente com a baixa carga orgânica do efluente. Por fim, a elevada absorbância (1,324) no comprimento de onda de 665 nm confirmou a presença de coloração intensa associada ao corante reativo, demonstrando que, apesar da baixa turbidez e carga orgânica, o efluente apresenta intensidade de cor.

Após a micorremediação, em que cada ensaio foi realizado com base nos níveis das variáveis estabelecidos no DCCR, foram realizadas as análises de remoção de cor. Os resultados dos ensaios com a presença de glicose e sem glicose no efluente sintético estão apresentados na Figura 03. Destaca-se os ensaios controle que foram realizados com e sem glicose não apresentaram diferenças relevantes entre a absorbância inicial e final, demonstrando que não houve degradação espontânea da cor.

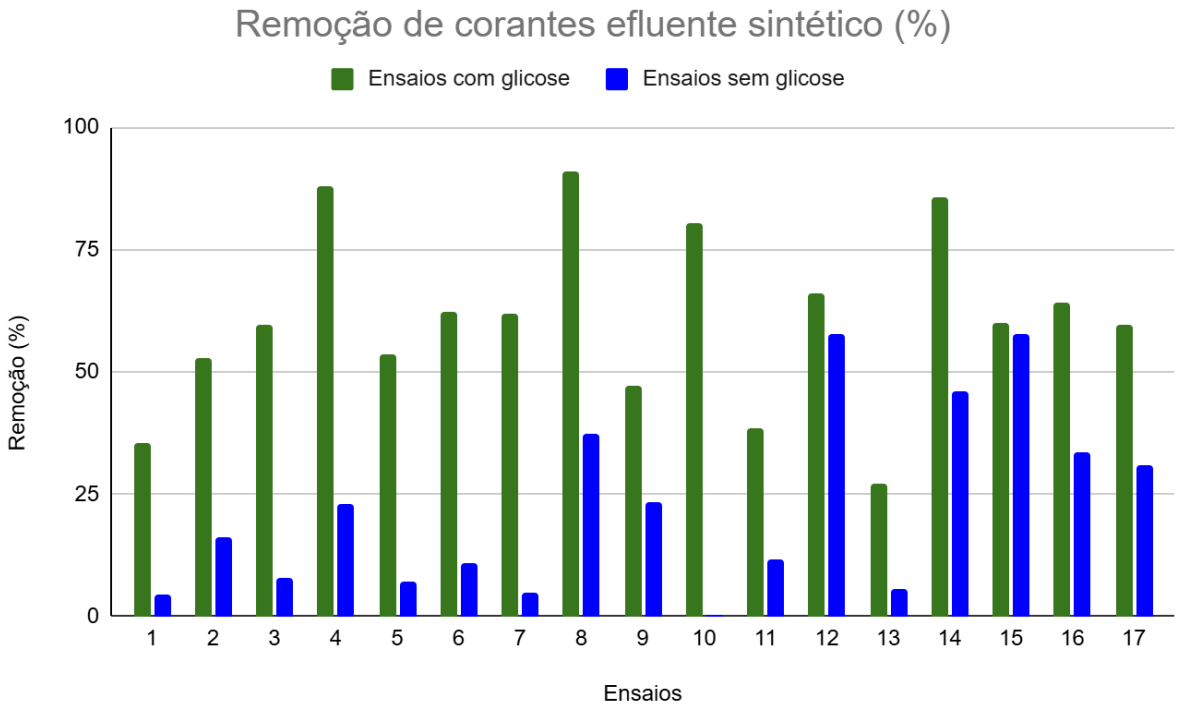


Figura 03: Gráfico de remoção de corantes efluente sintético.
Fonte: Autoria própria (2026)

As porcentagens de remoção de cor nos ensaios com adição de glicose variaram aproximadamente entre 27% e 91%, valores que estão de acordo com resultados presentes na literatura. No estudo de Lira (2019), por exemplo, o gênero *Penicillium* apresentou remoção de 71,96% em efluente têxtil, enquanto Liu *et al*. (2021) observaram eficiência de até 85% na remoção do corante azul de metileno utilizando o mesmo gênero de fungo. Estes dados, indicam que a suplementação com glicose, possivelmente, favorece o crescimento fúngico e, consequentemente, aumenta a eficiência na remoção de cor.

Em contrapartida, nos ensaios realizados sem a adição de glicose, a remoção de cor apresentou variação aproximada entre 0,3% e 58%, valores inferiores quando comparados aos obtidos na presença de glicose. Ainda assim, esses resultados permanecem compatíveis com determinadas literaturas, como observado no estudo de Silva e Monteiro (2000), no qual o gênero *Penicillium* apresentou cerca de 16% de remoção para o corante Remazol Brilliant Blue Reactive (RBBR).

Para observação visual da remoção de cor do efluente, na Figura 04 está apresentado o efluente sintético antes do inicio da biorremediação (erlenmeyer à esquerda) e o ensaio 8 (sem glicose) e 8G (com glicose) após 12 dias de tratamento, pH inicial de 6 e 5mL de volume de inóculo (béqueres à direita). O ensaio 8 apresentou 37,32% enquanto o ensaio 8G apresentou 90,81%, sendo esta a maior remoção alcançada.

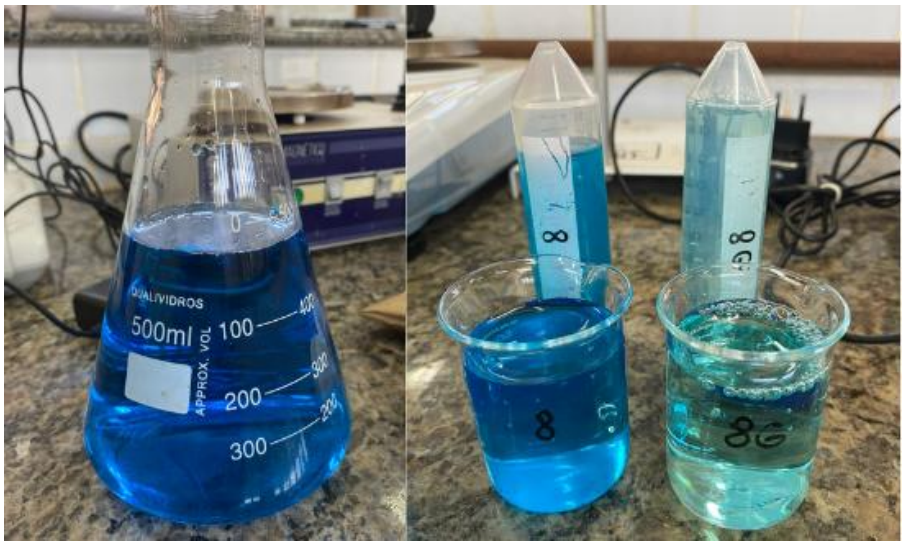
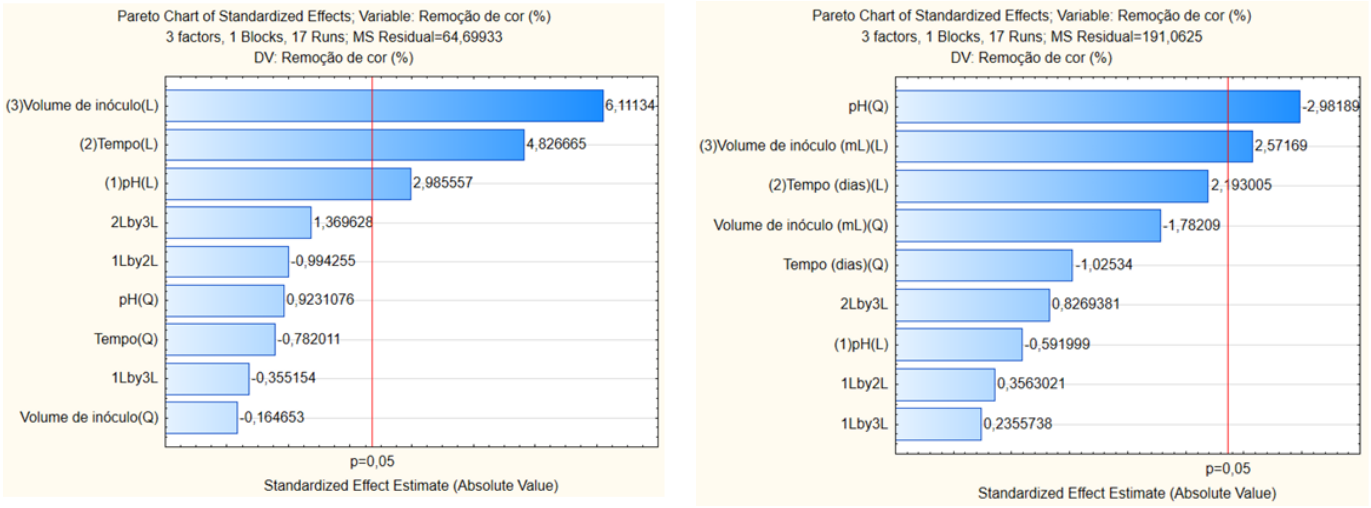


Figura 04: Efluente inicial e remoção de cor do ensaio 8 com e sem glicose.
Fonte: Autoria própria (2026)

A análise estatística dos resultados foi realizada por meio da análise de variância ANOVA, permitindo a identificação dos fatores significativos no processo de remoção de cor. Para os ensaios com glicose, verificou-se que pH, tempo de tratamento e volume de inóculo foram estatisticamente significativos em sua forma linear ($p < 0,05$), enquanto os termos quadráticos e as interações entre os fatores não apresentaram significância. Já nos ensaios sem glicose, apenas o volume de inóculo foi significativo na forma linear, além do termo quadrático do pH, indicando um comportamento de curvatura dessa variável. O tempo de tratamento e as interações das variáveis não foram estatisticamente significativos. Na Figura 05, estão apresentados os gráficos de Pareto para os ensaios com a presença de glicose (a) e ensaios sem adição de glicose (b).



(a) (b)

Figura 05: Gráficos de Pareto dos (a) ensaios com glicose e (b) ensaios sem glicose.
Fonte: Autoria própria (2025)

De acordo com os gráficos de Pareto, observa-se que, nos ensaios com glicose, o volume de inóculo apresentou o maior efeito positivo na remoção de cor, seguido do tempo de tratamento e do pH, em concordância com os resultados obtidos pela ANOVA. Por outro lado, nos ensaios sem glicose, verifica-se menor influência das variáveis, com destaque para o efeito positivo do volume de inóculo e o efeito negativo do termo quadrático do pH, indicando que há uma curvatura no efeito da resposta, ou seja, como ela aumenta até certo ponto e depois começa a diminuir. Dessa forma, o gráfico de Pareto complementa a análise estatística ao evidenciar a magnitude e a direção dos efeitos dessas variáveis no processo.

Ainda, constatou-se que, nos ensaios com glicose, quanto maior o volume de inóculo, em geral, maior foi a remoção de cor. Paralelamente, os maiores tempos de tratamento apresentaram destaque nos resultados e, em relação ao pH, os valores médios apresentaram as maiores remoções de cor. Já no caso dos ensaios sem a suplementação com glicose, verifica-se que os melhores resultados de remoção de cor ocorreram nos valores intermediários de volume de inóculo. Apesar disso, não foi possível identificar os pontos ótimos de resposta para nenhum dos conjuntos de ensaios. Tornando-se necessário ajustar os níveis dos fatores para obtenção da curvatura da superfície e identificação dos pontos ótimos.

A partir de todos os resultados apresentados, destaca-se que a remoção de cor foi mais expressiva nos ensaios com a presença de glicose, apresentando as maiores porcentagens de remoção. Isto pode ser explicado pelo maior crescimento fúngico, ocasionado pela suplementação do efluente com a glicose, contribuido para uma maior atividade dos fungos e promovendo uma maior remoção da cor.

Por fim, como evidenciado nos resultados de Pizato *et al*. (2017), um fator que deve ser destacado é que os resultados obtidos sugerem que a remoção do cor possivelmente ocorreu pelo mecanismo de adsorção dos corantes a biomassa fúngica, afinal ao fim da micorremediação, a biomassa presente nas membranas apresentaram intensa coloração azul, sendo diferente da cor natural do fungo.

Considerações Finais

Diante dos resultados, verificou-se que o fungo *Penicillium sp*. apresentou desempenho satisfatório na remoção de cor do efluente sintético analisado, atingindo uma eficiência de até 90,81%. Os melhores resultados foram observados na presença de glicose, que atuou como fonte adicional de carbono, favorecendo a atividade de remoção de cor. A análise estatística indicou a necessidade de ajustes no planejamento experimental, nos níveis de pH, volume de inóculo e tempo de tratamento, a fim de aprimorar a compreensão da influência dessas variáveis no processo. Dessa forma, recomenda-se, em estudos futuros, a reavaliação dessas condições para melhor entendimento do comportamento do sistema e identificação dos pontos ótimos para o processo de micorremediação.

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos reforçam o potencial do *Penicillium sp*. na biorremediação de efluentes têxteis, mostrando-se como uma alternativa sustentável e de baixo custo para a complementação dos tratamentos físico-químicos destes efluentes e visando a mitigação dos impactos ambientais negativos associados à indústria têxtil.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UTFPR pelo suporte institucional, ao CNPq e à CAPES pela concessão de bolsa, que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil. Industria têxtil e de confecção aumentou a produção e gerou 30 mil empregos em 2024. Jan. 2025. Disponível em: https://www.abit.org.br/noticias/industria-textil-e-de-confeccao-aumentou-a-producao e-gerou-30-mil-empregos-em-2024. Acesso em: 15 mai. 2025.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 23. ed. Washington, D.C.: APHA, 2017.

ARAÚJO, G. J. *et al*. Validação de método espectrométrico para quantificação de um derivado de N-acilhidrazona. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 61, n. 4, p. 950 968, 2024.

BEZERRA, K. C. H. **Estudo de remoção de cor de efluentes têxteis por meio do processo oxidativo avançado: UV/H2O2**. Dissertação (Mestrado em Têxtil e Moda). Programa de Pós-Graduação em Têxtil e Moda, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

BONASSA, G. R. **Seleção de fungos para o desenvolvimento de bioinoculante para biorremediação de solos agrícolas impactados com atrazina**. 2021. 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Biotecnologia) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

BUSCIO, V.; CRESPI, M.; GUTIÉRREZ-BOUZÁN, C. Sustainable dyeing of denim using indigo dye recovered with polyvinylidene difluoride ultrafiltration membranes. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 201-207, 2015.

CARNEIRO, P. A. *et al*. Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes. **Journal of hazardous materials**, v. 174, n. 1-3, p. 694-699, 2010.

DEWI, R. S. *et al*. Bioremediation of Indigosol Blue 04B Batik Effluent by Indigenous Fungal Isolates, Aspergillus spp. **Omni-Akuatika**, v. 14, n. 2, p. 11- 20, 2018.

LIRA, D. D. de. **Biodegradação de efluentes por fungos filamentosos**. Tese de Doutorado em Biologia de Fungos– Departamento de Micologia, Centro de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

LIU, J. *et al*. Optimization of decoloration conditions of methylene blue wastewater by *Penicillium* P1. **Indian Journal of Microbiology**, v. 62, n. 1, p. 103-111, 2021.

MANI, S.; CHOWDHARY, P.; BHARAGAVA, R. N. Textile wastewater dyes: toxicity profile and treatment approaches. In: **Emerging and Eco-Friendly Approaches for Waste Management. Springer**, Singapore, p. 219-244, 2019.

MARIN, S. L. A. **Remoção dos corantes têxteis C.I. Reactive Blue 203 e C.I. Reactive Red 195 mediante o uso de bagaço de maçã como adsorvente**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

NAWAZ, M. S.; AHSAN, M. Comparison of physico-chemical, advanced oxidation and biological techniques for the textile wastewater treatment. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, p. 717-722, 2014.

PEIXOTO, F.; MARINHO, G.; RODRIGUES, K. 2013. Corantes Têxteis: Uma Revisão. **HOLOS**, Volume 5, pp. 98- 106.

PESENTI, M. E. A. **Emprego da micorremediação para a redução da toxicidade de lixiviado proveniente de aterro sanitário.** 2023. 80 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária). – Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2023.

PIZATO, E. *et al*. Caracterização de efluente têxtil e avaliação da capacidade de remoção de cor utilizando o fungo Lasiodiplodia theobromae MMPI. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 1027–1035. 2017.

PRZYSTAŚ, W.; ZABŁOCKA-GODLEWSKA, E.; GRABIŃSKA-SOTA, E. Efficiency of decolorization of different dyes using fungal biomass immobilized on different solid supports. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, n. 2, p. 285- 295, 2018.

SILVA, J. H.; MONTEIRO, R. T. R. Degradação de xenobióticos por fungos filamentosos isolados de areia fenólica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 669-74, 2000.

SOLÍS, M. *et al*. Microbial decolouration of azo dyes: a review. **Process Biochemistry**, v. 47, n. 12, p. 1723-1748, 2012.

SONG, L. *et al*. Performance of a newly isolated salt-tolerant yeast strain Pichia occidentalis G1 for degrading and detoxifying azo dyes. **Bioresource technology**, v. 233, p. 21-29, 2017.

ZAVILENSKI, A. I. **Biossorção de corantes têxteis utilizando biomassa fúngica residual**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2022.

ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA DETECÇÃO DE MICROPLÁSTICOS POR ESPECTROSCOPIA RAMAN EM DIFERENTES MATRIZES

1 Amanda Gonçalves Kieling, 2 Graziela Taís Schmitt , 3 Alisson Schons, 4 Kelly Correia de Lima, 5 Milena Vargas Schneider, 6Marcelo Oliveira Caetano, 7Luciana Paulo Gomes

1 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: amandag@unisinos.br; 2 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: grazi_gts@hotmail.com; 3 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: alissonschons90@gmail.com; 4 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: kellylima91@hotmail.com; 5 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: mivargas8387@gmail.com; 6 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: mocaetano@unisinos.br; 7 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: lugomes@unisinos.br;

Palavras-chave: Poluição; Microplásticos; Espectroscopia Raman

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicação da espectroscopia Raman na identificação de microplásticos (MPs)em diferentes matrizes (esgoto sanitário, lixiviado e músculo de peixe), considerando as etapas de amostragem, pré-tratamento, filtração e caracterização física e química. Inicialmente, foi realizada uma abordagem bibliográfica para fundamentar os principais procedimentos analíticos empregados na detecção de MPs, destacando a necessidade de adaptação conforme a complexidade de cada matriz. Em seguida, esses referenciais foram aplicados experimentalmente às amostras, com adequações específicas para cada tipo de amostra a ser analisada por espectroscopia Raman. Os resultados confirmaram a presença de microplásticos em todas as matrizes analisadas, com diferenças em abundância, características físicas e composição química. No esgoto sanitário, observou-se redução parcial dos MPs após o tratamento, enquanto o lixiviado apresentou ocorrência contínua, indicando seu papel como fonte de dispersão. No músculo de peixe, a detecção de MPs confirmou sua incorporação na biota. Em todas as matrizes, houve predominância de partículas de pequeno tamanho, morfologia fragmentada e polímeros como polietileno e polipropileno, associados ao uso disseminado de plásticos no cotidiano, a disposição inadequada e a fragmentação desses polímeros. A espectroscopia Raman mostrou-se uma ferramenta eficaz para a identificação física e química dos MPs, permitindo análises detalhadas mesmo em matrizes complexas. Os resultados reforçam a necessidade de padronização metodológica e destacam a relevância da espectroscopia Raman como ferramenta robusta para identificação de microplásticos em matrizes ambientais complexas.

Introdução

As características materiais dos plásticos, especialmente a leveza, durabilidade e resistência à corrosão, são responsáveis por sua ampla utilização na indústria e na vida cotidiana. No entanto, o uso generalizado, produção de alto nível, descarte rápido e resistência à degradação resultaram em sua disposição em larga escala no meio ambiente, tornando-se uma preocupação ambiental global (XU *et al*., 2020).

O principal problema associado à produção intensiva de plásticos é a geração de resíduos. Como a demanda mundial por materiais plásticos continua a crescer, a gestão de resíduos plásticos continuará sendo um desafio global. Estima-se que uma parcela significativa do plástico produzido globalmente tenha sido descartada de forma inadequada (GEYER *et al*., 2017).

Os resíduos plásticos podem ser fragmentados a detritos menores, sendo os microplásticos (MPs) aqueles com tamanho entre 0,001 e 5 mm (ARTHUR; BAKER; BAMFORD, 2009; LIU *et al*., 2020), que atualmente figuram entre os poluentes mais preocupantes. Os MPs podem ser encontrados em diferentes formas, como espumas, fragmentos, esferas, fibras e grânulos. Tanto o tamanho quanto a forma dos MPs determinam seu destino e degradação no meio ambiente (GOLWALA *et al*., 2021; SU *et al*., 2019). Os MPs podem provir tanto de fontes primárias quanto secundárias. Primários, produzidos de forma intencional em tamanhos reduzidos; secundários, produzidos de forma não intencional, resultado da fragmentação de plásticos maiores (WU *et al*., 2019).

As principais preocupações quanto aos MPs estão relacionadas aos seus efeitos potencialmente nocivos sobre o meio ambiente e a biota, sendo eles: a) a durabilidade do plástico torna-o altamente resistente à degradação; b) grande parte da matéria-prima e insumos para produção dos plásticos é de origem fóssil; c) detritos de plástico são vulneráveis à fragmentação; d) os MPs podem contribuir para o transporte de substâncias químicas, pois possuem características que possibilitam a sorção de contaminantes em sua superfície; e) podem liberar substâncias (aditivos) que são incorporados durante seu processo de fabricação; f) detritos de plástico podem causar ferimentos e morte de aves marinhas, mamíferos, peixes e répteis por emaranhamento e ingestão (ALOMAR *et al*., 2017; KARBALAEI *et al*., 2018; XU *et al*., 2020; WRIGHT; THOMPSON; GALLOWAY, 2013).

Considerados poluentes onipresentes, os MPs já foram identificados em praticamente todos os compartimentos ambientais, incluindo regiões costeiras e profundas dos oceanos (ERIKSEN *et al*., 2014; FORD *et al*., 2022). Estudos relataram a ocorrência de MPs em mares (ERIKSEN *et al*., 2014), no oceano Antártico (WALLER *et al*., 2017), oceano Pacífico (PAN *et al*., 2019), lagos (BERTOLDI *et al*., 2021), rios (ALAM *et al*., 2019), atmosfera (GASPERI *et al*., 2018), areia de praia (YU *et al*., 2016) e biota marinha (ALOMAR *et al*., 2017; CARON *et al*., 2018; RIBEIRO *et al*., 2019).

Além disso, foram encontrados em aterros sanitários (LODH; SHAFI; GOEL, 2025; NAYAHI *et al*., 2022; WU *et al*., 2019) estações de tratamento de esgoto (ETEs) (HOU *et al*., 2021; MURPHY *et al*., 2016) e até mesmo em água potável (MASON;

WELCH; NERATKO, 2018), sal marinho (IÑIGUEZ; CONESA; FULLANA, 2017), cerveja (LIEBEZEIT; LIEBEZEIT, 2014), mel e açúcar (LIEBEZEIT; LIEBEZEIT, 2013).

Apesar da presença generalizada de MPs em diferentes matrizes ambientais, os métodos utilizados na detecção de microplásticos ainda não são padronizados, o que certamente dificulta a comparação de resultados obtidos em diferentes estudos. Em geral, os trabalhos de coleta e pré-tratamento das amostras passam pelos processos de separação das partículas (seleção da faixa de tamanhos), remoção de matéria orgânica, seleção visual sob microscópio óptico seguido de métodos de confirmação (MACHADO *et al*., 2017; ZHANG et al., 2018).

Entre as técnicas amplamente empregadas para a detecção e identificação de microplásticos (MPs), tais como a microscopia eletrônica de varredura (MEV), a microscopia eletrônica de transmissão (MET) e a espectroscopia no infravermelho (IV), destaca-se a espectroscopia Raman como uma ferramenta de grande relevância (RAGUSA *et al*., 2022). Essa técnica apresenta elevada capacidade de diferenciação entre distintos tipos de polímeros e pode ser acoplada à microscopia óptica, possibilitando a focalização do laser em MPs com resolução espacial de até 1 μm (LÖDER; GERDTS, 2015). Em virtude dessas características, a espectroscopia Raman configura-se como uma das principais abordagens para a detecção de fragmentos plásticos em escala micrométrica, especialmente em matrizes complexas.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar o uso da espectroscopia de Raman na identificação de microplásticos em 3 amostras diferentes (esgoto sanitário, lixiviado e músculo de peixe), considerando as adaptações metodológicas necessárias em cada etapa analítica.

Material e Métodos

O presente estudo adota uma abordagem metodológica combinada, envolvendo revisão da literatura e aplicação experimental de procedimentos analíticos para identificação de microplásticos. Inicialmente, são discutidos os procedimentos consolidados para cada etapa do processo analítico, incluindo amostragem, pré-tratamento, separação/filtração e caracterização física e química. Posteriormente, esses referenciais são articulados com a descrição dos procedimentos efetivamente aplicados em três diferentes matrizes ambientais: esgoto sanitário, lixiviado e músculo de peixe.

Amostragem

No processo de identificar a presença de MPs em amostras ambientais, a etapa inicial é a amostragem. Existem diferentes protocolos que podem ser utilizados, assim, a escolha do método de amostragem é fundamentalmente influenciada pela natureza de cada matriz (BERTOLDI *et al.,* 2021; MONTAGNER *et al*., 2021). A representatividade da amostragem deve ser priorizada para evitar possíveis erros devido à baixa concentração e heterogeneidade dos MPs.

Pré- Tratamento das Amostras

As amostras aquosas podem passar por um processo de peneiramento. Esse processo não requer equipamento especializado e são simples de manusear. No entanto, é uma etapa fundamental para a pesquisa, onde por meio das peneiras, são definidos os tamanhos de partículas plásticas que serão analisadas. (PRATA *et al.,* 2019).

Para contar e caracterizar MPs adequadamente, em algumas matrizes, a matéria orgânica precisa ser removida por métodos que não danifiquem as propriedades químicas e estruturais dos polímeros (MONTAGNER *et al*., 2021).
Os métodos mais comuns encontrados na literatura são aqueles baseados em digestão com soluções ácidas ou alcalinas, digestão enzimática e digestão por oxidação química, utilizando oxidantes como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) ou hipoclorito de sódio (NaClO) (KABIR *et al*., 2023; PRATA *et al*., 2019).

Separação dos Microplásticos

Após o pré-tratamento, a separação dos MP pode ser realizada por filtração ou por técnicas de separação por densidade (RODRIGUES, 2022). A filtragem e o peneiramento são os métodos mais utilizados para amostras de água (PRATA *et al*., 2019). Na separação de densidade, soluções salinas de alta densidade, como NaCl (densidade 1,2 g cm^{-3}), podem ser adicionados nas amostras. Porém, com a utilização dessa técnica, é possível separar os polímeros com densidade até 1,2 g cm^{-3} (Polipropileno, Poliuretano, Polietileno, Poliamida e Poliestireno) enquanto os polímeros com densidade superior, como Polietileno Tereftalato e Policloreto de Vinila, permanecerão no precipitado (MONTAGNER *et al*., 2021).

Caracterização do Microplásticos

As características dos MPs desempenham um papel fundamental na sua distribuição e transferência para o meio ambiente. Na caracterização física, os MPs podem ser classificados de acordo com suas características morfológicas, como tamanho, forma e textura, e através de propriedades óticas, como a cor (HIDALGO-RUZ *et al*., 2012; LUSHER *et al.*, 2020).

Dentre as características morfológicas, os MPs são comumente classificados quanto ao seu tamanho. Apesar da falta de uniformidade nessa categorização, é recomendado que se leve em consideração com mais precisão o tamanho desses MPs, ao invés de apenas diferenciá-los como menores ou maiores que 5 mm. Assim, aumentar o número de categorias de tamanho, permite a interpretação dos resultados em uma escala mais ampla (BERTOLDI *et al*., 2021; LUSHER *et al.*, 2020).

Quanto à forma, as partículas de microplásticos exibem morfologias altamente heterogêneas, sendo descritas com diversas terminologias, como esferas, fragmentos, fibras, filamentos, linhas, pellet, flocos, grânulos, filmes, espumas, entre outros. A identificação e registro da forma das partículas é um meio importante para identificar fontes potenciais ou inferir a

interação ambiental, como o comportamento das partículas em sistemas ambientais e a potencial de ingestão pela biota (LUSHER *et al.*, 2020). Com o intuito de facilitar a comparação entre pesquisas de regiões distintas, Lusher *et al*., (2020) recomendam a classificação em três grandes grupos de formas: esferas, fibras e fragmentos.

Em relação a propriedade ótica cor, Lusher *et al*., (2020) relatam que em geral, os MPs possuem coloração homogênea, exceto aqueles produzidos com várias cores ou que estão em processo de descoloração devido a fatores de intemperismo. Com o intuito de reduzir a variação na percepção da identificação visual dos MPs, recomenda-se a registrar as cores no nível das cores secundárias (vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, violeta), além de incluir preto, branco e transparente (incolor).

Deste modo, para a caracterização física (visual), a principal técnica utilizada é o uso do microscópio ótico ou estereomicroscópio. A vantagem de seu uso é o baixo custo de operação e acessibilidade (BERTOLDI *et al*., 2021). No entanto, outras partículas também podem ser erroneamente caracterizadas como MPs, e a taxa de erro aumenta consideravelmente com a diminuição do tamanho da partícula. Por esse motivo, o uso de técnicas de espectroscopia é recomendado para análise de MPs, pois pode determinar a composição química dos fragmentos com alta confiabilidade (HIDALGO-RUZ *et al*., 2012; KABIR *et al*., 2023).

Os métodos analíticos frequentemente aplicados para a caracterização química são as técnicas de espectroscopia, como espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), microscópio eletrônico de varredura (MEV) e Espectroscopia Raman (LUSHER *et al.*, 2020; WANG *et al*., 2023). Mas também a literatura relata o uso de técnicas termoanalíticas, como a análise termogravimétrica (TGA), hifenadas à cromatografia gasosa com espectrometria de massas.

Raman é uma técnica não destrutiva, sendo indicada para identificação de partículas menores que 0,02 mm. A espectroscopia Raman é uma técnica de espectroscopia vibracional baseada na dispersão inelástica da luz que fornece informações sobre as vibrações moleculares de um sistema na forma de um espectro vibracional. O espectro Raman é semelhante a uma impressão digital da estrutura química que permite a identificação dos componentes presentes na amostra (ADHIKARI *et al*., 2021; ARAUJO *et al*., 2018). De acordo com Montagner *et al*., (2021), a espectroscopia RAMAN é uma técnica essencialmente microscópica e apresenta limite de difração muito menor que aquele alcançado pela µ-FTIR (de até 266 nm utilizando laser 532 nm, por exemplo).

Algumas das vantagens da espectroscopia Raman são seu baixo requisito de quantidade de amostra e a viabilidade de caracterizar a estereoregularidade dos polímeros que estão sendo rastreados. Em comparação com o FTIR, a técnica Raman não sofre interferência da espessura e umidade da amostra e tem maior confiabilidade, uma faixa espectral mais abrangente e bandas espectrais mais estreitas, o que facilita a caracterização química (ADHIKARI *et al*., 2021; WANG *et al.,* 2023).

Porém, as desvantagens da técnica estão relacionadas com a necessidade de maior tempo de integração do sinal espectral devido ao fraco sinal Raman e, por isso, maior tempo de análise; possuir mais variáveis instrumentais, como comprimento de onda do laser, ajuste do foco do laser na amostra, grade de difração, lente objetiva, entre outros, que dificultam a padronização do método, mas também, inclui mais possibilidades de análise (MONTAGNER *et al*., 2021). De acordo com ADHIKARI *et al*. (2021), a fluorescência e alguns pigmentos podem interferir na identificação do tipo de polímero a ser analisado pela espectroscopia Raman. Além disso, ARAUJO *et al*. (2018) destacam que a fonte de luz do laser pode causar aquecimento da amostra, que leva a emissões de fundo e que podem causar degradação do polímero.

Etapas aplicadas para as amostras de esgoto sanitário, lixiviado e músculo de peixe.

Na sequência são apresentadas as etapas metodológicas aplicadas às diferentes matrizes analisadas. A sistematização dessas informações permite evidenciar as adaptações necessárias em cada etapa em função das particularidades de cada tipo de amostra, bem como destacar as estratégias adotadas para a identificação de microplásticos por espectroscopia Raman. Destaca-se que em todos os estudos para garantir a integridade das amostras e minimizar possíveis contaminações por MPs durante as etapas de coleta, transporte e análise laboratorial, foram adotadas medidas rigorosas de controle, conforme recomendado na literatura.

As amostras de esgoto sanitário foram coletadas na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, contemplando os pontos de esgoto bruto (após o gradeamento) e esgoto tratado (antes do lançamento no corpo receptor). Ao término dos ensaios de amostragem, foi coletado um volume total de 2,4 L de esgoto (bruto e tratado), sendo divididos em alíquotas de 300 mL para cada amostra, totalizando 4 ensaios. O pré-tratamento consistiu na digestão por reagente de Fenton, mediante adição de 80 mL da solução (40 mL de Fe^{2+} 0,05 M e 40 mL de H_2O_2 30%), com aquecimento controlado entre 60 e 65 °C, seguido de repouso por sete dias. Após o pré-tratamento, 100 mL de cada alíquota foram submetidos à filtração a vácuo em filtros de silício (10 × 10 mm; poro de 1 µm), totalizando a análise de 24 filtros, sendo posteriormente secos em temperatura ambiente e armazenados em placas de Petri até a análise por Raman. A caracterização dos MPs foi realizada por espectroscopia Raman DXR3, com aquisição espectral na faixa de 600 a 3500 cm^{-1}, laser de 532 nm e objetiva de 20×, com possibilidade de uso de laser de 785 nm para minimizar fluorescência. Foram considerados MPs apenas os espectros com grau de correspondência superior a 60% com a biblioteca. As partículas identificadas foram quantificadas, fotografadas e classificadas quanto à morfologia (microesferas, fibras e fragmentos), cor (verde, vermelho, azul, preto, amarelo, branco, transparente, cinza e marrom) e tamanho (Classe A ≥ 355 µm; Classe B entre 75 e 354 µm; Classe C ≤ 74 µm).

As amostras de lixiviado foram coletadas em uma lagoa de armazenamento de aterro sanitário, na calha Parshall localizada na entrada da lagoa, ao longo de diferentes condições sazonais (períodos chuvosos e secos, em julho e novembro de 2024). Foram coletados 20 L de amostra em frascos de vidro de 5 L. O pré-tratamento iniciou-se com peneiramento em malha de aço inoxidável (0,075 mm), seguido da remoção manual de partículas superiores a 5 mm. Os sólidos retidos foram transferidos

para béquer com 150 mL de água ultrapura e submetidos à digestão por reagente de Fenton (160 mL; 80 mL de Fe^{2+} 0,05 M e 80 mL de H_2O_2 30%), sob aquecimento entre 60 e 65 °C até o término da reação oxidativa. O volume final (~300 mL) foi filtrado a vácuo em filtros de silício (10 × 10 mm; poro de 1 µm), sendo a solução previamente fracionada em alíquotas de 50 mL para evitar sobrecarga do filtro. A caracterização foi conduzida por espectroscopia Raman DXR3, com aquisição espectral entre 100 e 3500 cm^{-1}, laser de 532 nm e objetivas de 10×, 20× ou 50×. Os espectros foram obtidos com tempo de exposição de 2 s e 32 acumulações, com subtração de fundo. Foram considerados MPs os espectros com correspondência superior a 70% com a biblioteca. As partículas identificadas foram classificadas quanto à morfologia (fragmentos, esferas e fibras), cor (transparente, marrom, preto, azul e branco) e tamanho (< 75 µm; 75–100 µm; 100–500 µm; 500–1000 µm; 1000–5000 µm).

As amostras de músculo de peixe foram obtidas a partir de duas espécies, sendo preparadas 10 amostras de 1 g para cada espécie. A coleta foi realizada na região peitoral, utilizando bisturi e pinça metálica, com posterior acondicionamento imediato em frascos de vidro cobertos com papel alumínio e armazenamento em freezer a -20 °C até o processamento. O pré-tratamento consistiu na digestão química com solução aquosa de KOH a 15% (30 mL), em estufa a 40 °C por 72 horas. Após a digestão, as amostras foram inicialmente peneiradas (0,075 mm), com posterior lavagem do material retido com água ultrapura (150 mL), seguida de nova filtração e lavagem adicional (50 mL). O volume final contendo os microplásticos foi submetido à filtração a vácuo em filtros de silício (10 × 10 mm; poro de 1 µm). A caracterização foi realizada por espectroscopia Raman DXR3, com análise direta nos filtros utilizando objetiva de 20×. Os espectros obtidos foram comparados à biblioteca de referência para identificação dos polímeros, considerando o percentual de similaridade. As partículas confirmadas foram registradas fotograficamente, quantificadas e classificadas quanto à morfologia (fibras, fragmentos, esferas, espumas e filmes), além de terem suas dimensões mensuradas e associadas às respectivas amostras.

Resultados e Discussão

Os resultados a seguir apresentam a identificação de MPs nas diferentes matrizes analisadas, considerando as particularidades das etapas metodológicas aplicadas a cada tipo de amostra.

Foram identificadas partículas de MPs em todos os ensaios realizados nas matrizes de esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Unisinos. Nas amostras de esgoto bruto, as concentrações variaram entre 217 a 1013 MPs/L, já para o esgoto tratado, variaram de 117 a 210 MPs/L, indicando que uma parcela importante dos MPs é removida ao longo das etapas de tratamento. Embora, a ETE avaliada promova a redução das concentrações de MPs no esgoto tratado, ocorre retenção parcial dessas partículas no lodo e liberação diária no efluente final de concentrações médias que variam de 1,06 a 1,90 bilhões de MPs/dia. Do ponto de vista físico, verificou-se predominância de partículas de menor tamanho (≤ 74 µm), cores claras (branco e transparente). O perfil morfológico indica um predomínio de fragmentos no esgoto bruto (90%), enquanto no esgoto tratado houve redução relativa dessa categoria, acompanhada por aumento expressivo de microesferas. O esgoto bruto é fortemente dominado por Polietileno (72%), seguido de Polipropileno (19%), indicando possível influência de fontes específicas de resíduos plásticos. No esgoto tratado ocorre uma mudança expressiva na composição química dos MPs. O PE permaneceu como o polímero mais frequente, representando cerca de 37% das partículas identificadas. O PP aumentou sua participação relativa para aproximadamente 31%, enquanto o EVA correspondeu a cerca de 15%. Outros polímeros foram identificados em menores proporções, como PA (cerca de 4%), PET (cerca de 3%) e a categoria "outros" (cerca de 10%), que incluiu polímeros como PVC, EPM, PVAc, PA (66), PMDS, PMMA e PTFE. Esses resultados indicaram um aumento da diversidade química em relação ao esgoto bruto na ETE Unisinos. Na Figura 01 são apresentados exemplos de partículas analisadas nas amostras de esgoto através de espectroscopia Raman.

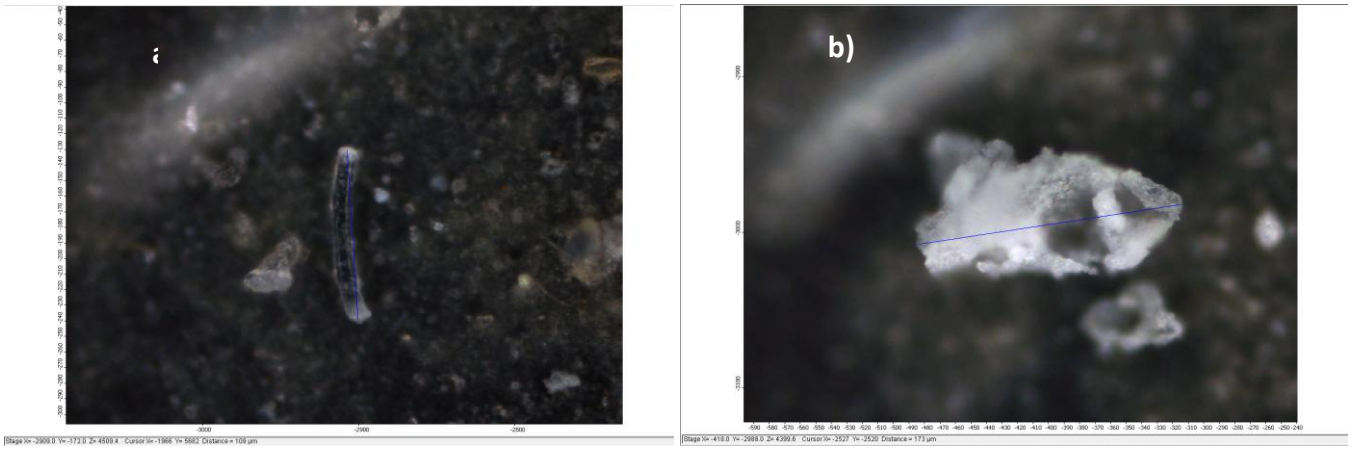


Figura 01: Exemplos de microplásticos observados sob espectroscopia Raman em amostras de esgoto. Legenda: (A) fragmento de PET com 109 µm de largura. (B) Fragmento de PE com 173 µm de largura.
Fonte: Autores (2026)

Microplásticos foram detectados em todas as amostras de lixiviado analisadas ao longo das duas campanhas de coleta, evidenciando sua ocorrência nesta matriz, com concentrações variando entre 13 e 44 itens/L. Os MPs identificados apresentaram

perfil morfológico majoritariamente fragmentado, corroborando a hipótese de que, nos aterros sanitários, a principal via de formação dessas partículas está associada à degradação e fragmentação de resíduos plásticos dispostos ao longo do tempo. A predominância dos polímeros polipropileno (PP) e polietileno (PE) reforça esse entendimento, uma vez que esses materiais, amplamente utilizados em embalagens e produtos descartáveis, constituem uma das maiores frações dos resíduos sólidos urbanos. A caracterização física evidenciou ainda uma elevada proporção de partículas com tamanho inferior a 75 µm (média de 82%). Este resultado destaca que o lixiviado de aterros sanitários pode funcionar não apenas como reservatório, mas também como meio potencial de dispersão de partículas plásticas de pequenas dimensões.

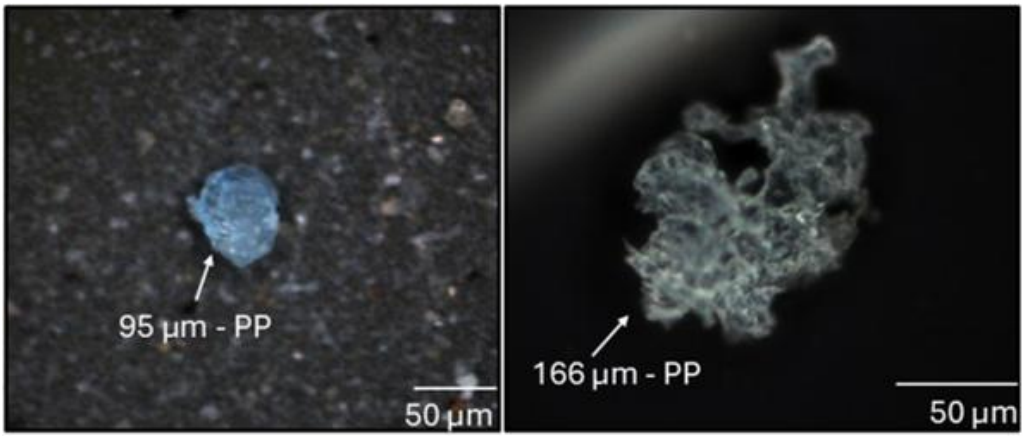


Figura 02: Exemplos de microplásticos observados sob espectroscopia Raman em lixiviado.
Fonte: Autores (2026)

A presença de microplástico foi evidenciada em 17 amostras de músculo de peixe, com variação entre de 0 a 26 partículas/g. A análise morfológica mostrou o predomínio de fragmentos (83%), sendo o formato esponja também detectado (17%), conforme se observa na Figura 03. Com relação à composição química das partículas, observou-se um predomínio de partículas de Etileno-acetato de vinila e Polietileno, sendo também detectada partículas de Estireno-acrilonitrila, Polipropileno e Poliestireno. Esses polímeros são amplamente utilizados em produtos descartáveis, embalagens e utensílios domésticos, e apresentam baixa densidade, o que favorece sua dispersão na coluna d'água e consequente ingestão pelos organismos aquáticos (Geyer *et al*., 2017; Mahu *et al*., 2023).

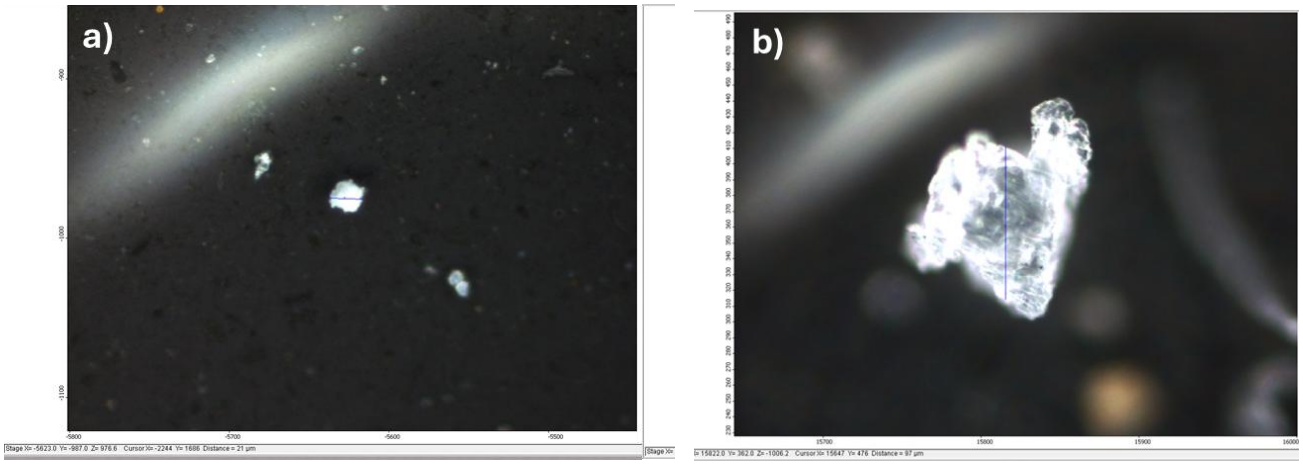


Figura 03: Exemplos de microplásticos observados sob espectroscopia Raman em músculos de peixe. (a) Esponja, com 21 µm de largura; (b) Fragmento, com 97 µm de comprimento.
Fonte: Autores (2026)

Foi possível observar nas diferentes amostras analisadas a predominância de partículas de menor dimensão, morfologia fragmentada e a ocorrência de polímeros amplamente utilizados, evidenciando tanto a diversidade de fontes quanto os processos de degradação envolvidos. Nesse contexto, os resultados permitem uma análise comparativa da ocorrência, características e distribuição dos microplásticos, contribuindo para a compreensão de seu comportamento em diferentes matrizes ambientais e biológicas.

A comparação das etapas metodológicas aplicadas às diferentes matrizes evidencia a necessidade de adaptação dos procedimentos analíticos em função das características físico-químicas de cada amostra, aspecto amplamente discutido na

literatura sobre microplásticos. Estudos indicam que não existe um protocolo universal de preparo de amostras, sendo a escolha das etapas de amostragem, pré-tratamento e separação diretamente dependente da complexidade e heterogeneidade da matriz analisada (KABIR et al., 2023; MONTAGNER et al., 2021). No caso do esgoto sanitário e do lixiviado, a elevada carga de matéria orgânica e sólidos em suspensão justifica o uso de tratamentos oxidativos, como o reagente de Fenton, uma vez que a remoção de matéria orgânica é essencial para evitar interferências na identificação espectroscópica dos polímeros (PRATA et al., 2019; KABIR et al., 2023). Já em matrizes biológicas, como o músculo de peixe, a digestão alcalina com KOH é frequentemente empregada por permitir a degradação eficiente do tecido sem comprometer a integridade dos microplásticos (MONTAGNER et al., 2021; LUSHER et al., 2020).

Apesar dessas diferenças nas etapas iniciais, observa-se uma convergência na etapa de caracterização, na qual a espectroscopia Raman se destaca como uma técnica robusta e amplamente utilizada para identificação química de microplásticos em diferentes matrizes ambientais e biológicas (ADHIKARI et al., 2021; WANG et al., 2023). Essa técnica fornece uma "impressão digital" molecular dos polímeros, permitindo sua identificação mesmo em partículas de pequena dimensão e em amostras complexas (ARAUJO et al., 2018). No entanto, sua eficiência depende diretamente da qualidade do pré-tratamento, uma vez que a presença de matéria orgânica e outros interferentes pode comprometer a análise espectral (MONTAGNER et al., 2021). Nesse sentido, os resultados reforçam que a adequação das etapas de preparo é determinante para o sucesso da aplicação da espectroscopia Raman, evidenciando sua versatilidade como ferramenta analítica quando associada a protocolos metodológicos ajustados às especificidades de cada matriz.

Considerações Finais

Os resultados deste estudo demonstram que a espectroscopia Raman é uma técnica eficaz para a identificação de microplásticos em diferentes matrizes ambientais e biológicas, considerando as particularidades associadas às etapas de preparo das amostras. A adaptação das etapas de amostragem, pré-tratamento e filtração mostrou-se fundamental para garantir a qualidade da análise, evidenciando que não há um protocolo único aplicável a todas as matrizes. Ainda assim, a aplicação consistente da técnica Raman permitiu a obtenção de dados comparáveis quanto às características das partículas de microplásticos.

A ocorrência de microplásticos em esgoto, lixiviado e músculo de peixe reforça a ampla distribuição desses contaminantes no ambiente. Os sistemas de tratamento de esgoto demonstraram capacidade parcial de remoção, enquanto os aterros sanitários atuam como fontes contínuas de dispersão. A presença de MPs na biota confirma sua incorporação na cadeia trófica, destacando possíveis implicações ecológicas e à saúde humana.

Por fim, a predominância de partículas de pequeno tamanho, morfologia fragmentada e polímeros amplamente utilizados, como polietileno e polipropileno, sugere a influência direta do consumo e descarte de plásticos na geração desses contaminantes. Nesse contexto, o estudo contribui para o avanço metodológico na área e reforça a necessidade de padronização de protocolos analíticos, bem como de estratégias integradas de monitoramento e mitigação da poluição por microplásticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio financeiro concedido para a realização deste estudo. Também agradecem à Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento das atividades experimentais.

Referências Bibliográficas

ADHIKARI, Sangeet. *et al*. Methods and challenges in the detection of microplastics and nanoplastics: a mini review. **Polymer International**, 2021. DOI 10.1002/pi.6348

ALAM, Firdha Cahya. *et al*. Microplastic distribution in surface water and sediment river around slum and industrial area (case study: Ciwalengke River, Majalaya district, Indonesia). **Chemosphere**, v. 224, p. 637-645, 2 Mar. 2019. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.188

ALOMAR, C. *et al*. Microplastic ingestion by Mullus surmuletus Linnaeus, 1758 fish and its potential for causing oxidative stress. **Environmental Research**, v. 159, p. 135–142, 08 Aug. 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2017.07.043

ARAUJO, Catarina F. *et al.* Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. **Water Research**, v. 142, p. 426-440, 06 Jun. 2018. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.060

ARTHUR, Courtney; BAKER, Joel; BAMFORD, Holly (ed.). Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris: September 9-11, 2008, Tacoma, WA, USA. Silver Spring: NOAA Marine Debris Program, 2009. (NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30). Disponível em: www.MarineDebris.noaa.gov

BERTOLDI, Crislaine. *et al*. First evidence of microplastic contamination in the freshwater of Lake Guaíba, Porto Alegre, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 759, p. 143503, 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143503

CARON, Alexandra G.M. *et al*. Ingestion of microplastic debris by green sea turtles (*Chelonia mydas*) in the great barrier reef: validation of a sequential extraction protocol. **Marine Pollution Bulletin**, v. 127, p. 743–751, 05 Jan. 2018. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.062

ERIKSEN, Marcus. *et al*. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. **PLoS ONE**, v. 9, n. 12, 2014. doi:10.1371/journal.pone.0111913

FORD, Helen V. *et al*. The Fundamental Links between Climate Change and Marine Plastic Pollution. **Science of the Total Environment**, v. 806, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150392

GASPERI, Johny; WRIGHT, Stephanie L; DRIS, Rachied; COLLARD, France; MANDIN, Corinne; GUERROUACHE, Mohamed; LANGLOIS, Valérie; KELLY, Frank J; TASSIN, Bruno. Microplastics in air: Are we breathing it in? Current Opinion in **Environmental Science & Health,** 1, p. 1-5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002. 2018.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, Washington, v. 3, n. 7, e1700782, 2017. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782.

GOLWALA, Harmita. *et al*. Solid waste: an overlooked source of microplastics to the environment. **Science of the Total Environment**, v. 769, p. 144581, 9 Jan. 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144581

HIDALGO-RUZ, Valeria. *et al.* Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. **Environmental Science & Technology**, v. 46, p. 3060−3075, 09 Fev. 2012. dx.doi.org/10.1021/es2031505

HOU, Liyuan. *et al*. Conversion and removal strategies for microplastics in wastewater treatment plants and landfills. **Chemical Engineering Journal**, v. 406, p. 126715, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126715

IÑIGUEZ, Maria E.; CONESA, Juan A.; FULLANA, Andres. Microplastics in Spanish table salt. **Scientific Reports**, v. 7, p. 8620, 17 Aug. 2017. https://doi.org/10.1038/s41598-017-09128-x.

KABIR, Mosarrat Samiha. *et al*. Microplastics in landfill leachate: Sources, detection, occurrence, and removal. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 16, 15 Feb. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100256

KARBALAEI, Samaneh. *et al*. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 36046–36063, 31 Oct. 2018. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3508-7

LIEBEZEIT, Gerd; LIEBEZEIT, Elisabeth. Non-pollen particulates in honey and sugar. **Food Additives & Contaminants**: Part A, v. 30, n. 12, p. 2136–2140, 28 Oct .2013. https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025.

LIEBEZEIT, Gerd; LIEBEZEIT, Elisabeth. Synthetic particles as contaminants in German beers. **Food Additives & Contaminants**: Part A, v. 31, n. 9, p. 1574–1578, 11 Aug. 2014. https://doi.org/10.1080/19440049.2014.945099.

LIU, Peng. *et al*. Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: Properties, sorption and potential risks. **Chemosphere**, v. 242, p. 125193, 2020. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125193

LÖDER, M. G. J.; GERDTS, G. Methodology used for the detection and identification of microplastics—A critical appraisal. In: BERGMANN, M.; GUTOW, L.; KLAGES, M. (ed.). **Marine Anthropogenic Litter**. Cham: Springer, 2015. p. 201–227. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_8.

LODH, Shubhra Jyoti; SHAFI, Hossain; GOEL, Sudershan. Microplastics in municipal solid waste landfill leachate and their removal in treatment units: A perspective of controlled and uncontrolled landfills. **Environmental Pollution**, v. 369, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125853.

LUSHER, Amy L. *et al*. Is it or isn't it: the importance of visual classification in microplastic characterization. **Environmental Toxicology and Chemistry**, Hoboken, v. 39, n. 9, p. 1834-1838, 2020. https://doi.org/10.1002/etc.4718.

MACHADO, Anderson Abel de Souza. *et al*. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, p. 1405–1416. 2017. DOI: 10.1111/gcb.14020

MASON, Sherri A.; WELCH, Victoria G.; NERATKO, Joseph. Synthetic polymer contamination in bottled water. **Frontiers in Chemistry**, v. 6, 11 Sept. 2018. doi:10.3389/fchem.2018.00407

MONTAGNER Cassiana C. *et al*. Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. **Química Nova**, [s. l.], v. 44, n. 10, p. 1328-1352, 2021. http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170791

MURPHY, Fionn. *et al*. Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. **Environmental Science & Technology**, [s. *l*.], v. 50, p. 5800-5808, 2016. DOI: 10.1021/acs.est.5b05416

NAYAHI, Thaiyal N. *et al*. Municipal solid waste sanitary and open landfills: Contrasting sources of microplastics and its fate in their respective treatment systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, 135095, 08 Nov. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135095

PAN, Zhong. *et al*. Microplastics in the Northwestern Pacific: Abundance, distribution, and characteristics. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 1913–1922, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.244

PRATA, Joana Correia. *et al*. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 110, p. 150-159, 2019. https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029

RAGUSA Antonio. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers*. 2022; 14(13):2700. https://doi.org/10.3390/polym14132700

RIBEIRO, Francisca. *et al*. Accumulation and fate of nano and micro-plastics and associated contaminants in organisms**.** **Trends in Analytical Chemistry**, v. 111, p. 139-147, 22 Dec. 2018. https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.12.010

RODRIGUES, Daniel Paciência. Avaliação da existência de Microplásticos nos efluentes de estações de tratamento de águas residuais: caracterização dos Microplásticos e abordagens verdes para a sua remoção. Dissertação de mestrado em Engenharia Química. Universidade de Coimbra. Portugal. 2022.

SU, Yinglong. *et al*. Occurrence of microplastics in landfill systems and their fate with landfill age. **Water Research**, v. 164, p. 114968, 9 Aug. 2019. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114968

WALLER, Catherine. *et al*. Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research. **Science of the Total Environment**, [s. *l*.], v. 598, p. 220-227, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.283

WANG, Xiaoyu. *et al.* Implications of method- and instrument-based size detection limits in μFTIR-based microplastic analysis. **Talanta**, v. 267, 125984, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.125984

WRIGHT, Stephanie L.; THOMPSON, Richard C.; GALLOWAY, Tamara S. The Physical Impacts of Microplastics on Marine Organisms: A Review. **Environment Pollution**, [s. *l*.], v. 178, p. 483–492, 13 Feb. 2013. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031

WU, Panfeng. *et al*. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.184, 24 Aug. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109612

XU, Shen. *et al*. Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects. **Science of the Total Environment**, v. 703, 134699, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134699

YU, Xubiao. *et al*. Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea. **Environmental Pollution**, [s. *l*.], v. 214, p. 722 730, 2 May 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.080

ZHANG, Kai. *et al*. Understanding Plastic Degradation and Microplastic Formation in the Environment: A Review. **Environmental Pollution**, v. 274, p. 116554, 23 Jan. 2021. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554.

SUCESSÃO ECOLÓGICA DA MICROFAUNA COMO INDICADOR DE DESEMPENHO DO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CELULOSE

1 Isabela Rita dos Santos Rossi, Jose Antonio Villamizar Florez, Luiza Silva Dias, Claudia Regina Xavier
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: isabelarossi@alunos.utfpr.edu.br;, e-mail: tonovilla9@gmail.com; e-mail: luizadias.sn@gmail.com; e-mail: cxavier.utfpr@gmail.com;

Palavras-chave: Protozoários; Bioindicadores; Tratamento Biológico.

Resumo

A indústria de celulose gera efluentes com elevada carga orgânica e presença de compostos recalcitrantes, como derivados lignínicos e aromáticos, dificultando o tratamento biológico. Este estudo teve como objetivo avaliar a sucessão ecológica da microfauna em lagoa aerada facultativa (LAF) em escala de bancada, correlacionando sua dinâmica com parâmetros físico-químicos e investigando seu potencial como bioindicadora do desempenho do sistema. O experimento foi conduzido com efluente de indústria de celulose, monitorando DQO, DBO_5, turbidez e compostos aromáticos ao longo de diferentes fases operacionais, incluindo estabilização, choques de carga orgânica e bioaumentação, com caracterização microfaunística por análises microscópicas. Os resultados evidenciaram sucessão ecológica, com predominância inicial de organismos oportunistas, seguida por aumento de ciliados rastejantes e, posteriormente, de ciliados fixos e rotíferos, indicando maior estabilidade do sistema. Essa dinâmica acompanhou os parâmetros físico-químicos, com maior estabilidade na remoção de DBO_5 e elevada eficiência na redução da turbidez, enquanto a DQO apresentou maior variabilidade e os compostos aromáticos baixa remoção. Durante os choques, houve regressão ecológica e queda no desempenho, seguida de recuperação após bioaumentação. Conclui-se que a microfauna apresenta elevada sensibilidade às condições operacionais, sendo ferramenta complementar relevante para o monitoramento de sistemas biológicos de tratamento de efluentes complexos.

Introdução

A indústria de celulose e papel se destaca como uma das principais geradoras de efluentes industriais com elevada carga orgânica e significativa complexidade química, caracterizados pela presença de compostos recalcitrantes, como derivados lignínicos, compostos fenólicos e substâncias aromáticas, além de elevados valores de demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO). Esses efluentes apresentam coloração intensa e baixa biodegradabilidade de parte de seus constituintes, dificultando sua remoção por processos biológicos convencionais e podendo causar impactos ambientais relevantes quando lançados em corpos hídricos (PEITZ *et al.,* 2019; TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA, 2017). A lignina, em particular, destaca-se como um polímero resistente à degradação biológica, estando associada à persistência de cor e compostos aromáticos no efluente tratado (MACHADO et al., 2018).

Diante dessas características, as Lagoas Aeradas Facultativas (LAFs) são amplamente utilizadas no tratamento desses efluentes devido à simplicidade operacional, menor custo e capacidade de absorver variações de carga orgânica. Nesses sistemas, a remoção da matéria orgânica ocorre principalmente pela ação de microrganismos heterotróficos, embora compostos recalcitrantes e instabilidades operacionais possam comprometer sua eficiência (VON SPERLING, 2002). Tradicionalmente, o monitoramento desses sistemas baseia-se em parâmetros físico-químicos, como DQO, DBO, turbidez e cor, que quantificam a eficiência do tratamento, mas não refletem diretamente a estrutura e o estado funcional da biomassa microbiana. Dessa forma, alterações como desequilíbrios biológicos e variações na atividade metabólica podem não ser prontamente detectadas (GERARDI, 2015).

Nesse contexto, a microfauna presente nos sistemas biológicos, composta principalmente por protozoários e metazoários, exerce papel relevante na dinâmica do tratamento, atuando no controle bacteriano e na estabilidade dos flocos, influenciando a qualidade do efluente Como consequência, influenciam diretamente a qualidade do efluente tratado, especialmente em relação à clarificação (JENKINS *et al*., 2003; SERRANO *et al.,* 2008)..

Além de sua função operacional, a microfauna também reflete as condições do sistema, sendo amplamente utilizada como bioindicadora do seu funcionamento (JENKINS et al., 2003; SERRANO et al., 2008). Nesse sentido, sua composição está associada a diferentes estados operacionais: amebas, flagelados e ciliados livres indicam elevadas cargas orgânicas e instabilidade, enquanto ciliados rastejantes estão relacionados à melhoria estrutural do lodo. Por sua vez, ciliados fixos e metazoários são típicos de sistemas mais estáveis, com menor concentração de matéria orgânica residual e melhor sedimentação (GERARDI, 2015). Essa variação ao longo do tempo configura um processo de sucessão ecológica, no qual a estrutura microfaunística responde a mudanças na carga orgânica, oxigenação e estabilidade do sistema. Embora bem estabelecida em sistemas de lodo ativado, essa abordagem ainda é pouco explorada em LAFs, sendo frequentemente tratada de forma descritiva (CHAMORRO *et al*, 2009).

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar a sucessão ecológica da microfauna durante o tratamento de efluente de celulose em LAF em escala de bancada, correlacionando sua dinâmica com parâmetros físico-químicos, como DQO, DBO_5, turbidez e compostos aromáticos, a fim de avaliar seu potencial como bioindicadora do desempenho do sistema.

Material e Métodos

Origem do efluente e preparo da amostra

O efluente utilizado neste estudo foi proveniente do processo Kraft de uma indústria de celulose localizada na região metropolitana de Curitiba (PR), sendo coletado na entrada do sistema de tratamento biológico da unidade industrial. Após a coleta, o efluente foi armazenado em galões de polietileno, mantidos sob refrigeração a 4 °C e ao abrigo da luz, conforme recomendações (ABNT, 1987), a fim de minimizar alterações físico-químicas e biológicas durante o período de armazenamento.

Para fins de comparação e adequação da carga orgânica na LAF de bancada, o afluente do tratamento foi composto por água de lavagem das fibras (coletado após a lagoa de decantação primária na indústria) e água da prensa (coletada do processo de prensagem) em uma proporção de 50:50 v/v, visando atingir concentrações de Demanda Química de Oxigênio (DQO) entre 600 e 900 $mg \cdot L^{-1}$, compatíveis com a carga orgânica volumétrica (COV) aplicada em sistemas similares no laboratório, e o pH foi ajustado para 7,00 ± 0,02.

Adicionalmente, foi realizada suplementação nutricional com cloreto de amônio (NH_4Cl) e fosfato dipotássico (K_2HPO_4), de modo a manter a relação DQO:N:P em aproximadamente 100:0,5:0,1, garantindo condições adequadas para o desenvolvimento da biomassa microbiana.

Sistema experimental e choques de carga orgânica

A LAF foi construída em acrílico transparente, com volume útil de 1 L, operando em fluxo contínuo por 207 dias. Os reservatórios do afluente (entrada) e do efluente (saída) foram mantidos sob refrigeração em caixa térmica com gelo, visando minimizar alterações nas características do efluente.

A carga orgânica volumétrica média aplicada foi de 0,2 kg $DQO \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$. A aeração foi promovida por compressor de ar, garantindo condições aeróbias na zona de aeração do sistema.

Durante a operação experimental, foram aplicadas perturbações controladas na forma de choques de carga orgânica, com o objetivo de avaliar a resposta e a resiliência do sistema frente a variações operacionais. Esses choques consistiram no aumento abrupto da carga orgânica volumétrica acima do valor médio de operação (0,2 kg $DQO \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$), por meio da adição de efluente com maior concentração de matéria orgânica, proveniente da etapa de prensa de fibras do processo industrial.

As condições de choque foram aplicadas de forma controlada ao longo do período experimental, sendo monitoradas as respostas do sistema por meio de parâmetros físico-químicos e da dinâmica da microfauna, permitindo a avaliação integrada do comportamento do tratamento sob condições de estresse e sua capacidade de recuperação.

Análises físico-químicas e bioaumentação

A caracterização físico-química das amostras, do afluente e do efluente do tratamento foram realizadas segundo metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2021) e em referências complementares. No Quadro 1 são sistematizadas as metodologias empregadas nas análises dos parâmetros.

Parâmetro	Método / Condição	Referência
DQO	Refluxo fechado colorimétrico	APHA (2023)
$DBO_{5,20}$	Método Winkler modificado, incubação por 5 dias a 20 °C	APHA (2023)
Cor aparente	Espectrofotometria VIS a 440 nm, pH 9,0	ÇEÇEN (2003)
Compostos Fenólicos Totais	UV215 nm	CHAMORRO *et al.* (2009)
Compostos Aromáticos	UV254 nm, pH 7,0	ÇEÇEN (2003)
Compostos Lignínicos	UV280 nm, pH 7,0	ÇEÇEN (2003)
Compostos Lignossulfônicos	UV346 nm, pH 7,0	ÇEÇEN (2003)
Turbidez	Método nefelométrico	APHA (2023)
pH	Método potenciométrico com medidor digital	APHA (2023)

Quadro 1: Parâmetros físico-químicos analisados
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Essas análises foram realizadas duas vezes por semana para acompanhar o processo de tratamento, sendo avaliadas em triplicata ou com CV menor que 5%. A eficiência de remoção (ER) dos parâmetros foi calculada pela seguinte equação:

$$ER\ (\%) = \frac{Ce - Cs}{Ce} \times 100 \qquad \text{(equação 1)}$$

em que Ce representa a concentração de entrada e Cs, a de saída. Valores negativos foram interpretados como incremento percentual do parâmetro analisado.

A bioaumentação foi aplicada em etapas específicas do experimento com o objetivo de avaliar a resposta do sistema frente a perturbações operacionais, especialmente sob condições de choque de carga orgânica. O bioproduto, constituído pela bactéria *B. thuringiensis* (NR114581.1) associada à casca de arroz como meio suporte, foi adicionado diretamente ao reator a cada choque aplicado, permitindo a análise comparativa do desempenho do sistema em eventos de choque com e sem a presença do bioproduto.

Análises microbiológicas e sucessão ecológica da microfauna

A caracterização da microfauna foi realizada por microscopia óptica com aumentos de 20x e 40x, utilizando amostras frescas sem fixação, a fim de preservar a mobilidade dos organismos. As análises ocorreram em diferentes momentos operacionais do sistema, incluindo após sua estabilização e os eventos pré e pós-choques de carga orgânica, com e sem bioproduto.

As análises foram realizadas em três zonas da lagoa: zona de aeração, zona livre/mista e zona de sedimentação. Em cada região, foram coletados aproximadamente 20 mL de amostra, incluindo líquido e lodo de fundo, obtido por remoção direta durante a amostragem. Cada coleta foi realizada em triplicata, seguindo a metodologia descrita por Serrano *et al.* (2008), com varredura sistemática do campo microscópico para garantir representatividade.

A identificação dos organismos foi realizada, sempre que possível, até o nível de gênero, com base em características morfológicas e comportamentais observadas em microscopia óptica. Foram utilizados guias clássicos e literatura especializada, incluindo Patterson (2018), Finlay *et al*. (1988), Serrano *et al*. (2008), além de referências específicas para microbiologia de lodo ativado (MADONI, 2011; JENKINS *et al.*, 2003). Os microrganismos foram agrupados em categorias funcionais, incluindo **ciliados fixos, ciliados livres, ciliados rastejantes, flagelados, amebas e metazoários.** A abundância relativa foi estimada por meio de escala semiquantitativa, variando de 0 (ausência) a 4 (predominância), conforme Oliveira *et al.* (2006).

Para análise ecológica, os dados foram organizados longitudinalmente em cinco fases: inicial, intermediária e madura do sistema (durante a estabilização), além de duas fases correspondentes a eventos de choque de carga orgânica, com e sem bioaumentação.

A sucessão ecológica da microfauna foi avaliada a partir da variação temporal da abundância relativa dos grupos funcionais ao longo da operação do sistema. Os valores foram avaliados quanto à média aritmética das abundâncias das espécies dentro de cada grupo, abordagem adequada para dados ordinais e amplamente empregada em estudos de ecologia microbiana aplicada ao tratamento de efluentes. Essa abordagem permitiu avaliar a estrutura e a evolução da comunidade microbiana como indicadores do desempenho do sistema de tratamento, considerando a relação entre os grupos funcionais presentes e as condições ambientais e operacionais da LAF.

Resultados e Discussão

Caracterização físico-química das amostras

A Tabela 1 apresenta a caracterização físico-química das amostras compostas 50:50 v/v utilizadas nos ensaios em escala de bancada, incluindo parâmetros relacionados à carga orgânica, biodegradabilidade e presença de compostos recalcitrantes. Os valores correspondem à média das análises em triplicata para cada amostra, expressos com seus respectivos desvios padrão.

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
DQO ($mg \cdot L^{-1}$)	679,20 ± 9,07	874,72 ± 1,29	401,34 ± 4,28	906,24±10,44
DBO_5 ($mg \cdot L^{-1}$)	289,50 ± 6,36	282,00 ± 8,49	212,15 ± 3,04	495,00±21,21
DBO_5/DQO	0,43	0,32	0,53	0,54
CFT ($mg \cdot L^{-1}$)	320,77 ± 0,60	278,85 ± 2,84	219,81 ± 2,84	380,85±0,38
CA (1×1 cm)	5,37 ± 0,01	5,88 ± 0,01	4,51 ± 0,01	6,96±0,01
Cor (1×1 cm)	0,39 ± 0,03	0,37 ± 0,02	0,24 ± 0,01	0,46±0,01

Tabela 1: Caracterização físico-química das amostras compostas pelos afluentes
NOTA: DQO - Demanda Química de Oxigênio; DBO_5 - Demanda Bioquímica de Oxigênio; CFT - Compostos Fenólicos Totais; CA - Compostos Aromáticos.
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Os resultados evidenciam variação significativa entre as amostras, com valores de DQO entre 401,34 e 906,24 $mg \cdot L^{-1}$ e de DBO_5 entre 212,15 e 495,00 $mg \cdot L^{-1}$. A amostra 4 apresentou as maiores concentrações de matéria orgânica (DQO = 906,24 $mg \cdot L^{-1}$; DBO_5 = 495,00 $mg \cdot L^{-1}$), enquanto a amostra 3 apresentou os menores valores (DQO = 401,34 $mg \cdot L^{-1}$; DBO_5 = 212,15 $mg \cdot L^{-1}$). A relação DBO_5/DQO variou de 0,32 a 0,54, indicando diferenças na fração biodegradável, com menor biodegradabilidade na amostra 2 (0,32) e maior nas amostras 3 (0,53) e 4 (0,54). Esse comportamento é característico de efluentes da indústria de celulose, cuja biodegradabilidade pode variar em função da presença de compostos lignínicos e derivados aromáticos de difícil degradação (KAMALI; KHODAPARAST, 2015; NUNES *et al.*, 2022).

Em relação aos compostos recalcitrantes, os valores de CFT variaram de 219,81 a 380,85 $mg \cdot L^{-1}$, enquanto os compostos derivados da lignina como o CA apresentaram valores entre 4,51 e 6,96. Esses resultados estão de acordo com a literatura, que aponta a presença de compostos fenólicos, lignínicos e aromáticos em efluentes do processo Kraft, sendo estes diretamente associados à coloração residual e à recalcitrância do efluente (NUNES *et al.*, 2022; COELHO, 2024).

A cor variou entre 0,24 e 0,46, valores compatíveis com a presença de cromóforos derivados da lignina, cuja remoção em sistemas biológicos aerados tende a ser limitada, podendo inclusive ocorrer aumento devido à biotransformação de compostos de alta massa molecular em estruturas mais coloridas (KAMALI; KHODAPARAST, 2015)..

Desempenho da LAF na remoção de matéria orgânica e compostos específicos

A Figura 1 apresenta os boxplots das eficiências de remoção de DQO, DBO_5, compostos fenólicos totais (CFT), compostos aromáticos associados à fração lignínica (CA), cor e turbidez ao longo das diferentes etapas operacionais do sistema, permitindo a avaliação integrada do comportamento de frações biodegradáveis e recalcitrantes sob distintas condições de operação.

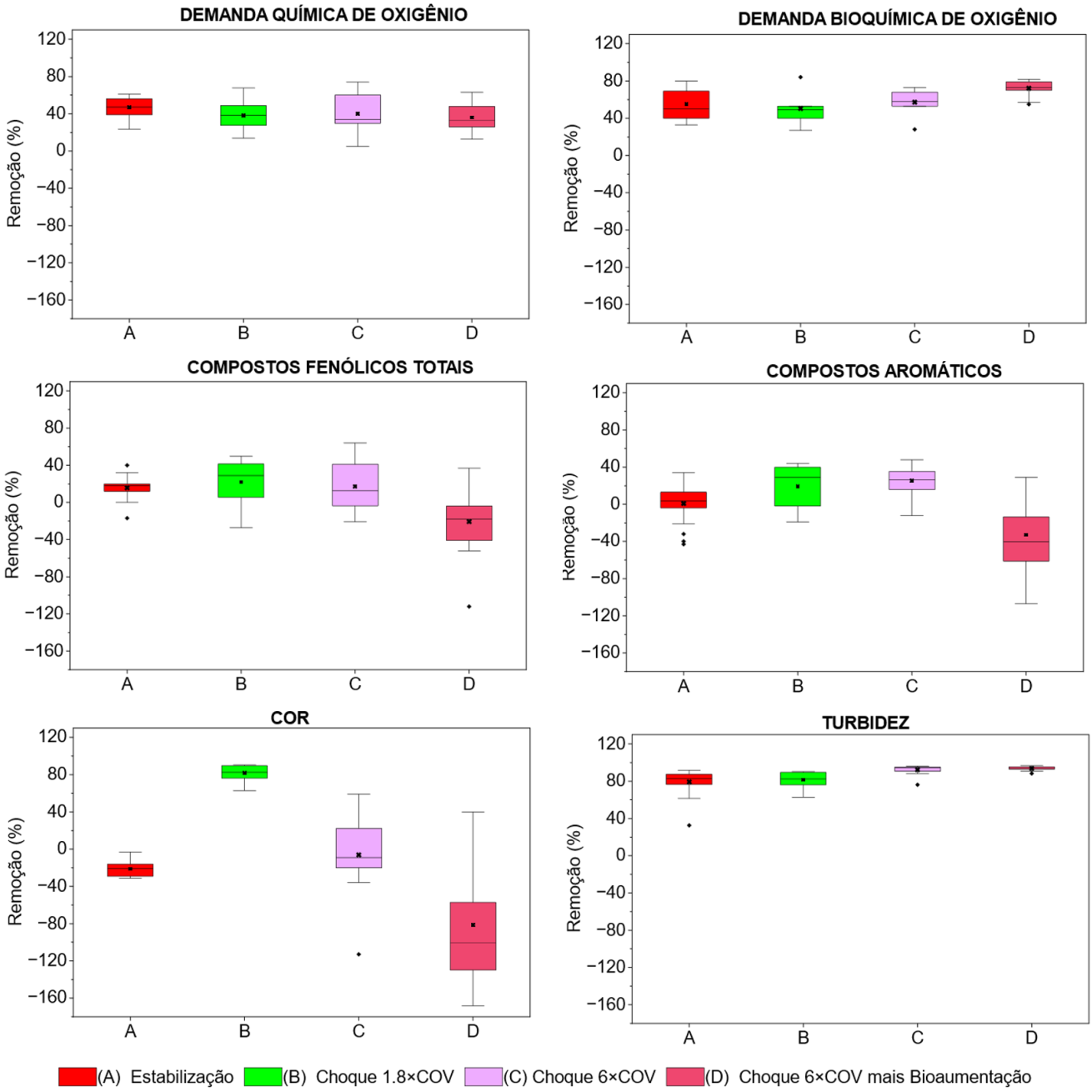


Figura 1: Remoção de DQO, DBO_5, compostos fenólicos totais (CFT), compostos aromáticos (CA), cor e turbidez nas etapas de estabilização, aplicação de choques orgânicos e bioaumentação. Fonte: Autoria própria, 2026.

Na fase de estabilização (A), foram observadas remoções médias de aproximadamente 47% para DQO e 55% para DBO_5, valores próximos aos reportados para lagoas aeradas facultativas tratando efluentes kraft em condições semelhantes (COELHO et al., 2024; NUNES et al., 2022). Nessa mesma condição, os compostos específicos (CFT e CA) apresentaram eficiências moderadas, enquanto a cor exibiu baixa remoção, mostrando a limitação do sistema frente a compostos cromóforos dissolvidos e de maior complexidade estrutural. Em contraste, a turbidez apresentou elevadas eficiências e baixa variabilidade, indicando predominância de mecanismos físicos de retenção de sólidos e adequada formação de agregados sob condições operacionais estáveis.

Com a aplicação dos choques de carga orgânica (B e C), verificou-se aumento da variabilidade e redução das eficiências para a maioria dos parâmetros, indicando perda de estabilidade do sistema. Para DQO e DBO_5, foram observados valores médios próximos de 33–35% e 32–44%, respectivamente, comportamento consistente com a desestabilização temporária do sistema sob sobrecarga orgânica (PEITZ et al., 2019). Esse efeito foi mais pronunciado nos parâmetros associados à fração dissolvida, como CFT, CA e cor, enfatizado pela ampliação da dispersão dos *boxplots*, maior amplitude interquartil e ocorrência de valores extremos. Esse padrão indica limitação na capacidade de assimilação da carga orgânica e menor eficiência na degradação de compostos estruturalmente mais complexos, refletindo restrições cinéticas e metabólicas da biomassa frente ao aumento abrupto da carga, além de possível acúmulo de intermediários parcialmente degradados (MACHADO et al., 2018).

Na etapa de bioaumentação (D), observou-se recuperação parcial do sistema para os parâmetros biodegradáveis, com remoções variando entre 50–51% para DQO e 60–72% para DBO_5. Em comparação à condição de choque sem bioaumentação, não foram observadas diferenças significativas nas eficiências médias; no entanto, verificou-se redução da variabilidade dos dados, especialmente para a DBO_5, destacada pela menor dispersão dos boxplots, indicando maior estabilidade operacional e menor sensibilidade a flutuações. Para os compostos recalcitrantes, como CFT, CA e cor, não foi observada recuperação significativa, com ocorrência de médias próximas ou inferiores a zero e manutenção da elevada variabilidade. Esses resultados sugerem não apenas baixa remoção, mas também possíveis processos de transformação da matéria orgânica, com solubilização e conversão de estruturas lignínicas em frações intermediárias mais hidrossolúveis e potencialmente cromóforas, contribuindo para a persistência ou até intensificação da coloração do efluente. Em contraste, a remoção da turbidez manteve desempenho elevado em todas as etapas, indicando que os mecanismos físicos de remoção de sólidos permaneceram relativamente estáveis.

Dinâmica temporal e sucessão ecológica da microfauna na LAF

A Figura 2 apresenta a dinâmica da microfauna ao longo da operação da LAF, demonstrando alterações na composição dos grupos de organismos em resposta às condições operacionais e às variações nos parâmetros físico-químicos.

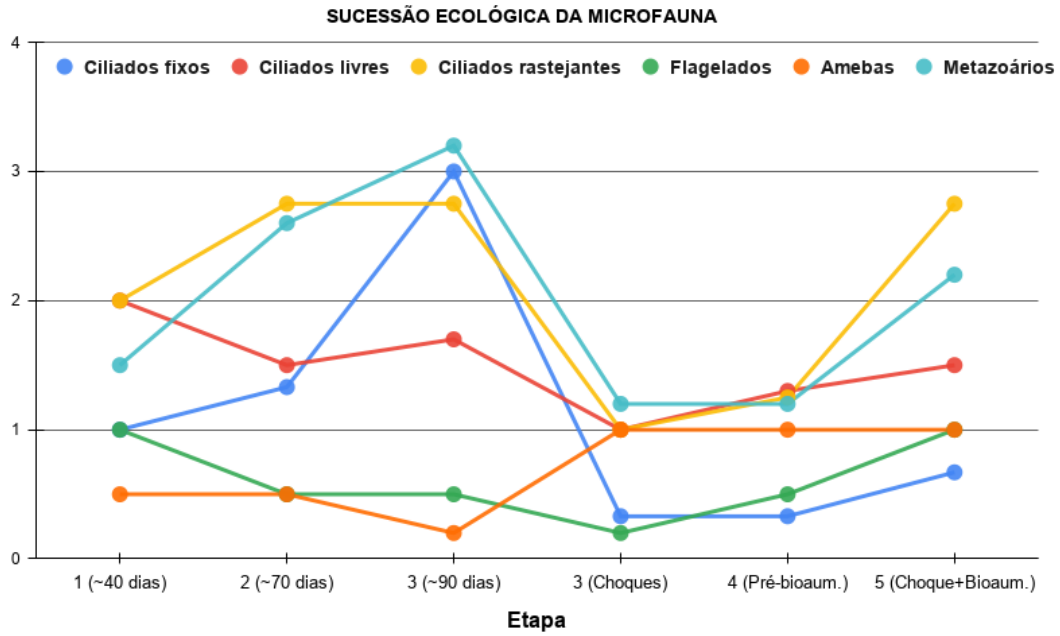


Figura 2: Sucessão ecológica da microfauna ao longo das etapas operacionais da LAF
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Do ponto de vista funcional, os diferentes grupos microfaunísticos refletem mecanismos distintos no processo biológico. Flagelados e ciliados livres, típicos de condições com maior carga orgânica, atuam como consumidores de bactérias dispersas e estão associados à elevada concentração de matéria orgânica solúvel e à baixa estruturação dos flocos, o que se traduz em maior variabilidade da DQO (MADONI, 2011). Em contrapartida, ciliados rastejantes contribuem para a organização dos flocos e redução de sólidos suspensos, estando diretamente relacionados à redução da turbidez e a maior sedimentabilidade (EIKELBOOM, 2000; JENKINS *et al.,* 2003). Já os ciliados fixos indicam menor carga orgânica residual e maior estabilidade do sistema, enquanto metazoários, como rotíferos, estão associados à maturidade do lodo e a maiores eficiências na remoção de DBO_5 (PEITZ *et al.,* 2019).

Com base nesse comportamento, a fase inicial (40 dias) foi marcada pela predominância de ciliados livres (*Colpidium campylum*, *Paramecium spp.*, *Uronema spp.*) e flagelados bacterívoros (*Bodo saltans*, *Monas spp.*), refletindo elevada disponibilidade de matéria orgânica e menor organização estrutural do lodo. Nessa etapa, as remoções de DQO (~47%) e DBO_5 (~55%) já eram observadas, porém acompanhadas de maior variabilidade, especialmente para DQO, além de baixa eficiência na remoção de compostos recalcitrantes, como compostos aromáticos (~1%) e fenólicos (~15%).

Na fase intermediária (70 dias), a redução de organismos oportunistas e o aumento de ciliados rastejantes, como *Aspidisca spp.* e *Euplotes spp.*, indicaram avanço na estruturação do lodo e maior estabilidade do sistema (EIKELBOOM, 2000; JENKINS *et al*., 2003), em concordância com elevadas remoções de turbidez (>83%). Já na fase madura (90 dias), a predominância de ciliados fixos (*Vorticella spp.*, *Thuricola folliculata*) e rotíferos (*Philodina spp.*) evidenciou um sistema mais equilibrado, com menor variabilidade nos parâmetros físico-químicos e melhor qualidade do efluente (MADONI, 2011). Esse padrão caracteriza um processo de sucessão ecológica, no qual a microfauna evolui de organismos oportunistas para formas associadas à estabilidade do sistema.

Durante os choques de carga orgânica, ocorreu uma regressão ecológica parcial, marcada pelo aumento de ciliados livres e amebas e pela redução de organismos típicos de sistemas estáveis (OLIVEIRA et al., 2009; JENKINS *et al.*, 2003). Esse comportamento coincidiu com maior variabilidade e queda nas eficiências de remoção, especialmente para DQO e compostos específicos. Após choque com bioaumentação, a comunidade microbiana voltou a se reorganizar, com aumento de ciliados rastejantes e metazoários, indicando restabelecimento da estrutura trófica. Essa recuperação foi acompanhada por melhora nas remoções de DBO_5 (60–72%) e maior estabilidade operacional,enquanto a DQO não apresentou incremento expressivo nas eficiências médias, mantendo comportamento semelhante ao observado na condição de choque.

Os resultados obtidos demonstram que a dinâmica da microfauna está associada ao às condições e ao desempenho do sistema de tratamento, refletindo de forma consistente seu impacto na estrutura microfaunística. A sucessão ecológica observada evidenciou a transição de comunidades características de sistemas instáveis para estruturas mais organizadas e eficientes, acompanhando a evolução do processo. Nesse contexto, a microfauna mostrou-se uma ferramenta sensível e complementar aos parâmetros físico-químicos tradicionais, permitindo uma interpretação mais integrada do funcionamento da lagoa aerada facultativa. Esses achados reforçam o potencial do uso de organismos bioindicadores na avaliação e no monitoramento de sistemas biológicos aplicados ao tratamento de efluentes da indústria de celulose.

Considerações Finais

O estudo demonstrou que a sucessão ecológica da microfauna em lagoa aerada facultativa está fortemente associada ao desempenho do tratamento de efluente de celulose. A dinâmica microfaunística refletiu as condições operacionais ao longo do tempo, respondendo tanto a períodos de estabilidade quanto a perturbações, como choques de carga orgânica e choques com bioaumentação, evidenciando sua sensibilidade às variações do sistema.

A microfauna mostrou-se uma ferramenta bioindicadora sensível, capaz de complementar os parâmetros físico-químicos tradicionais ao fornecer informações sobre o estado funcional da biomassa e a estabilidade do sistema. A associação entre os grupos microfaunísticos e o comportamento dos parâmetros analisados permitiu uma interpretação mais integrada e consistente do processo de tratamento.

Assim, o uso da microfauna apresenta potencial para aplicação no monitoramento de sistemas biológicos de tratamento, especialmente em efluentes complexos, como os da indústria de celulose, contribuindo para o monitoramento operacional mais sensível de sistemas biológicos aplicados a efluentes kraft.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio: da Fundação Araucária CP 17/2023 e CP 23/2023; do CNPq CP 68/2022; da COCELPA ACT 23064.040994/2024-33; e dos laboratórios multiusuários da UTFPR: LAMAQ e LAPREBB.

Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9898:** preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 24. ed. Washington, DC: APHA; AWWA; WEF, 2023.

CASTRO, K. C. *et al*. **Sistema de lodos ativados para remoção de matéria orgânica e compostos recalcitrantes de efluente kraft.** In: CONGRESSO TÉCNICO AESABESP / FENASAN, 30., 2019, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: AESabesp, 2019. Disponível em: https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2019/12. Acesso em: 25 mar. 2026.

CHAMORRO, S. *et al*. **Aerobic removal of stigmasterol contained in kraft mill effluents.** Electronic Journal of Biotechnology, v. 12, n. 2, p. 1–7, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.2225/vol12-issue2-fulltext-9. Acesso em: 25 mar. 2026.

COELHO B.D. *et al*. **Bioaugmentation with *Advenella kashmirensis* for the treatment of a kraft pulp effluent by aerated lagoon.** Rev Ambient Água [Internet]. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2935. Acesso em: 25 mar. 2026.

ÇEÇEN, F. The use of UV-VIS measurements in the determination of biological treatability of pulp bleaching effluents. In: **INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION SYMPOSIUM ON FOREST INDUSTRY WASTEWATERS**, 7., 2003, Seattle. Proceedings [...]. Seattle: IWA Publishing, 2003. p. 135–142.

EIKELBOOM, D. H. **Process control of activated sludge plants by microscopic investigation**. London: IWA Publishing, 2000. Disponível em: https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30982. Acesso em: 25 mar. 2026.

FINLAY, B. J. *et al.* **A beginner's guide to the collection, isolation, cultivation and identification of freshwater protozoa.** Ambleside: Freshwater Biological Association, 1988.

GERARDI, M. H. **The biology and troubleshooting of facultative lagoons**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9781118981771. Acesso em: 25 mar. 2026.

JENKINS, D. *et al.*. ***Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems.*** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1201/9780203503157. Acesso em: 25 mar. 2026.

KAMALI, M.; KHODAPARAST, Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. **Ecotoxicology and Environmental Safety,** v. 114, p. 326–342, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.005. Acesso em: 25 mar. 2026.

MACHADO, E. P. ***et al.*** Tratamento de efluente Kraft em lagoa aerada facultativa empregando enzimas lignocelulolíticas. **Interciencia,** v. 43, n. 8, p. 590–596, 2018. Disponível em: https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/08. pdf. Acesso em: 2 abr. 2026.

MADONI, P. Protozoa in wastewater treatment processes: a minireview. **Italian Journal of Zoology**, v. 78, n. 1, p. 3–11, 2011. DOI: https://doi.org/10.1080/11250000903373797. Acesso em: 25 mar. 2026.

NUNES, J. V. *et al.* Bacterial diversity in aerated facultative lagoon treating kraft cellulose effluent with bioaugmentation. **BioResources,** v. 17, n. 4, p. 6556–6568, 2022. DOI: 10.15376/biores.17.4.6556-6568. Disponível em: https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/22104/74. Acesso em: 25 mar. 2026.

OLIVEIRA, G. S. S *et al*. Microbiologia de sistema de lodos ativados e sua relação com o tratamento de efluentes industriais: a experiência da Cetrel. **Engenharia Sanitária e Ambiental,** v. 14, n. 2, p. 183–192, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000200006.

PATTERSON, D. J. **Free-living freshwater protozoa: a colour guide**. Boca Raton: CRC Press, 2018..

PEITZ, C. *et al*. Evaluation of aerated lagoon modified with spongy support medium treating kraft pulp mill effluent. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 92, p. 70–79, 2019. Disponível em: http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n92/0120-6230-rfiua-92-00060.pdf. Acesso em: 25 mar. 2026.

SERRANO, S, *et al*. **Guidelines for the identification of ciliates in wastewater treatment plants.** London: IWA Publishing, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.2166/9781780401935. Acesso em: 25 mar. 2026.

TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA, R. Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 78, p. 764–772, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.021. Acesso em: 20 set. 2025.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuais: lagoas de estabilização**. Belo Horizonte: UFMG, 2002.

DIAGNOSTICO E POTENCIAL DE GERAÇÃO E DE EFLUENTES LIQUIDOS DE LABORATORIOS UNIVERSITARIOS: ESTUDO DE CASO UNIOESTE/TOLEDO

1 Danitza Pilar Melean Guzman, 2 Camilo Freddy Mendoza Morejon, 3 Fernando Palú
1 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, e-mail: dipiguzman777@gmail.com; 2 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, e-mail: camilo_freddy@hotmail.com; 3 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, e-mail: fpalui@uol.com.br;

Palavras-chave: Gestão de resíduos laboratoriais; Efluentes líquidos universitários; Sustentabilidade ambiental

Resumo

As instituições de ensino superior se constituem em importantes fontes de geração de resíduos líquidos decorrentes das atividades laboratoriais, especialmente em cursos com forte componente experimental. Nesse contexto, a compreensão da origem, da quantidade e da tipologia desses resíduos é fundamental para o planejamento ambiental do ambiente universitário. O presente estudo teve como objetivo diagnosticar e explicitar o consumo de água e sua relação com a geração de efluentes de diversas fontes, principalmente o detalhamento do potencial de geração de efluentes líquidos provenientes das atividades laboratoriais na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), campus de Toledo. A metodologia adotada caracterizou-se como uma pesquisa descritiva, exploratória e de abordagem quantitativa, baseada no levantamento espacial e funcional do campus, no mapeamento das práticas laboratoriais e na elaboração de fluxogramas experimentais das práticas realizadas nas disciplinas dos cursos com as respectivas turmas. A quantificação dos resíduos foi realizada a partir dos volumes gerados nas práticas didáticas, considerando a frequência anual de execução, com posterior classificação dos resíduos em ácidos, básicos, neutros e efluentes contendo metais pesados. Os resultados indicaram que o número total de alunos em 2025 foi 976, sendo 102 de Engenharia Química, 63 de Engenharia de Pesca e 64 do curso de Química, evidenciando o potencial de geração de efluentes laboratoriais. O abastecimento hídrico da Unioeste/Toledo é composto por 20058,57 m³/ano de água oriunda de poço artesiano**.** Na saída do sistema, a quantidade total de efluentes gerados foi de 20054,15 m³/ano, sendo: 0,2784 m³/ano de efluentes laboratoriais; 13387,51 m³/ano de efluentes sanitários e 6666,36 m³/ano de outras fontes**.** Nos laboratórios, foram identificadas 205 práticas experimentais, as quais são responsáveis pela geração de resíduos líquidos classificados como neutros (0,204 m³/ano)**,** ácidos (0,0444 m³/ano)**,** básicos (0,02159 m³/ano) e efluentes contendo metais pesados (0,00936 m³/ano). Dessa forma**,** o estudo explicita, de forma integrada, a relação entre a configuração espacial do Campus Toledo, a organização dos ambientes laboratoriais dos cursos técnicos e a geração de diferentes tipos de resíduos líquidos, principalmente, decorrentes das práticas experimentais.

Introdução

A expansão das atividades experimentais em laboratórios universitários, especialmente em cursos das áreas químicas e engenharias, tem intensificado a geração de resíduos líquidos com diferentes características físico-químicas. Esses efluentes são provenientes do uso de reagentes, solventes e soluções empregadas em práticas didáticas e de pesquisa, configurando uma fonte potencial de impactos ambientais e riscos ocupacionais quando não manejados adequadamente (Philippi Junior; Aguilar, 2005).

As instituições de ensino, em especial os laboratórios de ensino, pesquisa e extensão, e outros serviços responsáveis pela geração de resíduos nas universidades, apresentam um papel fundamental nesse processo, pois, apesar de sua importância em relação à produção de conhecimentos científicos, acabam sendo fontes geradoras de resíduos de diferentes naturezas. A produção de conhecimentos científicos, acabam, também, sendo fontes geradoras de resíduos de diferentes naturezas, muitas delas perigosas (Philippi Junior; Aguilar, 2005).

Estudos realizados, desde a década de 90, no Campus da Universidade de São Paulo (USP) de Ribeirão Preto (RP), vem demonstrando um número crescente de laboratórios de ensino e pesquisa, ligados as Unidades de Ensino do Campus, gerando cada vez mais, resíduos perigosos de diferentes constituições e origens (Takayanagui, 1993).

Diversos estudos realizados em universidades públicas brasileiras indicam que uma parcela significativa dos resíduos líquidos laboratoriais ainda é descartada diretamente em pias e redes de esgoto, frequentemente em desacordo com recomendações técnicas e dispositivos legais vigentes (Veiga, 2010; Nolasco et al., 2006; Oliveira et al., 2019). A ausência de procedimentos padronizados de segregação, identificação e armazenamento dos resíduos é apontada como um dos principais fatores associados à destinação inadequada desses efluentes (Silva et al., 2010).

Além das implicações ambientais, o manejo inadequado de resíduos líquidos em laboratórios universitários está associado ao aumento da exposição ocupacional de estudantes, docentes e técnicos, bem como ao risco de contaminação de corpos d'água e do solo (Veiga, 2010; Oliveira et al., 2019). Esses aspectos reforçam a necessidade de compreender de forma mais aprofundada os processos que levam à geração desses resíduos e suas características químicas. Embora iniciativas voltadas à redução e ao tratamento de resíduos laboratoriais tenham sido relatadas na literatura, observa-se que, muitos estudos, se concentram na descrição de práticas de gerenciamento havendo menor ênfase na caracterização segregada das fontes geradoras, dos ambientes laboratoriais e dos tipos de efluentes produzidos (Silva et al., 2010; Barbosa et al., 2020). Essa lacuna dificulta a compreensão sistêmica do problema no contexto universitário.

Nesse sentido, torna-se relevante aprofundar o conhecimento sobre a relação entre a organização dos espaços laboratoriais, as práticas experimentais desenvolvidas e os diferentes tipos de resíduos líquidos gerados. A produção de informações sistematizadas sobre esses aspectos pode contribuir para uma melhor compreensão da dinâmica dos laboratórios químicos em instituições de ensino superior e subsidiar o manejo adequado desses efluentes. De modo geral, essas informações são necessárias para subsidiar a elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos compatíveis com a realidade de cada instituição (Nolasco et al., 2006; Schalch et al., 2002).

Objetivo

Diagnosticar e explicitar o consumo de água e sua relação com a geração de efluentes de diversas fontes, principalmente para detalhar o potencial de geração de efluentes líquidos provenientes das atividades laboratoriais na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), campus de Toledo.

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa descritiva, exploratória e de abordagem quantitativa, voltada à identificação da origem do consumo de água e da geração de resíduos líquidos em laboratórios do Campus Toledo da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste).

Inicialmente, realizou-se o levantamento espacial e funcional do campus por meio da análise da infraestrutura física e de registros institucionais, permitindo identificar os ambientes e laboratórios com potencial de consumo hídrico e geração de efluentes nos sanitários, nos laboratórios e nas demais fontes gerais. Os dados de consumo de água foram obtidos a partir das leituras mensais do hidrômetro institucional do poço artesiano, registradas no período de janeiro a dezembro de 2025, com frequência mensal de leitura e controle realizado pela equipe técnica do campus, possibilitando determinar os consumos mensais e anuais do sistema.

Foram identificadas 205 práticas experimentais realizadas nos laboratórios dos cursos de Engenharia Química, Engenharia de Pesca e Química realizadas nas respectivas turmas das disciplinas dos cursos em questão. Para a análise da geração de resíduos líquidos, as práticas foram agrupadas conforme critérios técnicos relacionados ao tipo de processo químico e à tipologia de efluentes gerados.

No caso dos efluentes laboratoriais, foram elaborados fluxogramas para as 205 práticas laboratoriais e, neste artigo, em nível de exemplo, somente se apresenta o detalhamento de 3 práticas laboratoriais. Nesses fluxogramas, de forma qualitativa e quantitativa, foram explicitados os respectivos fluxos de entrada (reagentes) e saída (resíduos), permitindo assim associar os resíduos às respectivas práticas laboratoriais. A quantificação dos resíduos foi realizada a partir dos volumes médios de soluções geradas em cada prática experimental, obtidos por medição direta com vidraria graduada e consulta aos roteiros laboratoriais das disciplinas, multiplicados pela frequência anual de execução de cada prática e pelo número de turmas envolvidas, garantindo a reprodutibilidade do método.

Os resíduos foram classificados em ácidos, básicos, neutros e contendo metais pesados, sendo os dados organizados em planilhas eletrônicas de Excel e analisados de forma comparativa para identificar os laboratórios com maior geração de resíduos e maior potencial de risco ambiental.

Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta a localização do campus de Toledo da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) e sua região de influência, concentrada predominantemente nas regiões oeste e sudoeste do estado do Paraná. A instituição possui abrangência regional que alcança aproximadamente 94 municípios, evidenciando seu papel na interiorização do ensino superior público no estado. O Campus de Toledo caracteriza-se como um importante polo acadêmico da universidade, com oferta de cursos de graduação e programas de pós-graduação em áreas como Engenharia Química, Recursos Pesqueiros, Desenvolvimento Regional e Agronegócio (UNIOESTE, 2024). A estrutura acadêmica encontra-se organizada em diferentes centros de ensino e dispõe de infraestrutura voltada às atividades de ensino, pesquisa e extensão, constituindo um ambiente de intensa atividade científica e tecnológica.



Figura 1. Localização do município de Toledo e do Campus da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Fonte: Elaboração própria

A Figura 2 apresenta a distribuição de ambientes na área do Campus Toledo da Unioeste, evidenciando a presença de 38 salas de aula, 40 gabinetes de professores, 49 banheiros e 92 ambientes laboratoriais destinados a atividades de ensino, pesquisa e extensão, além de outros espaços administrativos e de apoio (UNIOESTE, 2024). Do total de laboratórios existentes no campus, 82 pertencem ao Centro de Engenharia e Ciências Exatas (CECE), 3 ao Centro de Ciências Humanas e Sociais (CCHS) e 7 ao Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA). Para fins do presente estudo, foram considerados apenas os laboratórios vinculados às disciplinas experimentais dos cursos de Engenharia Química, Química e Engenharia de Pesca, por apresentarem potencial de geração de resíduos líquidos, totalizando 21 laboratórios analisados. Esses ambientes concentram atividades experimentais associadas ao uso de reagentes químicos, consumo de água e geração de resíduos líquidos com diferentes características físico-químicas, constituindo os principais pontos de interesse para a análise dos fluxos de efluentes no campus (Nolasco et al., 2006).

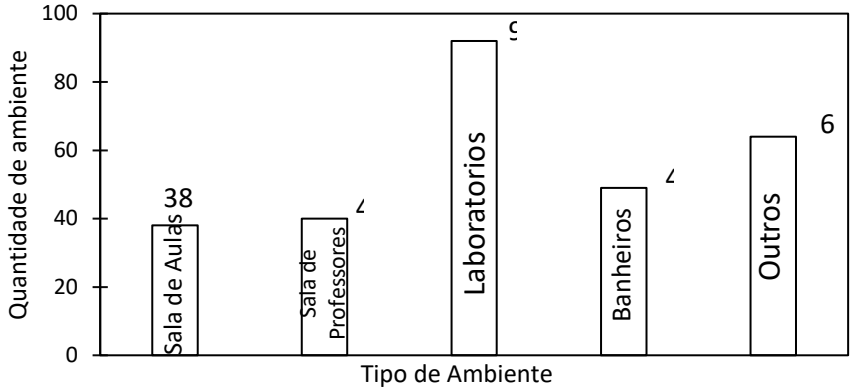


Figura 2. Distribuição de ambientes na área do Campus Toledo da Unioeste
Fonte: Elaboração própria

A Figura 3 Configuração física dos blocos laboratoriais utilizados pelos cursos de Engenharia Química, Engenharia de Pesca e Química na Unioeste/Campus de Toledo. Observam-se dois blocos principais: o bloco de Engenharia Química, utilizado pelos cursos de Engenharia Química e Química (Bacharelado e Licenciatura), e o bloco de Engenharia de Pesca (salas E). No bloco de Engenharia Química concentram-se diversos laboratórios de ensino identificados pelo código EQL, nos quais são realizadas a maioria das práticas experimentais associadas ao uso de reagentes químicos e ao potencial descarte de resíduos laboratoriais. No pavimento térreo destacam-se três laboratórios: EQL1, EQL2 e EQL3, utilizados em atividades experimentais de ensino nas áreas da Química. No primeiro pavimento foram identificados cinco laboratórios, sendo considerado neste estudo o Laboratório de Análise Instrumental (EQL7), em função da natureza das práticas realizadas e do maior potencial de produção de resíduos líquidos. Já no segundo pavimento foram identificados cinco laboratórios, dos quais foram incluídos na análise os laboratórios EQL9, EQL10, EQL11 e EQL12, associados às áreas de Química Orgânica, Química Analítica, Físico-Química e Química Geral.

No bloco de Engenharia de Pesca foram identificados oito laboratórios no pavimento térreo, sendo considerado no estudo apenas o Laboratório de Bioquímica (EL4), por apresentar atividades experimentais associadas ao descarte de soluções líquidas.

A concentração desses ambientes evidencia a elevada intensidade de atividades experimentais no campus, indicando áreas com maior potencial de produção de resíduos laboratoriais.

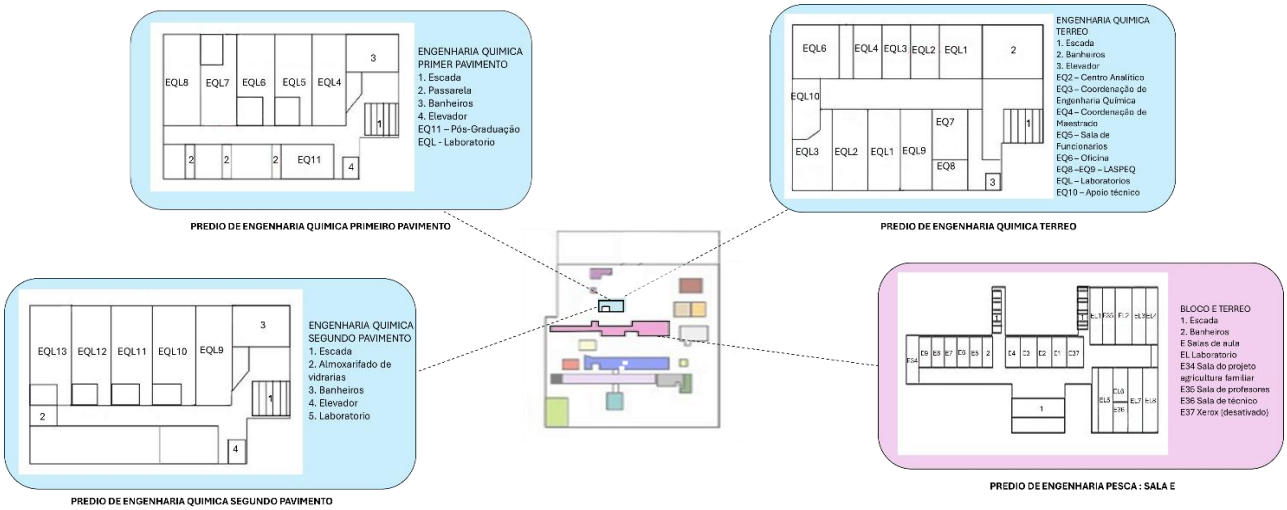


Figura 3. Configuração física dos blocos laboratoriais utilizados pelos cursos de Engenharia Química, Engenharia de Pesca e Química na Unioeste/Campus de Toledo
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 1 apresenta o consumo mensal de água do poço artesiano do Campus Toledo da Unioeste referente ao ano de 2025, obtido a partir das leituras do hidrômetro institucional. Observa-se que o consumo anual totalizou 20.058,57 m³/ano. A análise da distribuição mensal evidencia variações significativas ao longo do ano. Os maiores consumos foram registrados nos meses de **a**bril (2.421 m³), junho (2.365 m³) e julho (2.520 m³), período que coincide com o funcionamento regular das atividades acadêmicas e laboratoriais no campus. Observa-se ainda que foram identificados e corrigidos vazamentos na rede hidráulica do campus, especialmente nas proximidades do auditório e na rede antiga localizada atrás do miniauditório, eventos que explicam parcialmente os valores elevados registrados em determinados meses. Conforme demonstrado por Silva e Oliveira (2022), a correção de vazamentos em campus universitário pode reduzir o consumo hídrico em até 26,91%, evidenciando o impacto significativo da manutenção preventiva da infraestrutura hidráulica. Os resultados indicam que o consumo hídrico do campus não depende exclusivamente do número de usuários, sendo fortemente influenciado por fatores operacionais como perdas na rede de distribuição e períodos de funcionamento acadêmico, reforçando a necessidade do monitoramento contínuo como estratégia de gestão eficiente dos recursos hídricos institucionais (Sousa, 2024).

Tabela 1. Consumo mensal de água do poço artesiano do Campus Toledo da Unioeste com base nas leituras do hidrômetro institucional no ano 2025

Mês	Hidrômetro	Días consumo	Leitura anterior	Leitura atual	Consumo m³/período	Consumo m³/30dd	Consumo m³/día
			2025				
JAN	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	29	77974 1002	79594 1002	1620 0	1676	55,86
FEV	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	28	79594 1002	81336 1002	1742	1866,42857	62,2142857
MAR	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	30	81336 1002	83444 1002	2108 0	2108	70,2666667
ABR	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	31	83444 1002	85946 1002	2502 0	2421,29032	80,7096774
MAI	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	33	85946 1002	88403 1002	2457 0	2233,63636	74,4545455
JUN	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	28	88403 1002	90610 1002	2207 0	2364,64286	78,8214286
JUL	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	32	90610 1002	93298 1002	2688 0	2520	84
AGO	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	30	93298 1002	94317 1002	1019 0	1019	33,9666667
SET	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	30	94317 1002	95261 1002	944 0	944	31,4666667
OUT	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	30	95261 1002	96390 1002	1129 0	1129	37,6333333
NOV	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	34	96390 1002	97574 1002	1184 0	1044,70588	34,8235294
DEZ	Hidrom. Poço Hidrom. Rua	35	97574 1002	98428 1002	854 0	732	24,4
Consumo total do ano 2025						20058,57	

Fonte: Elaboração própria

Na tabela 2, apresenta os laboratórios, principais práticas experimentais realizadas nos laboratórios de Engenheira Química, Engenheira Pesca y Química do Campus Toledo e a tipologia dos efluentes. As práticas experimentais realizadas nos laboratórios de Engenheira Química, Engenheira Pesca y Química do Campus Toledo. No total, foram identificadas 205 praticas laboratoriais distribuídas em 13 disciplinas distintas, realizadas em 8 ambientes principais (EQL 1, 2, 3, 7, 9, 10, 11, 12 e EL 4). As disciplinas abrangem Química Orgânica, Química Geral e Inorgânica, Fundamentos da Química Experimental, Análise Instrumental, Química Inorgânica, Química Analítica, Tecnologia das Fermentações e dos Alimentos, Laboratório de Bioquímica (Pesca), Físico-Química, Laboratório de Engenharia Química, Módulo Bioquímica. As atividades experimentais realizadas totalizam 205 práticas laboratoriais distribuídas nas diversas disciplinas e turmas dos cursos em questão, incluindo operações básicas de laboratório (preparo de soluções, medidas físico-químicas, técnicas de separação), até práticas complexas (sínteses orgânicas, reações de oxidação-redução, análises instrumentais).A análise do conjunto de práticas indica que a maior parte dos experimentos utiliza soluções aquosas, ácidos, bases e solventes orgânicos, estando predominantemente associada à geração de efluentes líquidos neutros, ácidos e básicos. Em menor frequência, porém com maior complexidade química, destacam-se práticas de Química Analítica e Inorgânica, potencialmente associadas à geração de resíduos contendo espécies metálicas. Essa heterogeneidade de atividades evidencia diferenças significativas no perfil de geração de efluentes entre os

laboratórios, reforçando a importância da caracterização das práticas como etapa fundamental para a compreensão da origem dos resíduos líquidos no ambiente universitário.

Tabela 2 Laboratórios, principais práticas experimentais realizadas nos laboratórios de Engenheira Química, Engenheira Pesca y Química do Campus Toledo e tipologia dos efluentes.

Laboratório/Setor	Código	Principais práticas experimentais	Tipologia potencial de efluentes
Química Orgânica (Eng. Química, Bacharelado e Licenciatura)	EQL - 9	Determinação de propriedades físico-químicas, extrações, recristalização, destilação, cromatografia, reações de oxidação e síntese orgânica.	Neutros, ácidos, básicos
Química Geral e Inorgânica (Eng. Química)	EQL - 12	Vidrarias, preparo e padronização de soluções, propriedades da matéria, cinética e equilíbrio químico	Neutros, ácidos, básicos
Fundamentos Química Experimental (Química Bacharelado. /Licenciatura)	EQL - 12	Normas segurança, padronização, teste chama, tampões	Neutros, ácidos, básicos
Analise Instrumental (Eng. Química)	EQL - 7	Espectroscopia UV-Vis, potenciômetro, cromatografia, analises instrumentais	Neutros, resíduos com metais
Química Inorgânica (Química Bacharelado/Licenciatura)	EQL - 11	Síntese e caracterização de compostos inorgânicos, reatividade de halogênios, complexos metálicos	Ácidos, metais pesados
Química Analítica (Eng. Química, Licenciatura, Química Bacharelado)	EQL - 10	Titulações, analises gravimétricas espectrofotometrias, analise de alimentos	Neutros, ácidos metais
Laboratório Bioquímica – (Eng. De Pesca)	EL – 4	Extração e caracterização de biomoléculas, enzimas e polissacarídeos	Neutros
Físico – Químico (Química Licenciatura)	EQL - 11	Calor mistura, diagramas fases, condutividade	Neutros, ácidos
Laboratório Engenharia Química 1	EQL - 1	Determinação do coeficiente de descarga, Determinação do coeficiente de difusão, Determinação do calor latente de vaporização	Neutros
Laboratório Engenharia Química 2	EQL - 2	Trocadores de calor, destilação e condensação, Processos de separação sólido- fluido (filtração), Fluidização	Neutros
Laboratório Engenharia Química 3	EQL - 3	Curvas de calibração em medidas de concentração, Cinética enzimática – estabilidade térmica da enzima uréase	Neutros
Módulo Bioquímica (Eng. Ambiental)	EQL - 3	Cinética enzimática (invertase, uréase)	Neutros

Fonte: Elaboração própria

A Figura 4 apresenta o fluxograma da prática experimental sobre elementos do Grupo 1 da Tabela Periódica, realizada no Laboratório de Química Inorgânica (EQL11). A reação do sódio metálico com água gerou aproximadamente 20 mL de NaOH, e com etanol, cerca de 5 mL de etanoato de sódio ambos com caráter fortemente alcalino, exigindo neutralização prévia ao descarte (pH entre 6 e 8), conforme protocolos de gerenciamento de resíduos químicos laboratoriais (UNICAMP, 2005). O fluxograma constitui ferramenta eficaz para identificação e quantificação dos resíduos em cada etapa experimental, reforçando a análise integrada das práticas didáticas na gestão ambiental universitária (Silva et al., 2010).

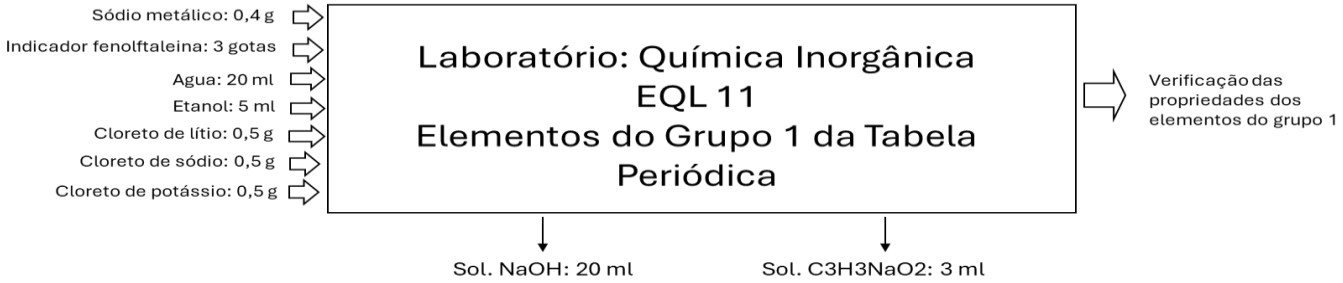


Figura 4. Fluxograma de pratica elementos do grupo 1 da tabela periódica realizada no Laboratório de Química inorgânica
Fonte: Elaboração própria

A Figura 5 apresenta o fluxograma da prática experimental de oxidação de compostos orgânicos realizada no Laboratório de Química Orgânica (EQL9). A prática utiliza permanganato de potássio ($KMnO_4$) e dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) como agentes oxidantes fortes em meio ácido sulfúrico, aplicados à oxidação de óleo de soja, cenoura e bebidas alcoólicas. Foram empregados 110 mL de $KMnO_4$ e 110 mL de água destilada, gerando soluções contendo MnO_2, espécies de Cr(VI) e subprodutos orgânicos oxidados, classificados como efluentes ácidos contendo metais, de elevado potencial de impacto ambiental (Nolasco et al., 2006). O Cr(VI), proveniente do $K_2Cr_2O_7$, é classificado como resíduo Classe I Perigoso pela ABNT NBR 10004:2004, sendo a forma mais tóxica do cromo e capaz de causar bioacumulação em organismos aquáticos, exigindo tratamento e descarte diferenciado (Barbosa et al., 2020). Embora os volumes gerados sejam reduzidos, a complexidade química desses efluentes evidencia que o risco ambiental está associado à composição, não ao volume, princípio central do diagnóstico realizado (Veiga, 2010).

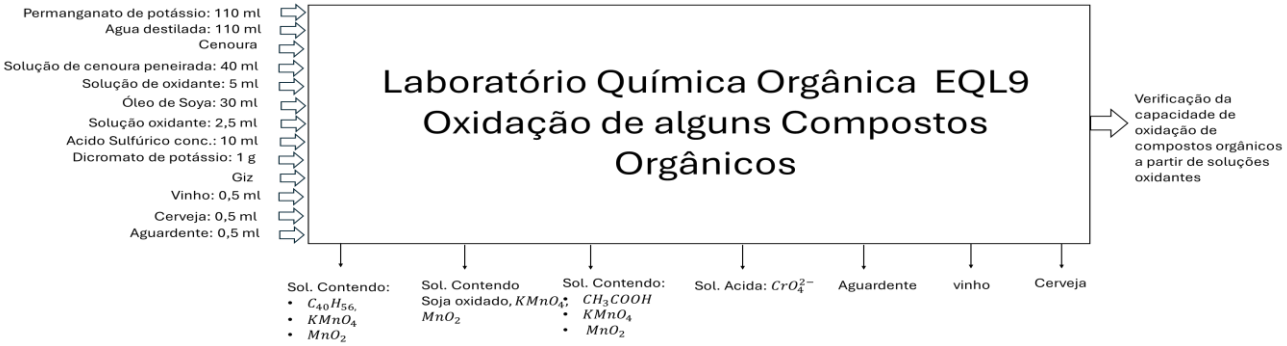


Figura 5. Fluxograma da pratica oxidação de alguns compostos orgânicos realizada no Laboratório de Química Orgânica
Fonte: Elaboração própria

A Figura 6 apresenta o fluxograma da prática de preparação e reatividade dos halogênios realizada no Laboratório de Química Inorgânica (EQL11), envolvendo a produção e reação de cloro, bromo e iodo com reagentes como dióxido de manganês, ácido clorídrico, ácido sulfúrico, bromato de sódio e iodeto de potássio. Os principais resíduos gerados foram: água de cloro (~70 mL), água de bromo (~93 mL), soluções contendo cloretos, brometos e iodetos metálicos, além de soluções ácidas residuais com precipitado de enxofre (5 mL) e íons de cobre e zinco, perfil classificado como efluentes ácidos contendo haletos e metais dissolvidos, enquadrados como resíduos Classe I Perigosos pela ABNT NBR 10004:2004. A predominância de espécies halogenadas dissolvidas confere a esses efluentes elevada reatividade química e potencial oxidante, com risco de formação de subprodutos tóxicos em contato com matéria orgânica, exigindo segregação e descarte diferenciado dos demais efluentes laboratoriais (Nolasco et al., 2006). Embora os volumes sejam reduzidos, a diversidade e complexidade química dos resíduos reforçam que o impacto ambiental dos laboratórios é determinado pela composição química, não pelo volume gerado (Veiga, 2010; Barbosa et al., 2020).

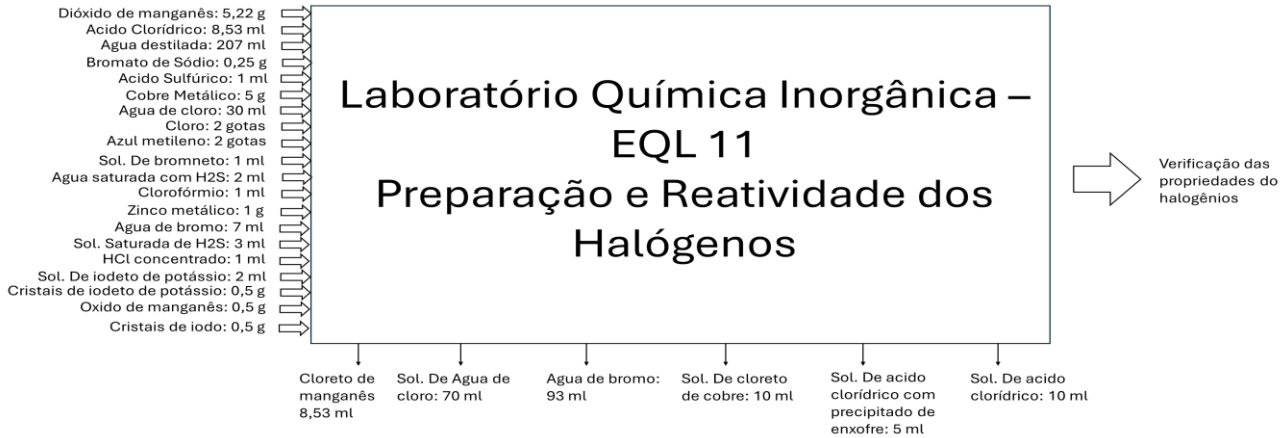


Figura 6. Fluxograma da prática preparação e reatividade dos halogênios realizada no Laboratório de Química Inorgânica
Fonte: Elaboração própria

A Figura 7 apresenta a distribuição anual dos resíduos líquidos gerados nos diferentes laboratórios do Campus Toledo, classificados em ácidos, básicos, neutros e contendo metais pesados, constituindo o principal resultado original deste estudo. Observa-se o predomínio de resíduos neutros (204,0 L/ano), seguidos por resíduos ácidos (44,39 L/ano), básicos (21,59 L/ano) e resíduos contendo metais pesados (9,36 L/ano), perfil compatível com o encontrado por Barbosa et al. (2020) em universidades públicas brasileiras com cursos de engenharia química. O EQL3 destacou-se como principal gerador de resíduos ácidos (27,53 L/ano), associado às análises de água e processos reacionais com soluções ácidas recorrentes. O EQL12 apresentou os maiores

volumes de resíduos básicos (8,09 L/ano) e neutros (65,2 L/ano), refletindo a elevada diversidade e frequência das práticas experimentais realizadas nesse laboratório. O EQL10 foi o principal responsável pela geração de resíduos com metais pesados (5,84 L/ano), decorrente das atividades de química analítica para determinação de metais em solução. Os laboratórios EQL11 e EQL9 também contribuíram para a geração de diferentes tipologias de resíduos, com destaque para efluentes ácidos e contendo espécies halogenadas, respectivamente, embora em menores volumes absolutos. Embora os resíduos neutros representem a maior parcela do volume total gerado, os resíduos ácidos e aqueles contendo metais pesados apresentam maior potencial de impacto ambiental devido à sua reatividade química e toxicidade, reforçando que o risco ambiental dos laboratórios não é determinado pelo volume, mas pela composição química dos efluentes gerados (Nolasco et al., 2006).

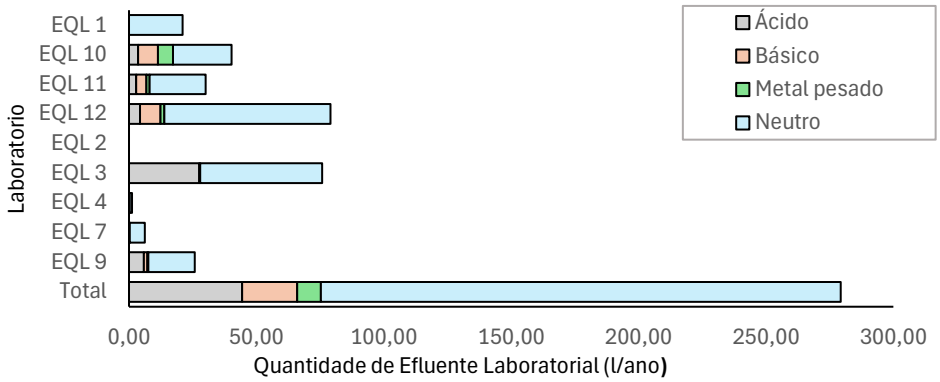


Figura 7. Quantidade anual de resíduos líquidos gerados nos laboratórios (ácidos, básicos, neutros e metais pesados)
Fonte: Elaboração própria

A Figura 8 apresenta o esquema consolidado dos fluxos de entrada e saída de água e resíduos na Unioeste/Campus de Toledo. Como entrada, o campus recebe 20.058,57 m³/ano de água proveniente exclusivamente de poço artesiano, distribuídos entre 976 estudantes matriculados em 2025 nos cursos de Engenharia Química (102), Engenharia de Pesca (63) e Química (64), os quais realizam 205 práticas experimentais nos setores laboratoriais. Na saída do sistema, registraram-se 13.387,51 m³/ano de efluentes sanitários, 6.666,36 m³/ano de efluente geral e 0,2784 m³/ano de efluente laboratorial volume compatível com o reportado por Oliveira et al. (2019) em instituições federais de porte similar, nos quais os efluentes laboratoriais representam entre 0,001% e 0,003% do consumo hídrico total. Embora reduzidos em volume, os efluentes laboratoriais apresentaram maior diversidade e periculosidade, classificados como neutros (0,204 m³/ano), ácidos (0,0444 m³/ano), básicos (0,0216 m³/ano) e contendo metais pesados (0,00936 m³/ano), composição consistente com o perfil descrito por Barbosa et al. (2020) para laboratórios de engenharia química, com predominância de efluentes neutros e presença de espécies ácidas e metálicas. A metodologia de fluxogramas por prática experimental, diferentemente dos estudos citados, permitiu maior granularidade na caracterização das fontes geradoras, constituindo abordagem replicável para outras instituições (Nolasco et al., 2006; Silva et al., 2010). Evidencia-se que o risco ambiental dos laboratórios não é determinado pelo volume, mas pela composição química dos efluentes, reforçando o diagnóstico funcional por fluxogramas como ferramenta essencial para a elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) em instituições de ensino superior.

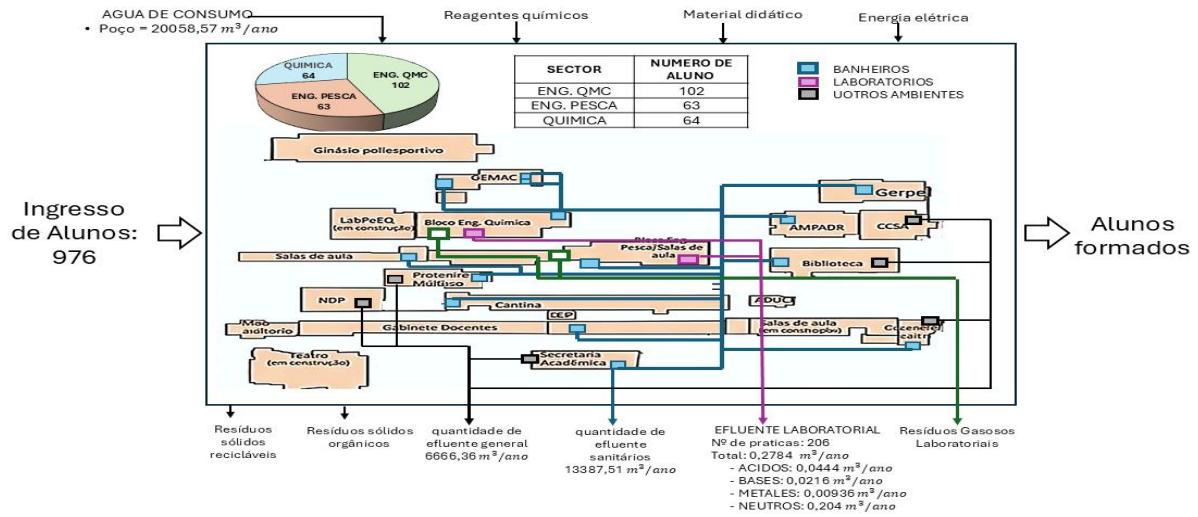


Figura 8. Esquema demonstrativo consolidado do consumo de água/insumos e geração de efluentes na Unioeste/Campus de Toledo.
Fonte: Elaboração própria

Considerações Finais

O presente estudo diagnosticou, quantificou e caracterizou os efluentes líquidos gerados nas atividades laboratoriais do Campus Toledo da Unioeste, evidenciando a relação entre a organização espacial dos laboratórios, a intensidade das práticas experimentais e a tipologia dos resíduos produzidos. Foram identificadas 205 práticas experimentais nos cursos de Engenharia Química, Engenharia de Pesca e Química, associadas à geração de 0,2793 m³/ano de efluentes laboratoriais, fração de 0,0014% do total hídrico do campus (20.058,57 m³/ano), compatível com os intervalos reportados por Oliveira et al. (2019) para instituições federais de porte similar.

A análise quantitativa revelou predominância de efluentes neutros (0,204 m³/ano), seguidos de ácidos (0,0444 m³/ano), básicos (0,02159 m³/ano) e contendo metais pesados (0,00936 m³/ano), com destaque para o EQL3 (principal gerador de resíduos ácidos: 27,53 L/ano), EQL12 (maior volume neutro: 65,2 L/ano e básico: 8,09 L/ano) e EQL10 (principal gerador de metais: 5,84 L/ano). Esses resultados confirmam que o risco ambiental dos laboratórios universitários não é determinado pelo volume gerado, mas pela composição e toxicidade dos efluentes, padrão consistente com Barbosa et al. (2020) e Nolasco et al. (2006).

A metodologia por fluxogramas de prática experimental demonstrou elevada eficácia para a identificação granular das fontes geradoras, constituindo ferramenta replicável para o diagnóstico ambiental em outras instituições de ensino superi or (Silva et al., 2010). Recomenda-se, para estudos futuros, a caracterização físico-química dos efluentes, a avaliação de tecnologias de tratamento adequadas ao contexto universitário e a aplicação comparativa da metodologia em diferentes campi, visando subsidiar a elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) compatíveis com a realidade institucional (Schalch et al., 2002).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido, bem como à Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste)

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos** — Classificação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

BARBOSA, F. C. L. et al. Minimizing laboratory waste and improving material reuse through chemical waste exchange: case of a Brazilian institution. **Waste Management & Research,** v. 38, n. 9, p. 1006–1014, 2020. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X20938459. Acesso em: 03 mar. 2026.

NOLASCO, F. R.; TAVARES, G. A.; BENDASSOLLI, J. A. Implantação de programas de gerenciamento de resíduos químicos laboratoriais em universidades: análise crítica e recomendações. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 118-124, 2006. DOI: 10.1590/s1413-41522006000200004.

OLIVEIRA, S. C. et al. Gerenciamento de resíduos em laboratórios de uma universidade pública. **Saúde em Debate**, Rio de Janeiro, v. 43, n. esp. 3, p. 63–77, 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/sdeb/a/WbRkfLv8QhbNBZWC4CqDFgp/. Acesso em: 05 mar. 2026.

PHILIPPI JR., A.; AGUILAR, A. O. Resíduos sólidos: características e gerenciamento. In: PHILIPPI JR., A. (org.). **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Manole, 2005. p. 267–321.

SCHALCH, V. et al. Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. São Carlos: EESC/USP, 2002. 97 p.

SILVA, A. F.; SOARES, T. R. S.; AFONSO, J. C. Gestão de resíduos de laboratórios: uma abordagem para o ensino médio. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 41–47, fev. 2010. Disponível em: https://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc32_1/08-PE-9208.pdf. Acesso em: 05 mar. 2026.

SILVA, F. M.; OLIVEIRA, R. T. Análise propositiva da eficiência no abastecimento de água em campus universitário. **Revista Internacional de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, 2022. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0007. Disponível em: https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/7061. Acesso em: abr. 2026.

SOUSA, G. O. C. de. **Técnicas para pesquisa de vazamentos de água em sistemas de abastecimento**. 2024. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/35919. Acesso em: abr. 2026.

TAKAYANAGUI, Angela Maria Magosso. **Trabalhadores de saúde e meio ambiente: ação educativa do enfermeiro na conscientização para gerenciamento de resíduos sólidos**. 1993. Tese (Doutorado em Enfermagem em Saúde Pública) — Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 1993. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/83/83131/tde-29072005-093924/. Acesso em: 17 abr. 2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Comissão de Segurança e Ética Ambiental. **Normas de Gerenciamento de Resíduos Químicos do Instituto de Química da UNICAMP**. Aprovadas na 224ª sessão da Congregação, Resolução IQ 134/2005, em 23 nov. 2005. Campinas: IQ-UNICAMP, 2005. Disponível em: https://www.iqm.unicamp.br/arquivos/normasResiduos.pdf. Acesso em: abr. 2026.

UNIOESTE. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Sobre a Unioeste. Cascavel, 2024. Disponível em: https://www.unioeste.br/portal/inicio/sobre/a-unioeste. Acesso em: abr. 2026.

VEIGA, T. B. **Diagnóstico da situação do gerenciamento de resíduos perigosos no Campus da USP de Ribeirão Preto** – *SP*. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2010. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/22/22133/tde-16052011-165236/publico/TATIANEBONAMETTIVEIGA.pdf. Acesso em: 03 mar. 2026.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE RECOVERY OF HIGH-VALUE ALGINATE-LIKE EXOPOLYMERS (ALE) FROM ALGAL-BACTERIAL AEROBIC GRANULAR SLUDGE (ABGS) SYSTEMS

1 Daniel Serafim da Silva, 2 Elissandra Pereira, 3 Henrique César Guedes Campos, 4 Mario Takayuki Kato, 5 Bruna Scandolara Magnus, 6 Lourdinha Florencio.

1 Federal Rural University of Pernambuco, e-mail: Daniel81207875@gmail.com;
2 Federal University of Pernambuco, e-mail: elissandra.pereira@ufpe.br; 3 Federal University of Pernambuco, henrique.campos@ufpe.br; 4 Federal University of Pernambuco e-mail: mario.kato@ufpe.br; 5 Federal University of Pernambuco e-mail: bruna.magnus@ufpe.br; 6 Federal University of Pernambuco, e-mail: flor@ufpe.br.

Keywords: Alginate-Like Exopolymers; Algal-Bacterial granular Sludge; Biopolymers recovery

Abstract

This study evaluated the effects of temperature on the formation and stability of algal-bacterial granular sludge (ABGS) and on the production of alginate-like exopolymers (ALE), using two sequencing batch photobioreactors operated at 30 °C (F1) and 20 °C (F2). The reactors were fed with synthetic wastewater and monitored for granule size distribution, sludge volume index (SVI), biomass concentration, chemical oxygen demand (COD) and ammonium (NH_4^+—N) removal, extracellular polymeric substances (EPS) production, and ALE yield. The results showed that the reactor operated at 30 °C exhibited greater structural stability, with complete granulation achieved after 75 days, higher biomass concentration (up to 1.8 g/L), and higher EPS production (average of 549 mg/g VSS), predominantly composed of proteins, which are associated with improved mechanical strength. In contrast, the reactor operated at 20 °C reached granulation earlier (40 days), but with lower long-term stability and reduced EPS production (average of 338 mg/g VSS). Both reactors achieved high COD removal efficiencies (81.9% for F1 and 84.3% for F2), whereas ammonium removal was higher at 30 °C (43.8%) compared to that at 20 °C (32.0%). No statistically significant difference was observed in ALE production between the two conditions ($p = 0.838$), with average values of 43.1 mg/g VSS (F1) and 41.3 mg/g VSS (F2). Overall, higher temperature favored biomass stability and EPS production, while ALE recovery remained unaffected within the tested range. These findings highlight the potential of ABGS systems for wastewater treatment and biopolymer recovery, contributing to circular economy strategies.

Introduction

The management of sludge generated in wastewater treatment plants (WWTPs) remains a significant environmental challenge (Schambeck *et al*., 2020). Traditionally, this waste has been disposed of in landfills or dumpsites (Nizami *et al*., 2017); however, recent European directives encourage its valorization through energy recovery and the extraction of high-value compounds, in line with circular economy principles (Healy *et al*., 2015). In this context, algal-bacterial granular sludge (ABGS) has emerged as a promising alternative for wastewater treatment, offering advantages such as reduced aeration costs, improved settleability, and lower CO_2 emissions (Ji *et al*., 2020).

Beyond treatment efficiency, ABGS systems enable the recovery of valuable bioproducts, including alginate-like exopolymers (ALE). This biopolymer is a key component of extracellular polymeric substances (EPS) and plays a crucial role in granule formation and structural stability (Felz *et al*., 2016; Meng *et al*., 2019). Its relevance lies in its similarity to alginate derived from brown algae, which is widely used in the food, pharmaceutical, and paper industries (Moradali *et al*., 2018; Makarova *et al*., 2023). Considering that ALE may account for 15–25% of the granule dry weight and reach market values between US$ 80 and US$ 140 per kg (Murujew *et al*., 2019), its recovery represents an economically attractive strategy.

However, the efficiency of ALE production is strongly dependent on operational conditions, particularly temperature, which affects microbial activity, EPS synthesis, and granule stability (Araújo *et al*., 2022). Therefore, this study aimed to evaluate the effects of temperature on the formation and stability of algal-bacterial granules, as well as on ALE production and recovery, using sequencing batch photobioreactors (F1 and F2) operated under two thermal regimes (30 °C and 20 °C, respectively).

Materials and Methods

Experimental system

For this study, a laboratory-scale experimental system was employed, consisting of two sequencing batch photobioreactors (SBPRs) made of transparent acrylic. The reactors had an internal diameter of 74 mm, a height of 1.0 m, a working volume of 4.0 L, and a volumetric exchange ratio of 75% (Figure 1). To sustain the microalgae–bacteria consortium, an artificial lighting regime was applied with 12 h light/12 h dark cycles and a light intensity of 100 ± 20 µmol/m²·s.

The photobioreactors were operated under sequencing batch conditions with 6-hour cycles, comprising the following stages: upflow anoxic feeding (60 min), aerobic reaction (279 min), anoxic reaction (14 min) followed by a 1-minute air pulse, settling (5 min), and effluent discharge (1 min). Reactor F1 was maintained at 30 ± 2 °C, while reactor F2 was operated at 20 ± 2 °C.

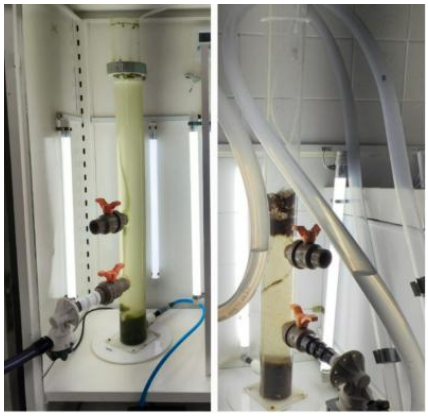


Figure 01: Schematic representation of the experimental setup: F1 (30 °C) and F2 (20 °C).
Source: Author (2026)

The reactors were inoculated with activated sludge and microalgae obtained from an aeration tank and high-rate algal ponds, respectively. The photobioreactors were fed with a synthetic influent composed of: glucose (400 mg/L), NH_4Cl (60 mg/L), KH_2PO_4 (7 mg/L), $CaCl_2$ (2 mg/L), $MgSO_4 \cdot H_2O$ (5 mg/L), $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (1.6 mg/L), $NaHCO_3$ (500 mg/L), and a micronutrient solution at a ratio of 1 mL/L (Huang *et al*., 2015).

Physicochemical analyses and biomass monitoring

To monitor the development of granular biomass, sludge volumetric index (SVI) and microscopy analyses (optical microscope Leica, model MDE) were performed. Granule size distribution was assessed using the methodology proposed by Bin *et al*. (2011), classifying the biomass into two size fractions: <0.2 mm and ≥0.2 mm, based on sieving (Table 1).

Table 01: Physico-chemical parameters monitored and analytical methods employed.

Parameter	Analytical method	Reference
DO, Temperature, and pH	Multiparameter probe	Hach HQ40d multiparameter meter
Total and soluble COD	Colorimetric	APHA (2017)
Ammoniacal nitrogen (NH_4^+–N)	Distillation/titrimetric	APHA (2017)
Solids series	Gravimetric	APHA (2017)
Sludge Volumetric Index	Timed settling test	Schwarzenbeck *et al*. (2004)
Granulometry	Sieving analysis	Bin *et al*. (2011)
EPS proteins	Lowry method	Lowry *et al*. (1951)
EPS polysaccharides	Dubois method	Dubois *et al*. (1956)

To evaluate factors associated with subproduct recovery, physicochemical analyses were carried out on the mixed liquor, influent, and final effluent, following the methodologies described in Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd edition (APHA, 2017). The monitored parameters and respective analytical methods are presented in Table 1.

Alginate-Like Exopolymers

Alginate-like exopolymers (ALE) recovery followed a protocol adapted from Lin *et al*. (2010), Schambeck *et al*. (2020), and Felz *et al*. (2016), as illustrated in Figure 2. Mixed liquor samples collected at the end of the aeration phase were centrifuged and freeze-dried. The extraction was performed using 0.3 g of biomass transferred to a 250 mL Erlenmeyer flask containing 67 mL of 0.2 M Na_2CO_3 solution. The mixture was maintained in a water bath at 80 °C under agitation at 400 rpm for 35 min. After this period, the material was centrifuged (4000 rpm, 20 min) to obtain the supernatant containing solubilized EPS.

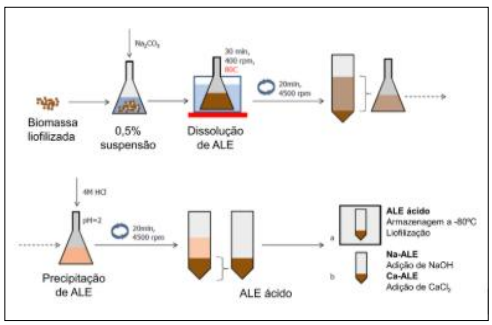


Figure 02: Schematic illustration of the ALE extraction procedure from granular biomass.
Source: Guimarães (2017)

ALE was precipitated by adding 1 M HCl until pH 2.20 ± 0.05 (Schambeck *et al*., 2020). The solution was then centrifuged again (4000 rpm, 20 min), and the resulting pellet, corresponding to ALE in its acidic form, was recovered and quantified by solids analysis (APHA, 2012; Felz *et al*., 2016).

Results and Discussion

Development of Granular Biomass

In both reactors (F1 at 30 °C and F2 at 20 °C), granules with diameters ≥ 0.2 mm predominated throughout most of the operational period (Figure 03). However, during the initial stages, when the sludge settleability ratio (SVI_{30}/SVI_{10}) was unstable, a higher fraction of smaller particles was observed. According to the criterion proposed by De Kreuk *et al*. (2007), successful granulation is defined by the occurrence of less than 20% of particles with diameters < 0.2 mm and an SVI_{30}/SVI_{10} ratio above 0.8.

In the reactor operated at 30 °C (F1), partial granulation was observed from day 26, when approximately 95% of the particles already exhibited diameters ≥ 0.2 mm, although the sludge volume index had not yet reached the recommended threshold. This behavior indicates the formation of denser aggregates with greater capacity to retain larger particles. Full granulation was achieved at day 75, when the fraction of fine particles decreased to below 20% and the SVI_{30}/SVI_{10} ratio exceeded 0.8, indicating improved structural stability of the microbial aggregates.

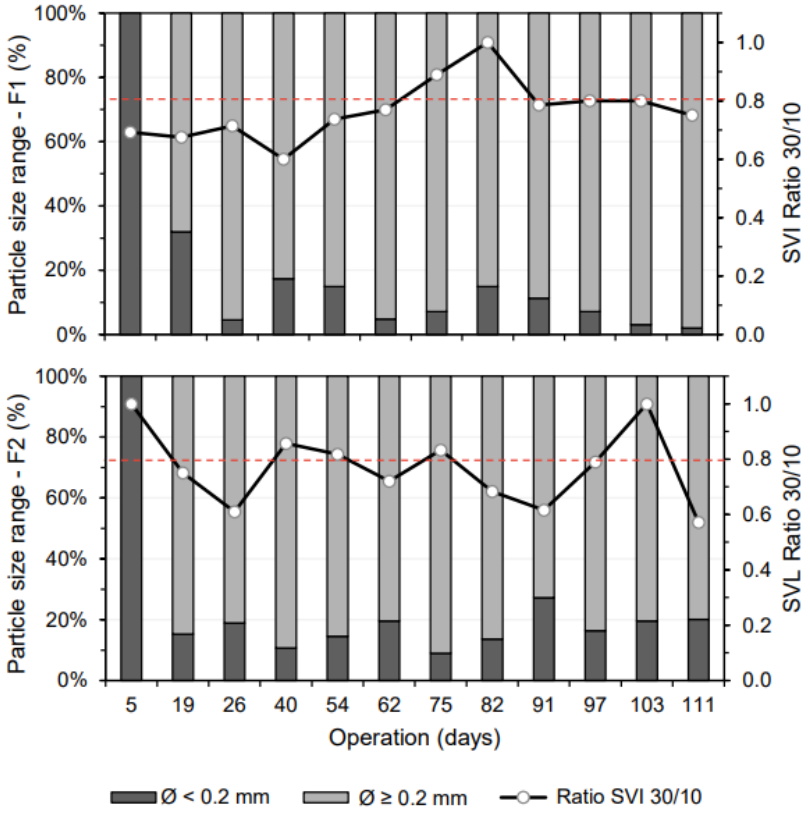


Figure 03: Particle size distribution of F1 (30 °C, top) and F2 (20 °C, bottom).
Source: Author (2026)

In contrast, the reactor operated at 20 °C (F2) reached the granulation state earlier, at day 40, simultaneously meeting both granulometric and settleability criteria. However, this condition was not maintained over time, and subsequent fluctuations were observed, compromising the morphological uniformity and functional stability of the granules.

Overall, the comparison between the two operating temperatures indicates that, although the system at 20 °C exhibited faster granulation kinetics, it showed limited long-term stability. Conversely, operation at 30 °C promoted greater resilience and consistency in the later stages of the process, suggesting that temperature plays a key role in the structural consolidation and stability of aerobic granular sludge.

Biomass Growth

Mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) were higher and more variable in F1 (30 °C), reaching peak values close to 1.8 g/L around day 85. After this point, a slight decrease was observed, although concentrations remained above 1.3 g/L, indicating greater biomass retention. In contrast, F2 (20 °C) showed more stable but lower values, ranging from 0.6 to 1.0 g/L, with a maximum of 1.0 g/L around day 80.

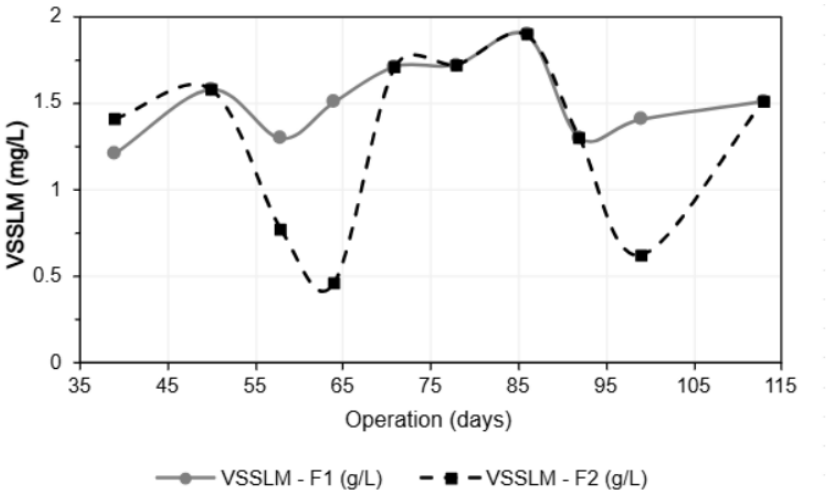


Figure 04: Temporal variation of MLVSS concentrations (mg/L) in F1 and F2.
Source: Author (2026)

These results indicate that operation at 30 °C favored biomass accumulation, consistent with the formation of more stable granules. Conversely, the system at 20 °C exhibited lower biomass levels, in agreement with its reduced stability and the fluctuations observed during granulation.

Pollutant Removal

Both systems maintained stable organic matter removal throughout the operational period. COD removal averaged 81.9% in F1 (30 °C) and 84.3% in F2 (20 °C) (Table 02), values consistent with those reported by Li *et al*. (2021) under similar conditions, indicating effective microbial adaptation after granule maturation.

Table 02: Influent concentrations and removal efficiencies of COD and ammonium (NH_4^+–N) in F1 and F2.

Parameter	Statistic	Influent (mg/L)	Removal efficiency (%)	
			F1 (30 °C)	F2 (20 °C)
COD	Mean	423.0	81.9	84.3
	SD	47.8	9.9	12.3
	Max	528.0	97.7	95.5
	Min	362.7	62.0	50.2
NH_4^+–N	Mean	58.9	43.8	32.0
	SD	5.3	26.2	10.9
	Max	69.7	88.2	51.4
	Min	51.1	7.9	8.9

Note: COD = chemical oxygen demand; NH_4^+–N = ammonium nitrogen; SD = standard deviation; Max = maximum; Min = minimum.

In contrast, ammonium (NH_4^+–N) removal differed markedly between temperatures. F1 achieved a higher average removal (43.8%) compared to F2 (32.0%), with a peak of 88.2%, exceeding values reported by Guimarães (2017). This behavior suggests enhanced nitrification at 30 °C, likely driven by increased metabolic activity of ammonia-oxidizing microorganisms. The lower performance observed at 20 °C may be attributed to reduced microbial kinetics, which can limit ammonia oxidation under mesophilic conditions at the lower end of the range.

EPS Concentration

Higher EPS concentrations were observed in F1 (30 °C) compared to F2 (20 °C) (Figure 05), ranging from 305.7 to 814.5 mg/g VSS, with an average of approximately 549 mg/g VSS. The maximum production occurred around day 58, coinciding with the granule maturation phase. Proteins (PN) predominated over polysaccharides (PS) throughout the operational period, indicating that proteins were the main EPS components and contributed to the formation of a more compact and stable extracellular matrix, typically associated with enhanced mechanical strength of the granules (Hou *et al*., 2021).

In F2, EPS concentrations were lower, ranging from 57.1 to 495.7 mg/g VSS, with an average of 338 mg/g VSS. The peak occurred around day 39, followed by a marked decrease, indicating lower stability than in F1.

Statistical analysis using one-way ANOVA revealed significant differences between reactors ($p = 0.012$), confirmed by Tukey's HSD test, indicating distinct EPS production patterns under different temperature conditions. Overall, the results suggest that EPS composition, particularly the higher protein content, is associated with improved granule robustness and operational performance (Li *et al*., 2015; Zhao *et al*., 2018), and is favored at 30 °C.

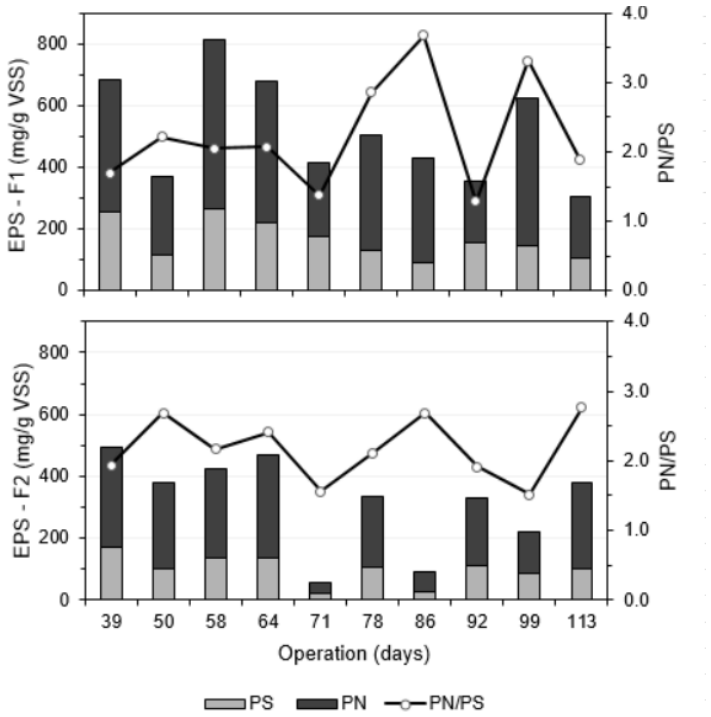


Figure 05: Temporal variation of EPS concentration and PN/PS ratio in F1 (30 °C, top) and F2 (20 °C, bottom). Source: Author (2026)

ALE Yield

ALE recovery exhibited distinct temporal patterns under the two temperature conditions, although no significant differences were observed overall. In F1 (30 °C), ALE production was more variable, with a peak of 95 mg/g VSS on day 58, followed by pronounced fluctuations, reaching a minimum of 8.3 mg/g VSS on day 113 (Figure 06). The average value was 43.1 mg/g VSS.

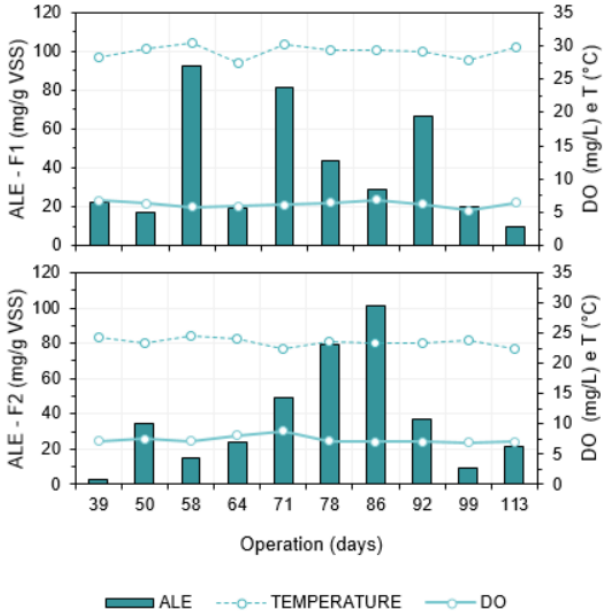


Figure 06: Temporal variation of ALE yield in biomass in F1 (top) and F2 (bottom). Source: Author (2026)

In contrast, F2 (20 °C) showed a more stable and progressive trend, reaching the highest value of the entire operation (105.1 mg/g VSS) on day 86. Despite these differences in temporal behavior, the average ALE production (41.3 mg/g VSS) was similar to that observed at 30 °C.

Statistical analysis confirmed that temperature did not significantly affect ALE recovery ($p = 0.838$; $p > 0.05$), indicating that both thermal conditions led to comparable overall production. The more stable profile observed at 20 °C may be associated

with stress-induced polymer release, whereas the higher variability at 30 °C may reflect dynamic microbial adaptation during granule maturation.

Overall, ALE production was not governed by temperature within the tested range, despite differences in temporal dynamics. The values obtained are consistent with those reported in the literature (17.3–160.4 mg ALE/g VSS) (Lin et al., 2010; Meng et al., 2020), confirming the robustness of both systems.

Conclusions

Temperature played a key role in shaping granule formation, stability, and EPS production in algal-bacterial aerobic granular sludge systems. The reactor operated at 30 °C (F1) exhibited enhanced structural stability, higher biomass accumulation, and increased EPS production, with a predominance of proteins, which is typically associated with improved mechanical strength of the granules. In contrast, operation at 20 °C (F2) promoted faster granule formation but resulted in lower long-term stability and reduced EPS concentrations.

Both systems achieved high organic matter removal, indicating robust microbial performance regardless of temperature. However, ammonium removal was enhanced at 30 °C, highlighting the sensitivity of nitrogen-related processes to thermal conditions.

Despite differences in temporal behavior, ALE recovery was not significantly affected by temperature ($p > 0.05$), with comparable average yields obtained under both conditions. This suggests that, within the tested range, ALE production is not directly governed by temperature, although microbial adaptation and stress responses may influence its dynamics over time.

Overall, higher temperature favored system stability and EPS production, while ALE recovery remained feasible under both operational conditions. These findings highlight the potential of algal-bacterial granular sludge as a sustainable approach for wastewater treatment and recovery of high-value biopolymers, contributing to circular economy strategies in environmental engineering.

Acknowledgements

The authors acknowledge the Federal University of Pernambuco (UFPE) and the Environmental Sanitation Laboratory (LSA) for providing the structural, scientific, and academic support essential for this study.

The authors also acknowledge the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the undergraduate research scholarship that supported this project.

References

APHA, AWWA, and WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th ed. American Water Works Association, 2017.

ARAÚJO, J. M. P. de; PINHEIRO, J. L. de L.; LIMA, J. C. de L.; *et al*. Influence of temperature on aerobic granular sludge formation and stability treating municipal wastewater with high nitrogen loadings. **Science of the Total Environment**, v. 844, art. 157171, 2022.

DE KREUK, M. K. *et al*. Aerobic granular sludge: State of the art. **Water Science & Technology**, 55(8), 75-81, 2007.
FELZ, S.; LEE, J.; HEBISCH, F. Extraction of Structural Extracellular Polymeric Substances from Aerobic Granular Sludge. **Journal of Visualized Experiments**, n. 115, 2016.

HEALY, M.; SEARLE, S.; WALLACE, M.; *et al*. Biorrefinarias de resíduos: viabilizando economias circulares em países em desenvolvimento. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 3, p. 247–257, 2015.

HOU, Y. *et al*. Structural characteristics of aerobic granular sludge and factors that influence its stability: A mini review. **Water**, 13(19), 2726, 2021.

HU, C.; ZHANG, L.; LI, X. Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 177, p. 578–588, 2021.

JI, Y.; KIM, S.; PARK, H. Removal mechanisms of phosphorus in non-aerated microalgal-bacterial granular sludge process. **Bioresource Technology**, v. 312, art. 126061, 2020.

LIN, Y. *et al.* Characterization of alginate-like exopolysaccharides isolated from aerobic granular sludge in pilot-plant. **Water Research**, v. 44, n. 11, p. 3355-3364, 2010.

MAKAROVA, A. O.; IVANOV, P. V.; SMIRNOV, A. A.; *et al*. Ion-Induced Polysaccharide Gelation: Peculiarities of Alginate Egg-Box Association with Different Divalent Cations. **Polymers (Basel)**, v. 15, n. 5, art. 1243, 2023.

MENG, F.; WANG, Q.; ZHOU, Y. Enhanced amount and quality of alginate-like exopolysaccharides in aerobic granular sludge for the treatment of salty wastewater. **BioResources**, v. 14, n. 1, p. 139–165, 2019.

MENG, F. *et al*. Application of aerobic granules-continuous flow reactor for saline wastewater treatment: Granular stability, lipid production and symbiotic relationship between bacteria and algae. **Bioresource Technology**, v. 295, p. 122291, 2020.

MORADALI, M. F.; REHM, B. H. A.; RASHEED, M. Alginate: Biosynthesis and applications. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 1, p. 1–16, 2018.

MURUJEW, O.; WHITTON, R.; KUBE, M.; *et al*. Recovery and reuse of alginate in an immobilized algae reactor. **Environmental Technology**, v. 42, n. 10, p. 1521–1530, 2019.

NIZAMI, A.; LIU, X.; CHEN, Y.; *et al*. Biorrefinarias de resíduos: viabilizando economias circulares em países em desenvolvimento. **Bioresource Technology**, v. 241, p. 1119–1128, 2017.

SCHAMBECK, C. M.; SILVA, R. S.; LIMA, F. S. Biopolymers recovery: dynamics and characterization of alginate-like exopolymers in an aerobic granular sludge system treating municipal wastewater without sludge inoculum. **Water Research**, v. 183, art. 116070, 2020.

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE UM REATOR SBRIA EM ESCALA PILOTO PARA REMOÇÃO SIMULTÂNEA DE MATÉRIA ORGÂNICA, NITROGÊNIO E FÓSFORO

1 Ana Paula Felix, 2 Alessandra Giordani, 3 Rafael Brito de Moura

1 Universidade Federal de Alfenas, e-mail: ana.felix@sou.unifal-mg.edu.br ; 2 Universidade Federal de Alfenas, e-mail:giordani.alessandra1211@gmail.com ; 3 Universidade Federal de Alfenas, e-mail: rafael.moura@unifal-mg.edu.br

Palavras-chave: Nitrificação e desnitrificação simultâneas; Remoção biológica de fósforo; Esgoto sanitário.

Resumo

O acesso ao saneamento básico e o tratamento eficiente de efluentes permanecem como desafios críticos em países em desenvolvimento. Desse modo, este trabalho avaliou o desempenho de um reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA), em escala piloto, para o tratamento de esgoto sanitário. O sistema foi operado em três Fases, com diferentes configurações operacionais, como tempo de aeração e vazão de ar, sendo de 2 h e 45 m^3 min^{-1}, 1,75 h e 52,5 m^3 min^{-1} e 1,75 h e 63 m^3 min^{-1}, para as Fases I, II e III respectivamente. Os resultados demonstraram elevada robustez e remoção simultânea de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica. Foram obtidas remoções máximas de até 95±4% de DBO, 73±12% de nitrogênio total e 100±0% de fósforo. A utilização de um decantador secundário mostrou-se essencial para a estabilidade operacional, clarificação do efluente e atendimento aos padrões legais. Dessa forma, o reator SBRIA se consolida como uma alternativa tecnológica promissora para o tratamento eficiente e simultâneo de matéria orgânica e nutrientes em sistemas compactos, sendo o controle operacional determinante para maximizar sua eficiência e estabilidade.

Introdução

O crescimento populacional mundial, aliado à carência de tratamento adequado de efluentes em países em desenvolvimento e subdesenvolvidos, contribui para a geração de danos à saúde humana e ao meio ambiente, sendo fundamentais os investimentos na criação e aplicação de tecnologias sustentáveis que possuam baixo custo de implantação, manutenção, bem como bom desempenho (Oliveira et al., 2024). Portanto, apesar de a Resolução nº 64/292 da Assembleia Geral da ONU (2010) estabelecer que o acesso ao saneamento é um direito essencial e fundamental para a dignidade humana, no Brasil, cerca de 56% do esgoto gerado é coletado e, deste total, somente 52% é efetivamente tratado (SNISS, 2024).

O lançamento de efluentes em cursos d'água provoca alterações nas características físico-químicas da água, comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (Lúcio, Ribeiro e Tomasso, 2025). Dentre os macronutrientes presentes nos efluentes domésticos, destaca-se o nitrogênio (N) e o Fósforo (P), sendo ambos, os principais responsáveis por impactos em ambientes aquáticos, especialmente pelo processo de eutrofização (Correa et al., 2018). No Brasil, a maior parte das estações de tratamento de esgoto é projetada prioritariamente para a remoção de matéria orgânica, apresentando limitada eficiência na remoção de nutrientes como o N e P. Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento e a investigação de novas tecnologias capazes de promover a remoção simultânea de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo.

Para a remoção de N em processos biológicos convencionalmente são utilizados reatores distintos para a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação (Leick et al., 2017). Esses sistemas apresentam maior eficácia e menor custo em comparação aos métodos físicos e químicos. Nesse sistema, o N presente em compostos orgânicos é hidrolisado e convertido em amônia (NH_4^+). Para que o nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) seja posteriormente transformado em gás nitrogênio (N_2) são necessárias condições aeróbias e anóxicas, que correspondem aos processos de nitrificação e desnitrificação (Silva, 2016).

A remoção biológica de nitrogênio ocorre por meio da nitrificação e desnitrificação, processos que requerem condições aeróbias e anóxicas. Na nitrificação, o NH_4^+ é oxidado a NO_2^- e, posteriormente, a NO_3^- por bactérias autotróficas, enquanto na desnitrificação bactérias heterotróficas convertem o NO_3^- em N_2 em ambiente anóxico (Souza, 2020; Barbosa, 2023). Já o fósforo, pode ser removido por meio de processos físico-químicos ou por meio de remoção biológica aprimorada (EBPR), que depende da alternância entre condições anaeróbias e aeróbias para o desenvolvimento de microrganismos acumuladores de polifosfato (PAOs), sendo altamente sensível às condições operacionais e a competição com outros grupos microbianos. Em condições controladas, sistemas biológicos avançados podem atingir elevadas eficiências de remoção de fósforo sem a necessidade de adição química (Yu et al., 2024). Com o objetivo de reduzir custos operacionais, têm sido desenvolvidos sistemas que promovem esses processos simultaneamente em um único reator, utilizando aeração intermitente, o que favorece o equilíbrio do pH e reduz a necessidade de adição de fontes externas de carbono (Correa et al., 2016).

O Structured Bed Reactor with Intermittent Aeration (SBRIA), desenvolvido por Moura, Damianovic e Foresti (2012) possibilita a ocorrência simultânea dos processos de nitrificação e desnitrificação, apresentando elevada eficiência de remoção de N, com valores entre 82% e 89% com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 12 horas. Para o adequado funcionamento do sistema, é necessária a adição de um meio de suporte físico, constituído por espumas de poliuretano, que favorecem o crescimento da biomassa para formação de biofilme.

Bactérias aeróbias se desenvolvem na superfície externa da espuma, onde há maior disponibilidade de oxigênio. Por outro lado, no interior poroso do material suporte desenvolvem-se bactérias anóxicas, uma vez que a limitação de oxigênio estabelece condições favoráveis ao seu desenvolvimento, principalmente durante os intervalos sem aeração (Oliveira, et al., 2023). Em estudo

posterior, Moura et al. (2018) operou o sistema com efluente real, e obteve eficiência de remoção semelhante à observada por Moura, Damianovic e Foresti (2012), que utilizou efluente sintético, reforçando o bom desempenho do reator.

Diante da eficiência e do desempenho do SBRIA em escala laboratorial, Barbosa (2023) conduziu um estudo pioneiro com a implantação do sistema em escala piloto, atingindo eficiências de remoção de N de 57% e demonstrou que a ampliação da escala influenciou a qualidade do efluente final, evidenciando a necessidade de um decantador secundário. Ainda assim, a produção de lodo observada foi inferior à reportada em tratamentos convencionais de efluentes. Entre os parâmetros operacionais, a aeração é o fator determinante para o consumo energético e para a remoção de N. Em escala piloto, no entanto, parâmetros como taxa de recirculação, aeração intermitente e fluxo de ar não foram estabelecidos na literatura (Oliveira et al., 2020).

O estudo dessas variáveis é de suma importância para que o sistema seja economicamente viável e eficiente na remoção de matéria orgânica e N (Oliveira et al., 2022). Portanto, a realização de estudos com diferentes condições relacionadas ao fluxo de ar, período aerado e não aerado torna-se imprescindível em escala piloto (Azevedo et al., 2022). Desse modo, este estudo tem como objetivo otimizar os parâmetros operacionais de um reator SBRIA em escala piloto, com ênfase em diferentes fluxos de ar e regimes de aeração intermitente, a fim de avaliar o desempenho do sistema na remoção de N e matéria orgânica.

Metodologia

O presente estudo foi conduzido por um período de 345 dias, em escala piloto utilizando um reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA), representado na Figura 1, construído em fibra de vidro, com formato cilíndrico, diâmetro de 1,8 m e altura total de 5,1 m, sendo 4,9 m de altura útil. O volume total do reator é de 12,3 m³, com volume útil de 8,4 m³, resultando em porosidade do leito de 66%. A alimentação do esgoto bruto ocorre na base do reator, enquanto a saída do efluente tratado está localizada no topo, a 4,7 m do ponto de entrada (Figura 1). O TDH adotado no reator foi de 10 horas.

No interior do reator estão inseridos quatro módulos com 1 m de altura, compostos por estruturas prismáticas de poliuretano com seção transversal de 30 × 30 mm, fixadas em estrutura de fibra de vidro e polipropileno. O sistema de aeração é composto por 12 difusores de oxigênio da marca B&FDIAS, modelo Bolha Fina Circular HD, com 270 mm de diâmetro, dotados de membrana flexível constituída por EPDM, silicone e teflon, e corpo em polipropileno reforçado com fibras. Os difusores operam com vazão de ar entre 40 e 63 m³/min, com conexão de entrada de ¾ NPT. A alimentação do reator é realizada por bomba submersível da marca Sulzer, enquanto a aeração é promovida por soprador da marca nexco. O sistema encontra-se instalado na Estação de Tratamento de Esgoto 3, do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), no município de Poços de Caldas.

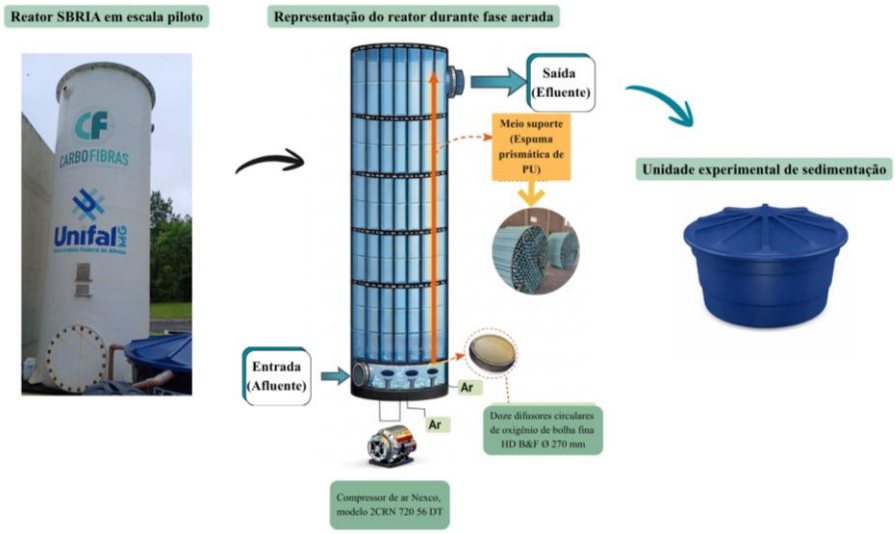


Figura 1- Imagem real do reator SBRIA em escala piloto e esquema representativo do seu interior durante etapa aerada do ciclo operacional, incluindo unidade experimental de sedimentação.
Fonte: Autor (2026)

Ao longo da operação do reator, observou-se a necessidade de inserção de uma unidade experimental de sedimentação (Figura 1) devido ao arraste de sólidos e biomassa no efluente. Com isso, foi inserido um tanque de polietileno ao sistema, operando como uma unidade de sedimentação, com o intuito de reter os sólidos do sistema e melhorar a qualidade do efluente final. O sistema foi operado em 3 Fases distintas, as quais foram avaliadas variáveis operacionais como tempo de aeração e vazão de ar. O ciclo de aeração e não aeração foi definido em 3 horas. Ou seja, em uma fase com 2 horas de aeração, o sistema permanecia 1 hora sem aeração.

Na Fase I foi adotado tempo de aeração de 2 h e vazão de ar de 45 m³ min⁻¹. Na Fase II, o tempo de aeração foi reduzido para 1,75 h, com aumento da vazão de ar para 52,5 m³ min⁻¹. Já na Fase III, o tempo de aeração foi mantido em 1,75 h, com elevação da vazão de ar para 63 m³ min⁻¹.

As amostras de afluente e efluente do reator e do efluente do decantador foram coletadas duas vezes na semana para a realização das análises físico-químicas, adotando-se como referência o Standard Methods for the Examination of Water and

Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2017). Os parâmetros monitorados incluíram Demanda Química de Oxigênio (5220 D), Demanda Bioquímica de Oxigênio (SH-812+BOD intelligent measuring instrument), pH (4500-H^+ B), nitrogênio amoniacal (4500 B), fósforo total (LPB, 2021), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) (ECOCLASS, 2022) e sólidos totais (2540 B), voláteis e fixos (2540 E). As análises de nitrito foram inicialmente realizadas conforme o método descrito por García-Robledo et al. (2014), enquanto o nitrato foi determinado pelo método do ácido cromotrópico. Posteriormente, ambos os parâmetros passaram a ser determinados por cromatografia iônica (SYKAM-S155), com utilização de curva de calibração a partir de padrão misto.

Os dados experimentais foram expressos como média ± desvio padrão. Para a comparação das Fases operacionais, em cada parâmetro monitorado, foi realizado o teste de Kruskal–Wallis, seguido de teste de comparações múltiplas, considerando nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Diferenças estatísticas entre os grupos foram indicadas por letras distintas.

Resultados e Discussão

A caracterização do afluente (esgoto real) e efluente ao longo das Fases operacionais está apresentada na Tabela 1, assim como as eficiências de remoção seguem na Tabela 2.

Parâmetro	Unidade	Afl. Fase I	Efl. Fase I	Afl.Fase II	Efl.Fase II	Afl. Fase III	Efl.Fase III
pH	-	7,2 ± 0,4	6,9±0,4	7,1±0,3	6,5±0,6	6,7±0,3	6,5±0,3
Alcalinidade	mg $CaCO_3$/L	189,3 ± 84,8	65,6±32,0	165,1±53,1	37,4±23,1	113,9±37,7	24,2±9,9
DQO não filtrada	mg/L	540,9 ± 286,9	184,5±138,7	288,7±146,1	63,5±54,8	218,2±105,8	73,3±51,5
DQO filtrada	mg/L	249,3± 132,8	55,2±29,6	166,6±95,5	32,1±18,8	86,2±51,9	28,9±14,4
DBO	mg/L	221,8± 104,8	56,8±28,9	135,5±77,6	20,6±15,7	87,6±43,9	5,3±4,3
N-NH_4^+	mg/L	35,9± 13,8	6,5±6,9	25,1±11,7	1,8±1,7	9,9±6,6	1,2±2,1
N-NTK	mgN/L	57,6± 28,8	17,4±11,2	48,1±17,9	6,8±6,5	29,0±11,9	6,5±5,8
N-N.O	mg/L	23,4±25,7	10,9±9,4	23,1±10,2	5,2±5,5	15,6±12	5,3±5,6
N-NO_2^-	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
P-PO4	mg/L	1,2±0,8	0,1±0,1	1,7±1,5	0,01±0,02	1,8±1,1	1,4±0,5
N-NO_3^-	mg/L	<LQ	3,0±1,9	<LQ	4,5±3,3	<LQ	8,6±5,8
Sólidos totais	g/L	0,8± 1,6	0,3±0,1	0,4±0,1	0,2±0,1	0,2±0,1	0,2±0,1

Tabela 1 - Caracterização do Afluente e Efluente do reator por fase operacional.
Fonte: Autor, 2026.

% Remoção	Fase I S.R	Fase I S.D	Fase II S.R	Fase II S.D	Fase III S.R	Fase III S.D
DQO não filtrada	64±21	81±14	71±29	86±20	64±27	76±23
DQO Filtrada	75±14	74±13	75±14	76±21	63±26	54±38
DBO	72±15	82±38	80±24	87±15	92±14	95±4
N total	64±13	73±12	70±26	73±20	52±28	60±20
Fósforo	82±25	61±34	96±6	100±0	32±24	46±32
Nitrificação	72±16	80±13	83±22	86±14	78±22	89±10
Desnitrificação	81±21	91±8	79±28	84±14	51±33	66±22

Tabela 2 - Porcentagem média de remoção da saída do reator (S.R) e saída do decantador (S.D) em relação ao afluente de entrada.
Fonte: Autor, 2026.

Ao avaliar os parâmetros DQO e DBO, observa-se que o reator foi eficiente na remoção da matéria orgânica , com desempenho progressivamente superior ao longo das Fases, atingindo 95±4% de remoção de DBO na saída do decantador na Fase III. Destaca-se também a importância da unidade de decantação, que promoveu melhorias significativas nas eficiências de remoção de DQO não filtrada e DBO, principalmente na Fase I. Esse comportamento também é evidenciado na Figura 2, que demonstra como a remoção de sólidos no decantador contribuiu para a redução da DQO não filtrada final. Essa melhora após a unidade de decantação também foi observada por Valim et al. (2026), que, ao utilizar um reator SBRIA em escala piloto tratando efluente doméstico com contribuições industriais, verificaram o aumento da eficiência de remoção de DQO de 57% para 87% após ensaio de decantação em bancada, reforçando a importância dessa unidade para a estabilidade operacional e o atendimento aos padrões de lançamento de esgotos.

A partir das análises da Figura 3-a e Figura 3-b, referentes ao perfil de DQO e DBO, os resultados indicam uma evolução em relação a eficiência do reator ao longo das fases, com a Fase I demonstrando instabilidade e a Fase III maior

robustez. Na Fase I, os dados apresentavam elevada dispersão, porém com valor médio abaixo dos limites estabelecidos pela DN COPAM/CERH-MG nº 08/2022 (180 mg/L) e pelo Decreto Estadual de SP nº 8.468/1976 (60 mg/L) antes da decantação. Com o avanço das fases, é possível verificar uma redução progressiva da carga orgânica, com o achatamento dos boxplots.

Dessa maneira, é possível verificar que a remoção de DBO é superior à de DQO, fenômeno também observado por Barbosa, Giordani e Moura (2024), e que ocorre devido a facilidade de assimilação da fração biodegradável do efluente pelo biofilme estruturado, enquanto a DQO pode possuir frações recalcitrantes que são mais difíceis de serem removidas no sistema. Os dados das figuras destacam a importância do decantador como ferramenta para o atendimento aos padrões de lançamento. Na fase III o sistema apresenta excelente remoção de DQO e DBO após decantador, mantendo-se rigorosamente abaixo dos limites estabelecidos pelas legislações apresentadas, chegando a valores residuais mínimos, o que consolida a eficácia do sistema e garante a segurança ambiental do efluente para descarte em corpo receptor.

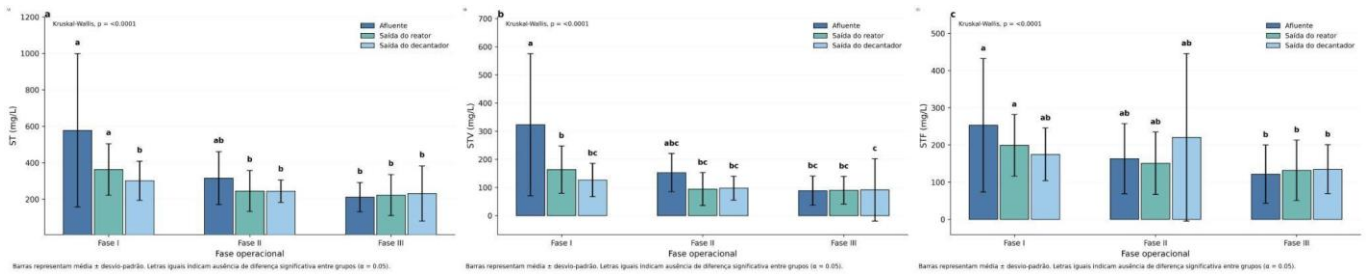


Figura 2 - Concentrações médias de sólidos no afluente, saída do reator e saída do decantador durante o experimento: (a) Sólidos Totais; (b) Sólidos Totais Voláteis e (c) Sólidos Totais Fixos.
Fonte: Autor (2026).

Ao avaliar a eficiência de remoção de nitrogênio total nota-se bom desempenho do sistema, com eficiências variando entre 52% (Fase III) e 73% (Fases I e II) ao longo das fases. As maiores remoções foram observadas nas Fases I e II, enquanto a Fase III apresentou redução na eficiência. A contribuição do decantador nesta fase operacional é importante, uma vez que as eficiências foram maiores no efluente após o decantador, atingindo valores superiores aos estudos de Barbosa et al. (2024) e Valim et al. (2026), demonstrando avanços obtidos com o presente estudo.

As eficiências de remoção de NT das Fases 1 e 2 foram próximas aos estudos de Oliveira et al. (2023) e Souza et al. (2021), que alcançou cerca de 80% e 87,2±0,9% de remoção de NT para efluente sintético respectivamente, obtendo resultados semelhantes ao observado em escala laboratorial. Já na Fase III houve uma queda de remoção, sendo condizente com os dados reportados por Leick et al. (2017), com remoção de cerca de 55% de NT para esgoto real em escala laboratorial e por Barbosa, Giordani e Moura (2024), alcançaram a remoção de 57% de NT para tratamento em escala piloto com esgoto real.

Em relação à dinâmica das frações nitrogenadas durante as Fases é possível observar na Figura 3-c e Figura 3-d um aprimoramento das atividades microbiológicas nitrificadoras. Durante a fase I as concentrações de NH_4^+ apresentaram considerável dispersão e a presença de outliers, referente a um período de adaptação da biomassa e da instabilidade pontuais do afluente. Entretanto, nas demais fases o sistema atingiu estabilidade, alcançando baixos níveis de $N\text{-}NH_4^+$, tanto para a saída do reator quanto para a saída do decantador, que não apresentaram diferenças significativas entre si ($p < 0,05$). Essa transição entre fases confirma que o reator foi otimizado para a oxidação de $N\text{-}NH_4^+$ com o aumento da vazão de aeração

Embora a Resolução CONAMA 430/2011 estabeleça limites para concentração de nitrogênio amoniacal de 20 mg/L, os resultados evidenciam que o sistema é eficiente em manter as concentrações médias de NT dentro dos limites da legislação. O decantador mostrou-se eficiente para garantir a homogeneidade e qualidade do efluente. Tal comportamento ocorreu majoritariamente na Fase III, que apesar de ter tido a menor eficiência de remoção de NT (60±20%), atendeu às exigências da legislação, o que reforça a confiabilidade do sistema.

Quando comparada a composição do N proveniente do efluente do reator e do decantador (Figura 4-a e Figura 4-b), nota-se o papel determinante do decantador na estabilização da qualidade do efluente final. Apesar do N-total do efluente apresentar variação significativa entre as Fases, ambas apresentaram médias inferiores a concentração limite estabelecida pela CONAMA 430/2011. Já o efluente decantado manteve-se dentro do limite estabelecido em todas as fases e não apresentou diferença estatística ($p<0,05$), confirmando que o decantador agiu como um fator de segurança, amortecendo os picos de matéria nitrogenada provenientes do reator, especialmente entre as Fases I e II.

Além da estabilização citada, observa-se uma evolução similar em ambas as figuras do efluente decantado (Figura 4-a e Figura 4-b), com a redução da fração amoniacal e do nitrito, e o aumento de nitrato, gerado pela queda na eficiência de desnitrificação no decorrer das Fases, o que consequentemente afeta a eficiência do reator. Apesar do mesmo tempo de aeração, essa alteração na eficiência entre as Fases pode residir na mudança de vazão de ar, que foi de 52,5 $m^3\ min^{-1}$ na Fase II, para 63 $m^3\ min^{-1}$ na Fase III, o que aumenta a concentração de oxigênio dissolvido (OD) no sistema, favorecendo a nitrificação completa, realizada por microrganismos aeróbios, e inibindo a desnitrificação, que requer um ambiente anóxico para sua atividade. Assim, apesar da queda de desnitrificação entre a Fase I e III, o que desfavorece a remoção de N-total, a nitrificação completa na Fase III, aliada ao decantador, reduziu a concentração do N orgânico no efluente e garantiu um efluente enquadrado nos padrões de lançamento.

A nitrificação apresentou eficiências elevadas em todas as Fases, com valores médios de 80±13% na Fase I, 86±14% na Fase II e 89±10% na Fase III, evidenciando tendência de aumento ao longo da operação e atingindo seu melhor desempenho na Fase III. Esse resultado indica condições favoráveis à oxidação da amônia, associadas à adequada disponibilidade de oxigênio durante os períodos aerados. Esse aumento de desempenho foi concomitante à elevação da vazão de ar aplicada nas Fases operacionais, atingindo seu maior valor na Fase III. Portanto, o fluxo de ar (45 $m^3.min^{-1}$ na Fase I e 63 $m^3.min^{-1}$ na Fase III) exerceu maior influência sobre a nitrificação do que o tempo de aeração empregado (reduzido de 2 horas na Fase I para 1,75 h na Fase III).

Esse processo reflete o consumo da alcalinidade, que foi na fase III de 113,91±37,72 mg $CaCO_3$/L do afluente para 24,21±9,95 mg $CaCO_3$/L do efluente do reator. Esse maior consumo alcalinidade é devido a demanda estequiométrica dos microrganismos nitrificantes para a oxidação do NH_4^+, demonstrando excelente capacidade de conversão do nitrogênio orgânico e amoniacal. A estabilidade observada na nitrificação ao longo das fases corrobora com os dados obtidos por Souza et al. (2022), que demonstraram que esses processos são mais resilientes a variações e ciclos operacionais do reator.

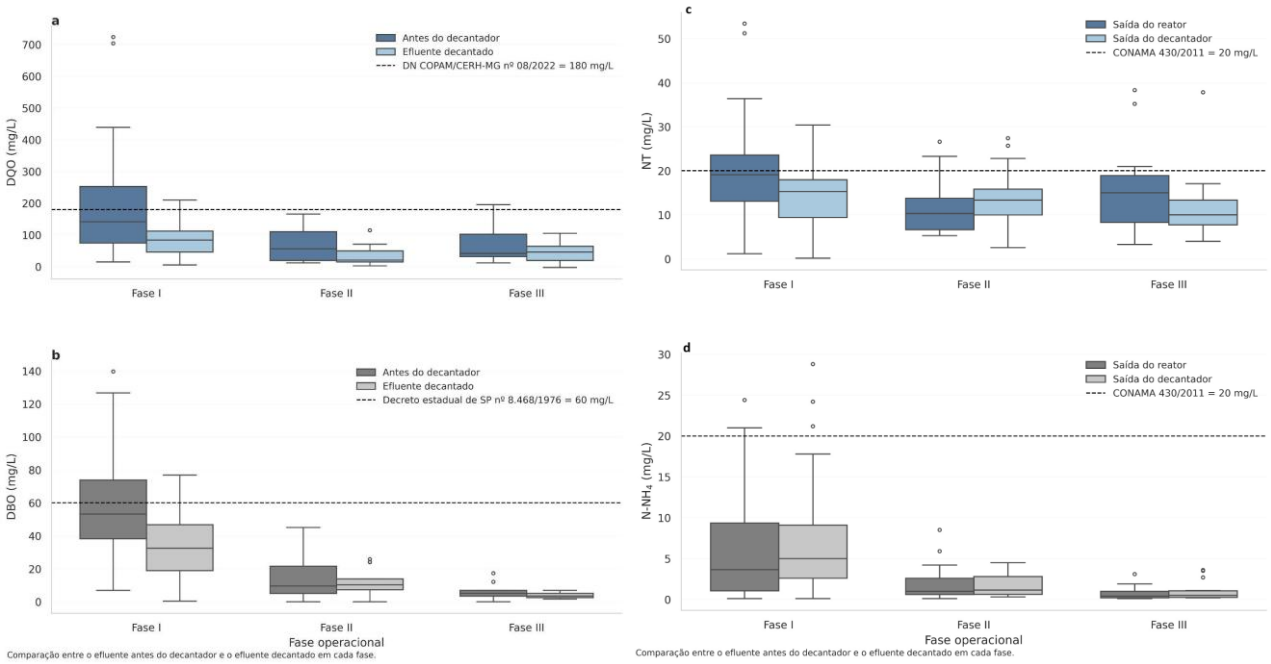


Figura 3 - Desempenho do reator SBRIA quanto à remoção de matéria orgânica e nitrogênio nas diferentes Fases operacionais: (a) DQO; (b) DBO; (c) Nitrogênio Total (NT); e (d) Nitrogênio Amoniacal
Fonte: Autor (2026).

Em contrapartida, a Tabela 2 revela um declínio na eficiência de desnitrificação, sendo de 91±8% na fase I para 66±22% na fase III para o efluente da saída do reator. A partir do monitoramento realizado em tempo real, Oliveira et al. (2023) concluiram que a presença de oxigênio residual (0,2 a 0,5 mg/L) faz com que o potencial de oxirredução (ORP) não caia drasticamente, portanto, a desnitrificação somente tem início quando o ambiente torna-se totalmente anóxico. Outro fator comprovado estatisticamente pelo autor refere-se ao baixo consumo de nitrato em fases com maior residual de oxigênio. Portanto, os microrganismos heterotróficos desnitrificantes do reator SBRIA foram limitados pela elevação do fluxo de ar ao longo das Fases operacionais, o que afetou também a eficiência final de remoção de NT. Esses resultados reforçam a importância do controle dos parâmetros operacionais para otimizar o desempenho do sistema, especialmente na remoção de matéria orgânica e nitrogênio, e na estabilidade do processo em escala piloto.

Conforme discutido por Oliveira et al. (2023), o espessamento do biofilme no material suporte pode dificultar a difusão do nitrato para as zonas anóxicas das espumas, além de tempo insuficiente de anoxia para a redução do nitrogênio oxidado, favorece a nitrificação quase completa e compromete a etapa de desnitrificação. Souza et al. (2022) concluiram que a desnitrificação é uma etapa limitante do sistema, que requer controle rigoroso de tempo de aeração, disponibilidade de carbono orgânico e condição de difusão no interior meio suporte.

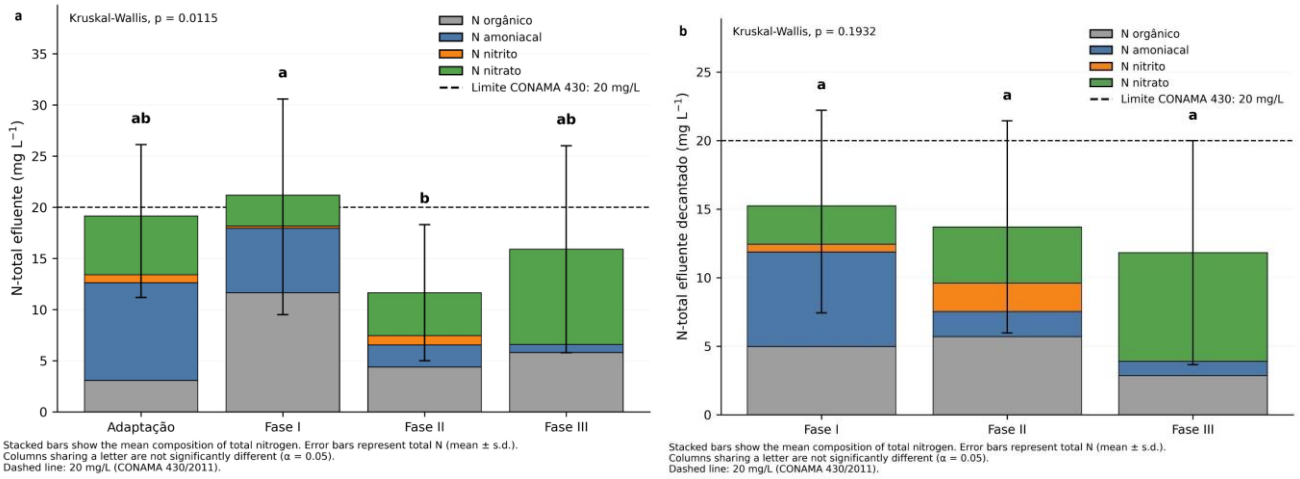


Figura 4 - Perfil de especiação do nitrogênio total no efluente do reator SBRIA e efluente decantado: (a) Saída do reator; (b) Saída do decantador.
Fonte: Autor (2026).

Outro parâmetro analisado foi o P-total (Figura 5), que apresenta um comportamento distinto entre as Fases operacionais e dos demais parâmetros, o que reflete as capacidades de consumo e retenção do nutriente no sistema. Nas Fases I e II as concentrações no efluente e do decantador mantiveram-se baixos, com concentrações próximas a zero, mesmo com elevada concentração e variabilidade no afluente, demonstrando a estabilidade e resiliência do sistema. Destaca-se a fase II, com maior eficiência de remoção no efluente proveniente do decantador (100%), o que sugere condições operacionais favoráveis à remoção de P. Yuan et al. (2020) alcançaram para um reator de bancada 94,3% de remoção máxima de P em efluente real, com auxílio dos PAOs enriquecidos no reator, com valores próximos aos obtidos na Fase II. Essa comparação sugere que a elevada remoção deste nutriente no reator está associada à atuação destes microrganismos, característicos de sistemas com EBPR, que são favorecidos pelas condições adequadas de alternância em ambientes anaeróbios e aeróbios e disponibilidade de carbono.

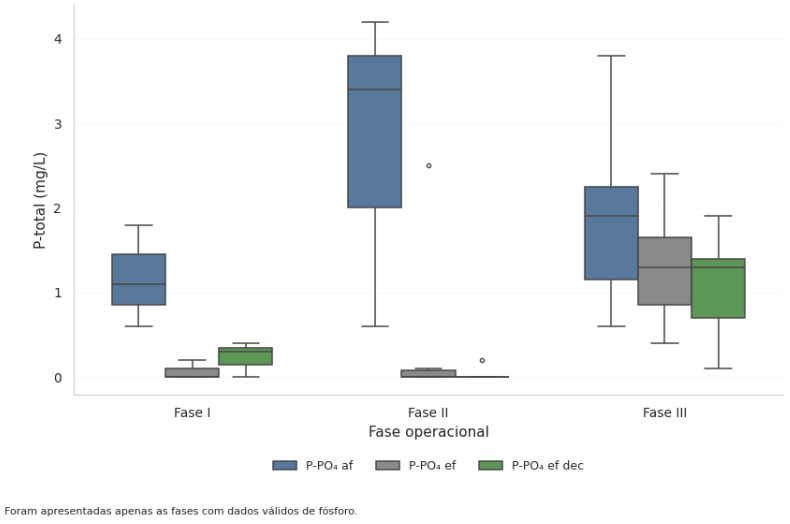


Figura 5 - Concentrações de fósforo total (P-total) no afluente, efluente bruto do reator e efluente decantado durante as Fases operacionais.
Fonte: Autor (2026).

É importante destacar que na fase III há uma mudança no perfil de fósforo, com crescente aumento da concentração no efluente, quando comparado ao afluente. A eficiência de remoção de P-PO4 não seguiu a mesma tendência de melhoria como nos parâmetros de DQO e N, mas acompanhou a queda da eficiência da desnitrificação para a Fase III (32±24%). Apesar de pequena amortização, o decantador auxiliou na redução desse nutriente pela remoção dos sólidos suspensos. Na fase III o efluente apresentou alta concentração em comparação a fase I e II, mesmo com o tempo de aeração igual ao da Fase II (1,75 horas). A alteração na eficiência entre as Fases pode estar relacionada ao aumento da vazão de ar, que foi de 52,5 $m^3\ min^{-1}$ na Fase II, para 63 $m^3\ min^{-1}$ na Fase III.

A redução da eficiência de desnitrificação na Fase III, evidenciada pelo aumento do nitrato residual, sugere que o tempo de permanência em condição anóxica foi limitada no interior do reator. Esse fenômeno pode afetar diretamente a remoção de

fósforo, visto que, conforme discutido por Luo et al. (2022), para o desenvolvimento e manutenção dos PAOs são necessários períodos totalmente anaeróbios. Além disso, conforme Luo et al. (2024), o nitrato proveniente da desnitrificação incompleta age como um aceptor de elétrons preferencial, desviando o fluxo de carbono orgânico para a desnitrificação e inibindo o processo de libertação de fósforo intracelular pelos PAOs. Isso impede a síntese de reservas internas de carbono, necessárias para absorção em excesso durante a aeração, essa vulnerabilidade na Fase III resultou em excesso de nitrato, que criou uma barreira metabólica para o processo EBPR.

De maneira geral os resultados obtidos demonstram que o reator SBRIA em escala piloto é influenciado pelas variáveis operacionais empregadas, como tempo de aeração e vazão de ar, que modulam as condições redox do sistema. Dessa forma, o controle operacional permite a otimização dos processos biológicos, fazendo com que essa tecnologia seja capaz de promover de modo eficiente a remoção simultânea de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo em um único sistema. Além disso, a estabilidade do reator frente às flutuações de carga orgânica, sugere uma boa robustez do sistema. A partir dos resultados obtidos, evidencia-se o potencial do reator SBRIA como uma alternativa tecnológica promissora, devido a sua viabilidade e por ser compacta para o tratamento de efluentes sanitários que demandam elevada eficiência de remoção, com aplicabilidade em sistemas de tratamento descentralizado.

Comentários finais

O reator SBRIA em escala piloto demonstrou ser uma solução tecnicamente viável para o tratamento de esgoto doméstico em todas as Fases estudadas, atingindo eficiências elevadas de remoção de NT e DBO em todas as Fases operacionais estudadas. Apesar da redução na eficiência de desnitrificação (51±33) e na remoção de fósforo (32±24) na Fase III, o efluente após o decantador apresentou elevada eficiência de remoção de NT (73±20), DQO (86±20) e DBO (95±4), que permitiu atender aos padrões regulamentadores. Isso demonstra que o reator apresentou eficaz remoção simultânea de matéria orgânica e nutrientes, sendo uma tecnologia de elevado desempenho e sustentabilidade operacional.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à CAPES pela concessão da bolsa de estudos, a UNIFAL pelo apoio institucional e técnico para desenvolvimento da pesquisa, a CARBOFIBRAS pela parceria institucional e ao DMAE pelo suporte operacional recebido durante a execução do estudo.

Referências Bibliográficas

APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington, D.C.: APHA, 2017.

AZEVEDO, C. S; et al. Aeration and non-aeration cycles (AE/NA) time: influence in combined organic matter and nitrogen removal and features of biofilm. Environmental Technology, v. 43, n. 16, p.2443-2456, 2022. https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1882583.

BARBOSA, T. A. Remoção de nitrogênio e matéria orgânica em um reator de leito estruturado em escala piloto, submetido à aeração intermitente, no tratamento de esgoto sanitário. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

BARBOSA, T; GIORDANI, A. & MOURA, R.B. Um estudo em escala piloto de um novo sistema para remoção simultânea de nitrogênio e carbono: avanço tecnológico de um reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA) no tratamento real de esgoto doméstico. Environ Sci Pollut Res, v. 31 , 12591–12596, 2024. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31675-2.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional – Cidades. Painel do SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es. Acesso em: 10 jul. 2025.

CORREA, C. Z; et al. Comportamento da remoção de matéria orgânica (DQO) e nitrogênio amoniacal em um reator de leito estruturado operado sob aeração intermitente. Scientia Plena, v. 12, n.3, 2016. https://doi.org/10.14808/sci.plena.2016.034201.

CORREA, C. Z; et al. Nitrification/denitrification of real municipal wastewater in an intermittently aerated structured bed reactor. Journal of Water Process Engineering, v. 23, p. 134-141, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.013.

HUYNH, V.V; et al. Dynamic of microbial community in simultaneous nitrification and denitrification process: A review. Bioresource Technology Reports, 2023. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101415.

LEICK, S. A; et al. EFFECT OF AERATION AND RECIRCULATION IN THE REMOVAL OF NITROGEN AND CHEMICAL OXYGEN DEMAND FROM SANITARY SEWAGE IN A STRUCTURED BED REACTOR. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, p.1236-1243, 2017. http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-

Eng.Agric.v37n6p1236-1243/2017.

LÚCIO, D. S. G; RIBEIRO, R; TOMMASO, G. Simultaneous removal of organic matter and nitrogen in a structured-bed hybrid baffled reactor (SBHBR) under low COD/TN ratio: Evaluation of operational strategies. Journal of Water Process Engineering, v. 75. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107933.

LUO, H; et al. The Feasibility of Maintaining Biological Phosphorus Removal in A-Stage via the Short Sludge Retention Time Approach: System Performance, Functional Genus Abundance, and Methanogenic Potential. International Journal of Environmental Research and Public Health, v.19, 2022. https://doi.org/10.3390/ijerph19095494.

LUO, H; et al. Integrating enhanced biological phosphorus removal in adsorption-stage to treat real domestic sewage. Bioresource Technology, v.411, 2024. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131334.

MOURA, R. B; DAMIANOVIC, M. H. R. Z; FORESTI, E. Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration. Journal of Environmental Management, v. 98, 2012. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.009.

MOURA, R. B; et al. Carbon-nitrogen removal in a structured-bed reactor (SBRRIA) treating sewage: Operating conditions and metabolic perspectives. Journal of Environmental Management, v. 224, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.014.

OLIVEIRA, E. P; et al. Effect of air flow, intermittent aeration time and recirculation ratio in the hydrodynamic behavior of a structured bed reactor. Chemical Engineering Journal, v. 394, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124988.

OLIVEIRA, E. P; et al. Biofilm stratification and autotrophic-heterotrophic interactions in a structured bed reactor (SBRIA) for carbon and nitrogen removal. Bioresource Technology, v. 372, 2023. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128639.

OLIVEIRA, E. P; et al. Optimization of airflow and aeration cycles in a new structured bed reactor configuration for carbon and nitrogen removal. Environmental Technology, v. 43, n. 16, 2022. 10.1080/09593330.2021.1887370.

SILVA, Bruno Garcia. Efeitos do tempo de aeração no desempenho de reator de leito estruturado e aeração intermitente na remoção de matéria orgânica e nitrogênio de efluente de reator UASB.2016. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos. USP, 2016.

SOUZA, J. V. R. Remoção Simultânea de Matéria Orgânica e Nitrogênio em um Reator de Leito Estruturado Submetido à Aeração Intermitente: Efeito do Diâmetro do Material Suporte e da Porosidade do Meio. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2020, pag 57-58.

SOUZA, J.V.R, et al. Simultaneous carbon and nitrogen removal in a structured bed reactor subjected to intermittent aeration (SBRIA): effect of support material diameter and bed porosity. J Chem Technol Biotechnol, 97, 1436–1445, 2022. https://doi.org/10.1002/jctb.6936.

UN - United Nations. The human right to water and sanitation, RES/64/292, 2010. Disponível em: https://undocs.org/A/RES/64/292. Acesso em: 10 jul. 2025.

VALIM, A. C. S; et al. Pilot-scale structured bed reactor with intermittent aeration: a novel strategy for simultaneous nitrogen and carbon removal from domestic sewage with industrial contribution. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2026. https://doi.org/10.1007/s43153-026-00661-9.

YU, G; et al. Synergistic phosphorus removal mechanism of Tetrasphaera enrichment in a micro-pressure swirl reactor. Clean Water, v. 7, p. 89, 2024. https://doi.org/10.1038/s41545-024-00389-4.

YUAN, C; et al. Advanced nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater via simultaneous enhanced biological phosphorus removal and semi-nitritation (EBPR-SN) combined with anammox. Bioprocess and Biosystems Engineering, v.43, p.2039–2052, 2020. https://doi.org/10.1007/s00449-020-02392-8.

BIODEGRADABILIDADE DE EFLUENTES VINÍCOLAS GERADOS POR ELETRODIÁLISE: PERSPECTIVAS DE ECONOMIA CIRCULAR

1 Juliana Fernandes Farias
1 Universidade Veiga de Almeida (UVA), e-mail: farias.juliana@gmail.com

Palavras-chave: Efluentes vinícolas; Eletrodiálise; Economia circular.

Resumo

A indústria vinícola brasileira, em notável expansão e diversificação geográfica, configura-se como um setor agroindustrial estratégico, entretanto, enfrenta o duplo desafio de crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. O processo produtivo do vinho é intensivo no consumo de água e gera efluentes com características complexas: elevada carga orgânica (DQO tipicamente entre 2.000 e 80.000 $mg.L^{-1}$), marcada variabilidade sazonal, baixa concentração de nutrientes e presença de compostos potencialmente recalcitrantes. O manejo adequado desses efluentes representa, portanto, um desafio técnico-ambiental significativo para o setor. Este trabalho realiza uma análise crítica e prospectiva do estado da pesquisa sobre o tratamento de águas residuais vinícolas no Brasil, utilizando como base um estudo de caso experimental detalhado. O estudo investigou especificamente a biodegradabilidade do efluente da estabilização tartárica por eletrodiálise (EW), um fluxo específico, pouco estudado e caracterizado por alta condutividade e acidez. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica do tratamento aeróbio para este efluente, com o reator de microbolhas (AMBB) alcançando eficiências de remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) superiores a 99% em operação contínua, e apresentando uma cinética de biodegradação de primeira ordem com constante (k) entre 0,308 e 0,319 d^{-1}. A análise crítica subsequente, baseada em um levantamento narrativo da literatura nacional e internacional, revela um profundo descompasso entre o conhecimento técnico gerado em bancada e sua aplicação prática no setor. São identificadas três lacunas estruturais principais: (i) a escassez de estudos em escala real e de avaliações econômico-ambientais robustas (ATE e ACV); (ii) a ausência de uma regulamentação específica que considere a sazonalidade extrema da produção vitivinícola; e (iii) a falta de um ecossistema de apoio (incentivos, financiamento, capacitação) que estimule a inovação e a transição para a circularidade. Com base nesse diagnóstico, o artigo apresenta a integração de processos e princípios da economia circular. Defende-se a tese de que a eletrodiálise, tecnologia já utilizada para estabilização tartárica, pode ser reconfigurada como o núcleo de uma plataforma de recuperação de valor. Nesta visão, o processo é acoplado a sistemas biológicos avançados, visando não apenas ao tratamento convencional, mas ao reuso seguro de água (irrigação, lavagem), e à valorização econômica de subprodutos, como o ácido tartárico. Conclui-se que a transição para uma vitivinicultura verdadeiramente sustentável no Brasil requer uma abordagem dupla e integrada. Para além da contínua validação técnica de soluções, é indispensável a criação de um ambiente próprio, que inclua a formulação de políticas públicas inteligentes e setorializadas, o desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão acessíveis e a promoção de modelos de negócio inovadores e colaborativos. Tais modelos devem ser adaptados à realidade predominante do setor, composto majoritariamente por vinícolas de pequeno e médio porte, distribuindo os riscos e os benefícios da adoção de práticas circulares, e garantindo a resiliência ambiental e econômica da cadeia produtiva.

Introdução

A indústria do vinho constitui uma atividade agroindustrial de profunda relevância econômica, cultural e social, com raízes históricas que remontam a milênios. Entretanto, na contemporaneidade, essa tradição convive com exigências ambientais cada vez mais rigorosas. A vitivinicultura é reconhecidamente uma atividade intensiva no uso de água, com uma pegada hídrica significativa. Estudos indicam que, considerando toda a cadeia produtiva – desde a irrigação da vinha até as operações de limpeza e resfriamento na adega –, podem ser necessários até 960 litros de água para produzir um único litro de vinho (Hoekstra & Chapagain, 2007). No Brasil, este cenário ganha contornos específicos e urgentes. O setor vitivinícola nacional nas últimas décadas experimentou uma fase de franca expansão e notável diversificação geográfica, afastando-se do seu polo histórico na Serra Gaúcha para abranger regiões como o Vale do São Francisco, o planalto catarinense e áreas do Sudeste. Este crescimento, embora positivo do ponto de vista econômico, intensifica exponencialmente a pressão sobre os recursos hídricos, muitas vezes escassos ou sujeitos a conflitos de uso, e evidencia a necessidade crítica de soluções eficazes e sustentáveis para o manejo dos efluentes gerados.

O efluente gerado, também denominado águas residuais vinícolas (ARV) não são um subproduto homogêneo. Sua produção é inerentemente sazonal, com picos de volume e carga poluidora concentrados no período da vindima e das trasfegas. Quimicamente, apresentam um perfil complexo e desafiador: cargas orgânicas elevadíssimas, expressas por Demanda Química de Oxigênio (DQO) que podem variar de 2.000 a mais de 80.000 $mg.L^{-1}$; baixas concentrações de nutrientes essenciais (nitrogênio e fósforo) para o tratamento biológico; e a presença de compostos potencialmente recalcitrantes, como polifenóis, taninos e corantes, que podem inibir processos biológicos (Andreottola et al., 2009; Jorge et al., 2009). Este perfil poluidor, comparável a 10 ou até 100 vezes o de efluentes domésticos, pode sobrecarregar estações de tratamento municipais ou, se lançado in natura, causar sérios impactos aos corpos hídricos, como eutrofização e depleção de oxigênio.

Diante destas características, o tratamento biológico – e, dentro deste, os processos aeróbios – é amplamente reconhecido na literatura internacional como a rota tecnológica mais adequada e frequentemente aplicada para a remoção da

fração orgânica biodegradável predominante (Petruccioli et al., 2002; Oliveira et al., 2009). No entanto, existe uma disparidade notável entre o conhecimento consolidado globalmente e a realidade da pesquisa e implementação no Brasil. A investigação nacional sobre o tema, tende a concentrar-se nos efluentes de maior volume e notoriedade, como os da vindima, deixando de lado fluxos específicos gerados por tecnologias de processamento mais modernas e eficientes.

Um caso emblemático é o do efluente da estabilização tartárica por eletrodiálise (EW). A eletrodiálise emerge como uma Melhor Técnica Disponível (MTD) para a estabilização dos vinhos, por reduzir drasticamente o consumo de energia e água em comparação com o método tradicional de resfriamento, além de evitar o uso de aditivos químicos (Bories et al., 2011). Contudo, este processo gera um fluxo residual concentrado, caracterizado por alta salinidade (condutividade), acidez (baixo pH) e presença de ácido tartárico e potássio. Justamente por ser um subproduto de uma tecnologia considerada "limpa", a tratabilidade deste efluente específico foi historicamente negligenciada, permanecendo como uma lacuna no conhecimento técnico-científico. Para investigar esta questão, foi conduzido um estudo de caso experimental pioneiro, que demonstrou a alta biodegradabilidade aeróbia deste efluente aparentemente problemático, alcançando eficiências de remoção de DQO superiores a 99% em um reator de microbolhas de ar (OLIVEIRA, M.; QUEDA, C.; DUARTE apud Farias, 2017).

Este artigo se propõe a utilizar esses achados experimentais concretos não como um fim em si mesmos, mas como um ponto de ancoragem para uma análise crítica mais ampla e urgente. Objetiva-se, a partir deste microcosmo técnico, realizar um diagnóstico do estado da arte da pesquisa sobre tratamento de ARV no Brasil. Busca-se contextualizar os resultados técnicos promissores dentro do panorama nacional, identificar e analisar criticamente as lacunas sistêmicas – técnicas, econômicas e regulatórias – que criam um abismo entre a bancada do laboratório e a realidade do campo. Por fim, e de forma prospectiva, este trabalho pretende extrapolar os achados para propor caminhos inovadores baseados na integração sinérgica de processos e nos princípios transformadores da economia circular. A ambição final é contribuir com subsídios concretos para orientar futuras agendas de pesquisa, o desenvolvimento de políticas públicas setorializadas e a adoção de práticas de gestão que permitam à vitivinicultura brasileira conciliar seu legítimo crescimento em compasso com a sustentabilidade ambiental.

Material e Métodos

Esta investigação adota a estrutura metodológica de uma revisão crítica narrativa, uma abordagem qualitativa que permite uma análise de conhecimento, sendo particularmente adequada quando o objetivo é sintetizar e criticar a literatura a partir de uma perspectiva teórica ou conceitual específica, guiada por um caso concreto (Grant & Booth, 2009). Diferentemente de uma revisão sistemática, que segue um protocolo rígido para responder a uma pergunta de pesquisa bem delimitada através da agregação quantitativa de dados, a revisão crítica narrativa busca construir um argumento, identificar contradições, lacunas e tendências no campo de estudo, oferecendo uma análise contextualizada e prospectiva (Paré et al., 2015). Este desenho metodológico foi escolhido por sua adequação para explorar problemas complexos e mal definidos, como a translação de conhecimento técnico para a prática no setor vitivinícola brasileiro, onde há uma escassez de estudos primários diretamente comparáveis em escala real.

A execução da análise foi conduzida de forma integrada e sequencial em três etapas inter-relacionadas, conforme esquematizado na Figura 1 (conceitual do método).



Figura 01: Esquema conceitual da abordagem metodológica em três etapas.
Fonte: Elaboração da autora (2026).

O ponto de partida desta pesquisa foram os resultados de um estudo de caso experimental previamente conduzido, o qual forneceu os dados primários e a base empírica para o desenvolvimento das análises aqui apresentadas (OLIVEIRA, M.; QUEDA, C.; DUARTE apud Farias, 2017). Esta investigação concentrou-se especificamente na caracterização e a biodegradabilidade aeróbia do efluente de eletrodiálise (EW) de uma adega.

A metodologia experimental do referido estudo compreendeu três etapas principais: (i) a caracterização físico-química completa do EW, incluindo pH, condutividade elétrica, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5), sólidos totais e suspensos, nitrogênio Kjeldahl e potássio; (ii) a realização de ensaios respirométricos em batelada para determinação dos parâmetros cinéticos de biodegradação, nomeadamente a constante cinética (k) e a demanda última de oxigênio (L_0), com base no método de Thomas (1950); e (iii) a operação de um reator aeróbio de microbolhas de ar (AMBB), em escala piloto (15 L), visando à avaliação do desempenho do tratamento em regimes de batelada e contínuo.

Inicialmente, o reator do experimento foi inoculado com biomassa ativada previamente aclimatada ao efluente de vindima da mesma adega, operando com tempos de retenção hidráulica variáveis e taxas de aeração controladas (OLIVEIRA, M.; QUEDA, C.; DUARTE apud Farias 2017). Todos os parâmetros de eficiência (remoção de DQO) e cinética discutidos neste artigo derivam integralmente dos resultados desse trabalho.

A segunda etapa compreendeu um levantamento narrativo e seletivo da literatura científica. Foi realizada uma busca ampla, porém não exaustiva (característica da revisão narrativa), nas bases de dados Scopus, Web of Science e SciELO. O período de busca não foi rigidamente delimitado, privilegiando a inclusão de trabalhos seminais e representativos. As estratégias de busca combinaram descritores em português, inglês e espanhol, incluindo termos como: "winery wastewater" AND ("treatment" OR "biodegradability"), "electrodialysis" AND "winery", "Brazil" AND "wine" AND ("wastewater" OR "effluent"), "circular economy" AND "water reuse" AND "winery". A seleção dos artigos foi guiada pela sua relevância para os objetivos da análise crítica, priorizando: (a) estudos internacionais que definem o estado da arte no tratamento de águas residuais vinícolas; (b) pesquisas aplicadas realizadas no cenário brasileiro; (c) trabalhos oriundos de países ibero-americanos com setores vitivinícolas consolidados (como Portugal, Espanha e Chile), para fins de contraste contextual; e (d) literatura sobre recuperação de recursos, economia circular e políticas ambientais aplicadas ao setor de alimentos e bebidas.

A terceira etapa correspondeu à análise crítica integrada e à síntese prospectiva. Nessa fase, os dados experimentais do estudo de caso (Etapa 1) foram sistematicamente confrontados com as tendências, achados e limitações identificados na literatura (Etapa 2). Esse processo permitiu identificar padrões, convergências e, sobretudo, lacunas e inconsistências entre o conhecimento técnico disponível e as condições reais de implementação no contexto brasileiro.

Com base nesse diagnóstico, foram propostas diretrizes para pesquisas futuras e delineados elementos conceituais para um novo modelo de gestão. Essa síntese buscou integrar processos sob a perspectiva da economia circular, superando a abordagem convencional de tratamento e descarte e avançando para uma visão sistêmica orientada à recuperação de valor.

Resultados e Discussão

A caracterização inicial do efluente de eletrodiálise (EW) revelou um perfil marcadamente desafiador, caracterizado por acidez pronunciada (pH 3,6 ± 0,1) e elevada condutividade elétrica (3900 ± 2840 $\mu S.cm^{-1}$), atribuída à alta concentração de íons potássio e tartarato (OLIVEIRA, M.; QUEDA, C.; DUARTE apud Farias, 2017). Tal condição salina representa, a priori, um fator inibitório para processos biológicos, podendo induzir estresse osmótico em microrganismos não adaptados (Lefebvre & Moletta, 2006). A carga orgânica, expressa como Demanda Química de Oxigênio (DQO), foi de 5323 ± 2523 mg L^{-1}, confirmando tratar-se de um efluente concentrado, comparável aos gerados durante o período da vindima (Oliveira et al., 2009). Os principais resultados obtidos são apresentados de forma sintética na Tabela 1.

Parâmetro	Condição/Fase	Resultado	Implicação
Caracterização	pH	3,6 ± 0,1	Acidez pronunciada.
	Condutividade	3900 ± 2840 $\mu S.cm^{-1}$	Alta salinidade.
	DQO	5323 ± 2523 $mg.L^{-1}$	Carga orgânica elevada.
	Razão DBO_5/DQO	0,45	Biodegradabilidade média-alta.
Cinética	Constante k	0,308 - 0,319 d^{-1}	Taxa de biodegradação significativa.
	Meia-vida ($t_{1/2}$)	~2,2 dias	Degradação relativamente rápida.
Tratamento (Batelada)	Eficiência (30 dias)	~99% remoção de DQO	Alta eficiência alcançável.
Tratamento (Contínuo)	Eficiência estável	98-99% remoção de DQO	Viabilidade técnica comprovada.

Tabela 01: Resumo dos principais resultados do estudo de caso com efluente de eletrodiálise (EW).
Fonte: Adaptado do estudo de caso experimental (OLIVEIRA, M.; QUEDA, C.; DUARTE apud Farias, 2017).

Contrariando expectativas iniciais, o efluente apresentou elevada e rápida biodegradabilidade aeróbia (OLIVEIRA, M.; QUEDA, C.; DUARTE apud Farias, 2017). A razão DBO_5/DQO de 0,45 indica biodegradabilidade média a alta, enquanto os ensaios respirométricos evidenciaram cinética de degradação de primeira ordem, com constante cinética (k) entre 0,308 e 0,319 d^{-1}. Esses valores são superiores aos reportados para efluentes de segunda trasfega, frequentemente enriquecidos em compostos fenólicos recalcitrantes, e comparáveis aos de correntes mais facilmente biodegradáveis, como as de primeira trasfega.

A meia-vida de degradação (~2,2 dias) reforça a elevada assimilabilidade da matéria orgânica presente, predominantemente constituída por etanol e ácido tartárico. A operação do reator aeróbio de microbolhas (AMBB), em escala piloto, confirmou esse potencial em condições dinâmicas. Em regime de batelada, foram alcançadas remoções de DQO próximas a 99% após 30 dias, enquanto, em operação contínua, o sistema manteve eficiências estáveis entre 98% e 99%, demonstrando robustez mesmo sob variações de carga orgânica.

Esse desempenho é atribuído, em grande medida, à aclimatação prévia da biomassa, oriunda de um consórcio microbiano já adaptado ao efluente de vindima da mesma adega, o que favoreceu a tolerância progressiva às condições salinas do EW. Esses resultados corroboram evidências de que biomassa aclimatada pode tratar efluentes com salinidade significativa (Kargi & Dincer, 1996), desmistificando a ideia de que a salinidade constitui uma barreira intransponível ao tratamento biológico.

O estudo de caso evidencia, portanto, a viabilidade técnica do tratamento de um fluxo específico e frequentemente negligenciado. Contudo, também explicita as condições críticas para o sucesso: necessidade de inóculo especializado, período de aclimatação e operação cuidadosamente controlada. A extrapolação dessa prova de conceito, obtida em escala piloto, para aplicações amplas, economicamente viáveis e operacionalmente robustas nas vinícolas brasileiras enfrenta desafios que extrapolam a dimensão estritamente técnica.

A análise crítica integrada, ao confrontar esses resultados com o panorama da literatura, permite identificar três lacunas estruturais fundamentais. A primeira refere-se à escala e à ausência de dados de longa duração. Predominam estudos em escala de bancada ou piloto, de curta duração, sendo escassos os trabalhos longitudinais em escala real que capturem a variabilidade sazonal dos efluentes vinícolas. Em contraste, países com setores mais consolidados, como África do Sul e Espanha, dispõem de estudos dessa natureza, fundamentais para o dimensionamento e a operação dos sistemas (Sheridan et al., 2011; Artiga et al., 2007).

A segunda lacuna é de natureza econômico-ambiental e diz respeito à escassez de Avaliações Técnico-Econômicas (ATE) e Análises de Ciclo de Vida (ACV). No contexto brasileiro, faltam dados comparativos que orientem a escolha tecnológica com base em custo-benefício ao longo do ciclo de vida. Diferentemente da União Europeia, onde documentos de Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) são acompanhados por análises econômicas detalhadas (Comissão Europeia, 2019), a tomada de decisão no Brasil permanece limitada por incertezas técnicas e econômicas.

A terceira lacuna, de caráter institucional, corresponde ao vácuo regulatório e à ausência de um ecossistema de suporte à inovação. A aplicação de normas genéricas, como as Resoluções CONAMA 430/2011 e 357/2005, desconsidera a variabilidade sazonal dos efluentes vinícolas, impondo exigências tecnicamente inadequadas e economicamente onerosas. Em contraste, modelos internacionais adotam abordagens mais flexíveis e setoriais, baseadas em desempenho e prevenção na fonte. A esse cenário somam-se a ausência de incentivos econômicos, linhas de financiamento específicas e programas estruturados de capacitação, configurando um ambiente pouco favorável à adoção de soluções sustentáveis.

Diante deste diagnóstico triplo, a discussão avança para uma perspectiva prospectiva fundamentada na integração de processos e nos princípios da economia circular. Propõe-se, assim, uma mudança de paradigma na gestão dos efluentes vinícolas, na qual o efluente deixa de ser tratado exclusivamente como um rejeito a ser disposto após tratamento — conforme a abordagem linear tradicional — e passa a ser compreendido como um fluxo de recursos passível de valorização.

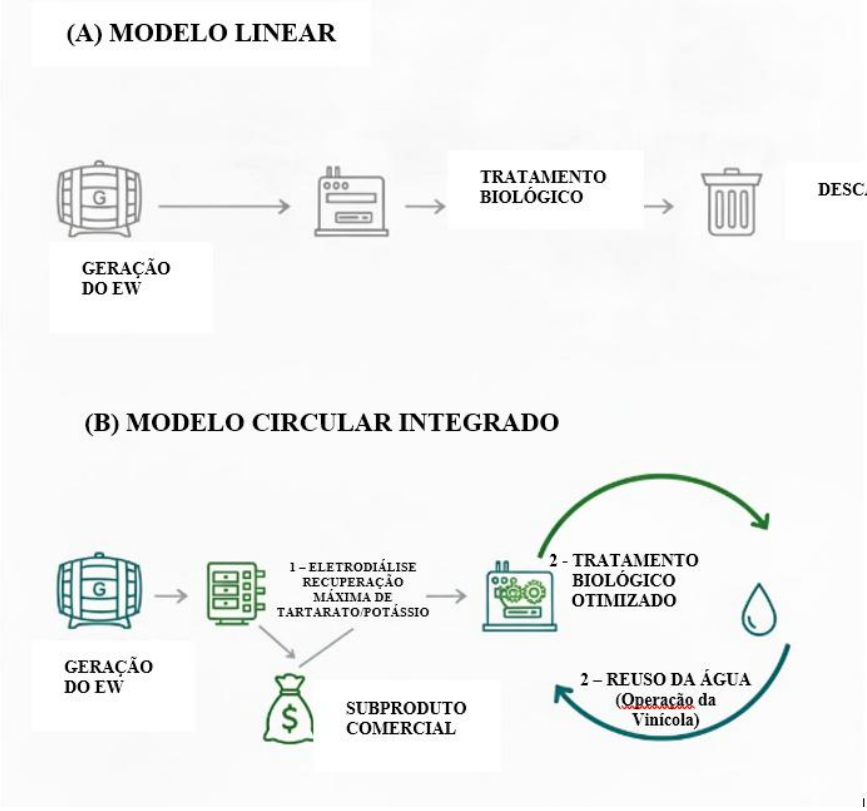


Figura 02: Conceito de transição de um modelo linear para um modelo circular do efluente de eletrodiálise (EW). Fonte: Elaboração da autora (2026).

Essa transição conceitual é ilustrada na Figura 2, que apresenta, de forma comparativa, o modelo linear convencional e uma proposta de modelo circular integrado aplicado ao efluente de eletrodiálise (EW). No modelo linear, o fluxo segue uma lógica unidirecional: geração do efluente, tratamento e descarte final. Em contraste, o modelo circular incorpora etapas adicionais de recuperação e reaproveitamento, nas quais o processo de eletrodiálise é reinterpretado como o núcleo de uma plataforma de valorização de recursos.

Nessa nova configuração, o fluxo concentrado gerado na eletrodiálise deixa de ser apenas um passivo ambiental e passa a ser explorado como fonte de compostos de valor, especialmente ácido tartárico e sais de potássio, com potencial de aplicação nas indústrias alimentícia, farmacêutica e de fertilizantes. A recuperação desses compostos pode gerar receitas adicionais, contribuindo para a viabilidade econômica do sistema como um todo.

A corrente líquida residual, após a etapa de recuperação, apresenta características mais favoráveis ao tratamento biológico e pode ser direcionada a sistemas aeróbios otimizados — como o reator de microbolhas (AMBB), cuja eficácia foi demonstrada neste estudo — ou a tecnologias avançadas, como biorreatores com membranas. O objetivo final é a produção de um efluente tratado com qualidade suficiente para reuso seguro não potável dentro da própria vinícola, em aplicações como irrigação, lavagem de equipamentos e limpeza de instalações, promovendo o fechamento do ciclo da água no sistema produtivo.

Apesar dos resultados promissores, destaca-se que o estudo aeróbia (OLIVEIRA, M.; QUEDA, C.; DUARTE apud Farias, 2017) foi conduzido em escala piloto e em condições controladas, o que limita a extrapolação direta para sistemas em escala real.

Considerações Finais

Esta análise crítica, fundamentada nos resultados de um estudo de caso experimental, permitiu estabelecer um diagnóstico consistente sobre os desafios e caminhos para a sustentabilidade hídrica na vitivinicultura brasileira. Os resultados demonstram, de forma robusta e replicável, que soluções técnicas eficazes para o tratamento de efluentes vinícolas complexos — inclusive fluxos específicos e tradicionalmente negligenciados, como o efluente da eletrodiálise — não apenas existem, como podem alcançar elevados níveis de desempenho, com eficiências de remoção de DQO superiores a 98%.

Nesse contexto, evidencia-se que a principal barreira à gestão sustentável desses efluentes no Brasil não reside mais na inviabilidade técnica ou na ausência de conhecimento científico, mas sim na dificuldade de transpor esse conhecimento para aplicações práticas contextualizadas. Essa lacuna de implementação manifesta-se como um déficit sistêmico triplo: (i) déficit de escala e temporalidade, decorrente da escassez de estudos de longo prazo em condições reais de operação; (ii) déficit de avaliação econômico-ambiental, associado à ausência de Análises Técnico-Econômicas e de Ciclo de Vida que subsidiem a tomada de decisão; e (iii) déficit regulatório e institucional, caracterizado pela falta de instrumentos normativos, financeiros e técnicos que promovam a adoção de soluções sustentáveis.

Diante desse cenário, o caminho estratégico que se delineia é necessariamente integrado e interdependente, exigindo avanços simultâneos em duas frentes complementares.

Na dimensão técnico-científica, é imperativo que a pesquisa avance além de estudos de bancada e provas de conceito, priorizando iniciativas de pesquisa aplicada em escala piloto integrada, desenvolvidas em colaboração direta com vinícolas. O foco deve evoluir da otimização isolada de processos para a validação de sistemas circulares em condições reais, incluindo a recuperação de compostos de valor, como o ácido tartárico, o reuso seguro da água tratada e a avaliação da resiliência operacional frente à variabilidade sazonal.

Em paralelo, na dimensão político-institucional e de gestão, torna-se urgente a construção de um ambiente habilitador. Isso envolve o desenvolvimento de uma regulamentação ambiental específica e setorializada, capaz de incorporar a sazonalidade da produção por meio de padrões diferenciados ou metas progressivas, bem como a criação de incentivos econômicos direcionados à adoção de tecnologias de reuso e recuperação de recursos. Adicionalmente, é fundamental ampliar o acesso a ferramentas de apoio à decisão — como modelos de simulação, diretrizes técnicas e plataformas de compartilhamento de conhecimento — e fomentar modelos de negócio inovadores, como sistemas cooperativos, serviços compartilhados e mecanismos de financiamento baseados em desempenho.

A vitivinicultura brasileira encontra-se em um momento estratégico de consolidação e expansão. Nesse contexto, a gestão de efluentes deixa de ser apenas uma exigência ambiental e passa a constituir uma oportunidade concreta de inovação. A transição para modelos circulares, baseados na valorização da água e na recuperação de recursos, pode gerar ganhos simultâneos de eficiência, redução de custos, diversificação de receitas e fortalecimento da imagem sustentável do setor.

O desafio da vitivinicultura brasileira não é mais tratar seus efluentes, mas integrá-los a um sistema produtivo circular, no qual resíduos deixam de existir e passam a representar recursos estratégicos.

Agradecimentos

A autora agradece ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca pelo suporte institucional ao desenvolvimento deste trabalho, em especial à Profa. Doralice Tavares pela orientação acadêmica e contribuições fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem igualmente ao Instituto Politécnico de Santarém, em particular à Escola Superior Agrária de Santarém, pelo acolhimento durante o período de mobilidade acadêmica no âmbito do programa Erasmus+, onde foram iniciadas as atividades que deram origem a esta pesquisa. Destaca-se, ainda, a contribuição da Profa. Margarida Oliveira, cujo contato inicial foi fundamental para o desenvolvimento deste estudo.

Referências Bibliográficas

IOANNOU, L.A., LI PUMA, G., & FATTA-KASSINOS, D. (2015). Treatment of winery wastewater by physicochemical, biological and advanced processes: A review. Journal of Hazardous Materials, 286, 343–368. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.043. Acesso em 14 nov. 2025.

ARTIGA, P.; CARBALLA, M.; GARRIDO, J. M.; MÉNDEZ, R. Treatment of winery wastewaters in a membrane submerged bioreactor. Water Science and Technology, v. 56, n. 5, p. 63-69, 2007. Disponível em https://doi.org/10.2166/wst.2007.473. Acesso em 10 de nov. 2025.

BORIES, A. et al. Environmental impacts of tartaric stabilisation processes for wines using electrodialysis and cold treatment. South African Journal of Enology and Viticulture, v. 32, n. 2, p. 174-182, 2011. Disponível em: https://www.journals.ac.za/index.php/sajev/article/view/1377. Acesso em 21 nov. 2025.

CHILE. Ministerio de Agricultura. Decreto Supremo Nº 56: Modifica Decreto Nº 464, de 1994, del Ministerio de Agricultura, que establece zonificación vitícola y fija normas para su utilización. Promulgado em 28 de dezembro de 2017. Publicado em 25 de maio de 2018. Versão única – 25-MAY-2018. Disponível em: https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1118954. Acesso em 12 nov. 2025.

COMISSÃO EUROPEIA. Best Available Techniques (BAT) Conclusions for the Food, Drink and Milk Industries. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2019. Disponível em: https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC118627_FDM_Bref_2019_published.pdf. Acesso em 02 dez. 2025.

CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, 2011. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/RE0430-130511.PDF. Acesso em 03 dez. 2025.

FARIAS, J. F. Avaliação da Biodegradabilidade de Águas Residuais Vinícolas Estabilizadas por Eletrodiálise. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão Ambiental) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2017.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. Health Information & Libraries Journal, v. 26, n. 2, p. 91-108, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x. Acesso em: 09 dez. 2025.

INSTITUTO DO AMBIENTE (2006), Nota Interpretativa n.º 1/2005, 2006.10.25, Indústria dos Alimentos, Bebidas e Leite. Disponível em: https://apambiente.pt/sites/default/files/_SNIAMB_Avaliacao_Gestao_Ambiental/PCIP/Notas%20Interpretativas/NI_1_2005-Agro-industrias_(2006.10.25).pdf. Acesso em 18 nov. 2025.

LEFEBVRE, O.; MOLETTA, R. Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: A literature review. Water Research, v. 40, n. 19, p. 3671-3682, 2006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135406005082. Acesso em 27 nov. 2025.

JORGE, N.; TEIXEIRA, A.R.; GOMES, A.; PERES, J.A.; LUCAS, M.S. Winery Wastewater: Challenges and Perspectives. Eng. Proc. 2023, 56, 267. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15968. Acesso em 04 dez. 2025.

PROTAS, J. F. S.; LAZZAROTTO, J. J.; MACHADO, C. A. E. Panorama da Vitivinicultura Brasileira. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2023. Disponível em https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1179094/1/Doc-139.pdf. Acesso em 06 dez. 2025.

OLIVEIRA, M.; QUEDA, C.; DUARTE, E. Aerobic Treatment of winery wastewater with the aim of water reuse. Water Science and Technology, v. 60, p. 1217-1223, 2009. Disponível em: https://iwaponline.com/wst/article-abstract/60/5/1217/14507/Aerobic-treatment-of-winery-wastewater-with-the?redirectedFrom=fulltext. Acesso em 13 dez. 2025.

OLIVEIRA, M; FARIAS, J; SILVA, H; RICARDO, J; DUARTE, E. Winery Wastewater Biodegradability – Electrodialysis Flow. In: III CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE EMPREENDEDORISMO, ENERGIA, AMBIENTE E TECNOLOGIA (CIEEMAT), 2017, Bragança. Livro de Atas. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, 2017. ISBN 978-972-745-230-9. Disponível em: https://www.academia.edu/145440603/Winery_Wastewater_Biodegradability_Electrodialysis_flow?source=swp_share. Acesso em 16 dez. 2025.

PARÉ, G. et al. Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews. Information & Management, v. 52, n. 2, p. 183-199, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378720614001116?via%3Dihub. Acesso em 26 nov. 2025.

PETRUCCIOLI, M. et al. Aerobic treatment of winery wastewater using a jet-loop activated sludge reactor. Process Biochemistry, v. 37, n. 8, p. 821-829, 2002. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032959201002801?via%3Dihub. Acesso em 18 de nov. 2025.

RIVAS, B. et al. Tartaric acid recovery from distilled lees and use of the residual solid as an economic nutrient for Lactobacillus. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 54, n. 20, p. 7904-7911, 2006.

SHERIDAN, C. M. et al. An annual and seasonal characterisation of winery effluent in South Africa. South African Journal of Enology and Viticulture, v. 32, n. 1, p. 1-8, 2011.

YALCIN, D. et al. Characterization and recovery of tartaric acid from wastes of wine and grape juice industries. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 94, n. 3, p. 767-771, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10973-008-9345-z. Acesso em 14 dez. 2025.

APLICAÇÃO DE WETLANDS CONSTRUÍDAS PARA REMOÇÃO DE CAFEÍNA EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E TOXICIDADE EM SOLO

1 Palloma G. Renovato de Oliveira, 2 Bruna de Jesus Moreira, 3 Marta Siviero Guilherme Pires
1 Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, e-mail: p240592@dac.unicamp.br; 2 Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, e-mail: B234926@dac.unicamp.br; 3 Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, e-mail: martasiv@unicamp.br

Palavras-chave: Cafeína; *Wetlands*; Efluente.

Resumo

A presença de poluentes orgânicos no meio ambiente tem se tornado relevante devido à sua ampla ocorrência em águas residuárias e à limitada eficiência de remoção desses compostos por meio dos sistemas de tratamento convencionais. Nesse contexto, este estudo teve por objetivo avaliar a eficiência de remoção da cafeína presente em efluente sintético por meio de *Wetlands* construídas (WCs), bem como investigar os efeitos ecotoxicológicos do contaminante e do efluente em sementes. Dessa forma, foram realizados ensaios de fitotoxicidade com sementes de *Lactuca sativa*, *Eruca sativa* e *Triticum aestivum*, nos quais foi confirmada a toxicidade do composto para as sementes avaliadas, que demonstraram comportamentos de sensibilidade diferenciados entre as espécies, sendo *Lactuca sativa* a mais sensível. A partir dos resultados dos ensaios de fitotoxicidade, foram construídos sistemas de WCs de fluxo vertical subsuperficial como alternativa de tratamento, sendo um sistema controle constituído apenas por brita e areia como meio suporte, sem plantas, e dois sistemas acrescidos com macrófitas de *Heliconia psittacorum* e *Cyperus prolifer Lam.*, todos operados com tempo de detenção hidráulica (TDH) de até 8 dias. Ao final do período experimental foram realizadas análises físico-químicas (DQO, pH, cor e turbidez) em amostras do efluente antes e após o tratamento. Além disso, a cafeína residual foi quantificada por meio de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), utilizando amostras do efluente tratado. Os resultados indicaram que o tratamento por WCs possui alta eficiência para remoção do contaminante, atingindo eficiência de 99,6% para o TDH de 8 dias e redução dos parâmetros físico-químicos a níveis compatíveis com os limites estabelecidos em requisitos legais. Ademais, como consequência da melhora na qualidade do efluente após o tratamento, verificou-se um aumento na tolerância das sementes expostas, evidenciando redução do efeito tóxico em comparação ao efluente bruto, que apresentou resultado contrário.

Introdução

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), cerca de 44% da carga orgânica gerada no Brasil ainda é lançada em corpos hídricos sem tratamento adequado, sendo que apenas 55% da população brasileira dispõe de coleta e tratamento de esgoto (ANA, 2021). Ainda, apesar da existência de instrumentos normativos, como a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) n.º 430/2011, que estabelece padrões para o lançamento de efluentes em corpos receptores, estudos da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) indicam que cerca de 30% dos corpos d'água monitorados no Estado de São Paulo apresentaram índices de oxigênio dissolvido abaixo de $5\ mg\ L^{-1}$, valor mínimo recomendado para a manutenção da vida aquática, em função da carga orgânica proveniente de esgotos domésticos e industriais (CETESB, 2020). Nesse cenário, compostos denominados de poluentes emergentes, como os fármacos, passaram a ser detectados em águas residuárias e apresentam alta taxa de permanência, mesmo após o tratamento convencional.

Desse modo, a contaminação de águas e solos, por fármacos e outros compostos descartados incorretamente, têm se tornado um problema de difícil controle. A CETESB (2020) detectou concentrações de ibuprofeno, diclofenaco e cafeína variando entre 10 e $500\ ng\ L^{-1}$ em amostras de rios e efluentes tratados na Região Metropolitana de São Paulo. Já a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) reforça a gravidade do tema e indica que mais de 80% dos cursos d'água monitorados nos Estados Unidos apresentaram traços de fármacos ou produtos de cuidado pessoal, com destaque para antibióticos, hormônios e anti-inflamatórios (USEPA, 2019). Neste contexto, estudos recentes demonstram que compostos como a cafeína podem ocorrer em elevadas concentrações em corpos hídricos impactados por efluentes (até $11800\ ng\ L^{-1}$) e ser detectados no plasma de peixes expostos, evidenciando processos de bioacumulação em organismos aquáticos (MUIR et al., 2017). Tal ocorrência levanta preocupações quanto à exposição contínua da biota aquática e aos potenciais riscos associados à transferência desses contaminantes ao longo da cadeia trófica.

A cafeína é um composto psicoativo que pertence ao grupo das xantinas e é princípio ativo dos analgésicos e suplementos e, devido ao amplo consumo desses produtos e ao aumento da sua disponibilidade no meio ambiente, bem como à necessidade de processos avançados para sua remoção, não contemplados em tratamentos convencionais (POSER, 2016), passou a ser foco de pesquisas científicas, ainda que seja um estudo que apresenta carências no campo de toxicologia de solos. Assim, devido a baixa eficiência dos sistemas convencionais, a remoção desse composto em estações de tratamento de esgoto têm sido associada à adoção de processos terciários e avançados. Entre as principais tecnologias, destacam-se os processos oxidativos avançados (POAs), como a ozonização, capazes de degradar compostos farmacêuticos e apresentar taxas de remoção frequentemente superiores a 80% para substâncias recalcitrantes (RIZZO et al., 2019; GOGATE; PANDIT, 2021).

Outra solução adotada é o tratamento por adsorção em carvão ativado, tanto em pó (CAP) quanto granular (CAG), que também apresenta elevada eficiência, com remoções na faixa de 70% e 95% (NAM et al., 2018; RIBEIRO et al., 2020). Além destas, tecnologias de separação por membranas, como nanofiltração e osmose reversa, também são empregadas e apresentam altas taxas de retenção de fármacos, frequentemente superiores a 90%, embora envolvem maiores custos operacionais de manutenção e a necessidade de manejo do resíduo gerado (RODRIGUEZ-NARVAEZ et al., 2017; PEREIRA et al., 2021).

Em relação aos tratamentos de menor porte, as WCs são utilizadas como método de tratamento secundário ou terciário de efluentes e se mostram muito eficientes para a remoção de compostos contaminantes e potencialmente tóxicos. As WCs são ambientes alagados, construídos artificialmente para funcionar de maneira similar aos ecossistemas úmidos, como o Manguezal brasileiro, por exemplo (USEPA, 2000). Esses sistemas são compostos por uma ou mais células de tratamento. As camadas filtrantes ou substrato, promovem a adsorção de matéria orgânica, contaminantes e demais sólidos suspensos, as macrófitas aquáticas, fornecem oxigênio e realizam a absorção de nutrientes e outros compostos, já o biofilme se forma sobre o substrato, é capaz de degradar a matéria orgânica retida e realizar reações bioquímicas (KATAKI, 2021).

Existem três tipos de sistemas de WCs, que variam de acordo com o tipo do fluxo adotado, são eles: fluxo vertical, fluxo horizontal e fluxo superficial ou subsuperficial, sendo que mais de um fluxo pode ser adotado em conjunto. A *Wetland* escolhida para esta pesquisa utilizou sistema de fluxo vertical subsuperficial, com sentido de filtração descendente, camadas filtrantes de brita n° 1 e areia fina própria para filtros e base de drenagem com solo natural. Além destes, também foram construídos sistemas acrescidos com mudas de Mini papiro (*Cyperus prolifer Lam.*) e helicônia papagaio (*Heliconia psittacorum*), sendo a primeira de uso recorrente para fins paisagísticos. Para simplificação, os sistemas mencionados foram denominados de *Wetland* 4 (W4), *Wetland* 5 (W5) e *Wetland* 6 (W6), respectivamente.

Desse modo, o presente estudo teve como objetivo avaliar a toxicidade da cafeína em ensaio laboratorial e como contaminante em efluente sintético utilizando sementes de rúcula (*Eruca sativa*) e trigo (*Triticum aestivum*) como bioindicadores, bem como determinar a eficiência de sua remoção do efluente através de um sistema de *Wetlands* construídas, operado com duas espécies vegetais diferentes. Portanto, os resultados obtidos neste estudo são de suma importância, pois contribuem para o avanço do conhecimento sobre tecnologias de tratamento alternativas, ao mesmo tempo em que ampliam a compreensão sobre os potenciais impactos de poluentes emergentes no ambiente, neste caso a cafeína.

Material e Métodos

As atividades experimentais foram realizadas no Laboratório de Ecotoxicologia de solos (LAECOS) e no Laboratório Físico-químico (LAFIQ) da Faculdade de Tecnologia da Unicamp, campus de Limeira. Inicialmente, foram realizados ensaios de fitotoxicidade utilizando sementes de alface (*Lactuca sativa*), rúcula (*Eruca sativa*) e trigo (*Triticum aestivum*) expostas à cafeína e, a partir da confirmação de potencial toxicológico obtido através dos resultados, foi iniciada a segunda etapa para determinar a eficiência de remoção da cafeína anidra utilizando os três sistemas de WCs mencionados.

Ensaios de fitotoxicidade - Etapa 1

Para definir as concentrações de teste foram realizadas pesquisas bibliográficas que avaliaram concentrações de ocorrência ambiental e de toxicidade obtidas por extrapolação descritas na bibliografia existente até o momento do estudo. As concentrações ambientais de cafeína, descritas na literatura, foram detectadas em corpos hídricos em ambientes costeiros e variam entre 0,5 e 18 $\mu g\ L^{-1}$ (CRUZ, 2016), já as encontradas em águas brasileiras, incluindo registros em Campinas/SP, variam entre 0,5 e 127 $\mu g\ L^{-1}$ (BERNEGOSSI, 2019). Outrossim, neste estudo, optou-se pela utilização de concentrações na ordem de $mg\ L^{-1}$, a fim de evitar a propagação de erros humanos oriundos de manipulações e das limitações apresentadas pelos equipamentos utilizados. Nesse contexto, as concentrações acima do encontrado no meio ambiente, têm por finalidade estabelecer uma relação dose–resposta, permitindo a determinação de parâmetros ecotoxicológicos importantes, como as Concentrações de Efeito letal em 50% e 20% da população teste(em inglês, EC_{50}, EC_{20}), as Concentrações de Efeito Observado (CEO) e as Concentrações de Efeito Não Observado (CENO). Tal abordagem permite inferir limites de sensibilidade para as espécies testadas e subsidiar análises de risco ambiental por extrapolação.

Dessa forma, os ensaios de fitotoxicidade foram conduzidos utilizando placas de Petri descartáveis contendo papel filtro qualitativo, com manipulação das sementes realizada por meio de pinça metálica. As diluições para os ensaios foram preparadas a partir de uma solução-mãe com concentração de 200 $mg\ L^{-1}$ de cafeína anidra ($C_8H_{10}N_4O_2$), diluída em água destilada com auxílio de agitador aquecido para garantir completa solubilização, sendo aplicados 4mL de cada diluição em placas de Petri distintas, contendo 20 sementes cada. As concentrações foram testadas em quadruplicata, assim como o controle negativo, constituído apenas por água destilada. As placas foram identificadas, acondicionadas em bandejas e mantidas em ambiente escuro, dentro de sacos plásticos atóxicos, por 5 dias, sob temperatura de 20 ± 2 °C, conforme protocolo estabelecido. Os resultados foram avaliados segundo a metodologia de análise.

Assim, o ensaio preliminar testou as concentrações de 1,0; 1,5; 3,4; 5,1; 7,6 e 11,4 $mg\ L^{-1}$, seguindo as diretrizes do método de germinação de sementes e alongamento radicular da USEPA (OPPTS 850.4200, 1996), sendo inicialmente conduzidos com sementes de rúcula e mostarda sob fator de progressão geométrica de 1,5 e posteriormente com substituindo as sementes de mostarda por alface, devido à sua ausência de germinação, inclusive no controle. Nessa nova etapa, foi adotado fator de progressão 2,0, conforme recomendado pela USEPA (1996), para obtenção da curva de dose–resposta e estimativa de parâmetros ecotoxicológicos, de modo que foram testadas as concentrações de 22,8; 45,6; 91,2; 182,4; 364,8 e 729,6 $mg\ L^{-1}$.

Sistema de tratamento com *Wetlands* construídas - Etapa 2

A segunda etapa foi realizada a partir da definição e montagem dos sistemas e do preparo de efluente sintético (adaptado de TORRES, 1992). A concentração de contaminação da cafeína no efluente sintético foi definida com base no valor de dose-resposta apresentado pela alface nos ensaios de fitotoxicidade da etapa 1, já que a espécie apresentou o menor CENO, sendo o parâmetro mais restritivo e adequado para avaliar a eficiência do sistema em baixas concentrações. Já para a escolha do sistema foi realizado um estudo bibliográfico para avaliar a configuração ideal às condições de trabalho, para o qual é apresentada uma síntese na Tabela 01. A partir da análise desses estudos (CHAND, 2022; ARREDONDO, 2022; SÁNCHEZ, 2022; LI, 2017), optou-se pela adoção do sistema proposto no artigo C. Ademais, foi adicionada ao sistema uma camada filtrante de areia fina, com o objetivo de aumentar a retenção do efluente e o tempo de contato com as raízes das macrófitas, favorecendo a remoção de contaminantes, conforme proposto no artigo D.

Artigo	Informações gerais	Fluxo	TDH	Eficiência
(A) Toxicity and removal of pharmaceutical and personal care products: a laboratory scale study with tropical plants for treatment *Wetlands*	Ano: 2022 Revista: Water Scitechnol Autores: ARREDONDO; et al.	subsuperficial de fluxo descendente	24 horas	80% a 96%
(B) Removal of selected emerging PPCP compounds using greater duckweed *(Spirodela polyrhiza*) based lab-scale free water constructed *Wetland*	Ano: 2017 Revista: Water research Autores: LI; et al.	água livre	7 dias	96,40%
(C) Removal of pharmaceuticals by vertical flow constructed *Wetland* with different configurations: effect of inlet load and biochar addition in the substrate	Ano: 2022 Revista: Chemosphere Autores: CHAND; et al.	vertical de fluxo descendente	3, 4 e 5 dias	87,53%
(D) Removal of emerging pollutants by a 3-step system: hybrid digester, vertical flow constructed *Wetland* and photodegradation post-treatments	Ano: 2022 Revista: Science of the total environment Autores: SÁNCHEZ; et al.	subsuperficial vertical de fluxo descendente	4 dias	99%

Tabela 01: Relação dos 4 principais artigos utilizados para embasamento da metodologia.
Fonte: Autoras (2024)

A construção do sistema seguiu os parâmetros da ABNT NBR 17.076:2024, utilizando como base uma caixa de inspeção em PVC adaptada, na qual foi realizado um furo lateral de ¾'' para instalação da torneira de coleta do efluente tratado, com vedação por meio de flange e silicone. A vedação da abertura superior foi realizada com CAP adaptado, selado com cola de silicone. O sistema foi submetido a testes de estanqueidade até ausência de vazamentos. Posteriormente, foram dispostas camadas filtrantes de solo natural, com espessura de 5cm, brita n° 1, com 8cm de espessura, e de areia, com espessura de 2,5cm. Após esse processo, as mudas foram alocadas no respectivos sistemas, e as bateladas de efluente sintético foram iniciadas, conforme o esquema da Figura 01. Nos meses subsequentes ocorreu a aclimatação das macrófitas e estabilização do efluente durante 25 dias, simultâneamente à realização de análises físico-químicas, a fim de acompanhar a redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO) abaixo de 100 $mg\ L^{-1}$, metade do limite máximo permitido para o abastecimento de água para consumo humano, de 200 $mg\ L^{-1}$ (Res. CONAMA nº 430/2005).



Figura 01: Infográfico exemplo da estrutura construída nos sistemas de tratamento.
Fonte: Autoras (2026)

Análises Físico-químicas e Cromatografia gasosa

Posteriormente, foram realizadas análises de Demanda Química de Oxigênio (Método 5220: "Chemical Oxygen Demand (COD)"), cor (Método 2120: "Color"), turbidez (Método 2130: "Turbidity") e pH (Método 4500-H+: "pH"), semanalmente, utilizando o efluente sintético antes e depois do tratamento e todas as metodologias empregadas estavam de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). Para determinar a concentração de cafeína encontrada no efluente pós-tratamento, as amostras foram submetidas a cromatografia gasosa acoplada a um espectrofotômetro de massas. O método utilizado foi de extração líquido-líquido, conforme o fluxograma abaixo (Figura 02). Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Análises Toxicológicas Forenses no Departamento de Química da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto - FFCLRP-USP.

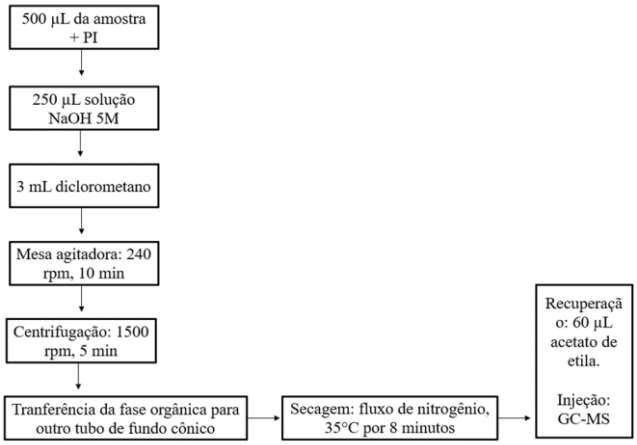


Figura 02: Fluxograma da extração líquido-líquido.
Fonte: MARTINS e GOMES (2024)

A separação foi feita através de coluna capilar de sílica fundida HP 5 (30 m x 0,25 mm x 0,25 µm de espessura de filme). O injetor foi operado a 280 °C no modo splitless e o volume de injeção foi de $1 \mu g\ L^{-1}$. O hélio foi utilizado como gás de arraste num fluxo constante de 1 mL.min-1. A programação da coluna cromatográfica está apresentada na Tabela 02.

Temperatura (ºC)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de permanência (min)	Tempo de análise (min)
90	-	1	1
300	15	5	20

Tabela 02: Fluxograma da extração líquido-líquido.
Fonte: MARTINS e GOMES (2024)

Já a análise foi realizada por espectrometria de massas com analisador quadrupolo, inicialmente em modo full scan (80–490 m/z) para identificação dos íons e, posteriormente, em modo SIM, conforme a Tabela 03, visando maior sensibilidade. Utilizou-se ionização por impacto de elétrons (70 eV), com temperaturas de 280 °C (interface), 230 °C (fonte) e 150 °C (quadrupolo). Para a quantificação da cafeína, empregou-se cocaína-d3 como padrão interno, permitindo corrigir variações analíticas e garantir maior precisão e confiabilidade dos resultados.

Analito	**Íon de quantificação (m/z)**	**Íon qualificador (m/z)**	**Tempo de retenção (min)**
Cafeína	194	82, 109	10,9
Cocaína-d3	85	185, 306	12,9

Tabela 03: Íons de quantificação e identificação da cafeína e do padrão interno (PI) cocaína-d3.
Fonte: MARTINS e GOMES (2024)

Ensaio de toxicidade do efluente pós-tratamento

Os ensaios de fitotoxicidade após o tratamento com *Wetlands* foram realizados com sementes de rúcula e trigo, em triplicata, com controle em duplicata, utilizando amostras do efluente tratado para os TDHs iniciais, médios e extremos (TDH de 0, 4 e 8 dias), avaliados na forma bruta e após diluição em 1:2. A montagem, catalogação e armazenamento, bem como as condições de teste, foram realizadas conforme protocolo supramencionado, baseado na USEPA OPPTS 850.4200 (1996)

Resultados e Discussão

Os resultados dos ensaios preliminares de fitotoxicidade para sementes de rúcula, trigo e alface atenderam aos critérios de validação normativa, com alongamento radicular superior a 20 mm no controle e taxa de germinação acima de 60%, permitindo que fossem realizadas as análises estatísticas (SHAPIRO, 1965; ANOVA, 2019), que evidenciaram diferenças de sensibilidade entre as espécies, sendo a alface a mais sensível (CEO = 22,8 $mg\ L^{-1}$), seguida pela rúcula (CEO = 182,4 $mg\ L^{-1}$), enquanto o trigo apresentou maior resistência (CEO = 364,8 $mg\ L^{-1}$). Já em relação ao CE_{50}, a alface e rúcula apresentaram valores superiores a 200 $mg\ L^{-1}$, enquanto o trigo apresentou CE_{50} de 163,64 $mg\ L^{-1}$.

Semente	CENO	CEO	CE_{20}	CE_{50}	p<0,05
			mg.L-1		
Alface	0	22,8	38,96	454,95	0,00000000011
Trigo	182,4	364,8	98,25	163,64	0,00394
Rúcula	91,2	182,4	89,29	206,74	0,000001

Tabela 04: Parametrização dos dados por SHAPIRO e a ANOVA, para determinação de CEO, CENO, CE_{20} e CE_{50}. Fonte: Autoras (2023)

Adicionalmente, a análise por gráficos *boxplot* (Figura 03) evidenciou maior variabilidade nos dados de alongamento radicular para rúcula e alface, indicando maior sensibilidade e heterogeneidade de resposta nessas espécies. Em contraste, o trigo apresentou menor dispersão dos dados, reafirmando uma maior resistência à exposição nas condições experimentais avaliadas.

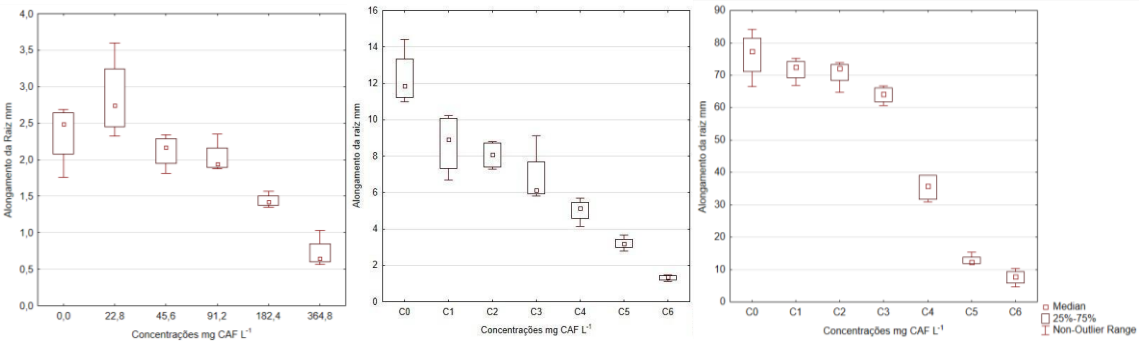


Figura 03: Gráficos *boxplot* para Eruca sativa (a), Lactuca sativa (b) e Triticum aestivum L. (c), respectivamente. Fonte: Autoras (2023)

A avaliação dos resultados da etapa 2, onde os sistemas de WC foram utilizados, foi realizada por meio da análise dos parâmetros físico-químicos de DQO, cor e turbidez ao longo dos tempos de detenção hidráulica (TDH) de 2, 4, 6 e 8 dias e, conforme apresentado na Tabela 05, é possível observar redução progressiva desses parâmetros, indicando a remoção de matéria orgânica e compostos oxidáveis (DQO), bem como de sólidos em suspensão, evidenciada pela diminuição de cor e turbidez. Ao final de 8 dias, todos os sistemas apresentaram valores de DQO inferiores a 200 $mg\ L^{-1}$, atendendo ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Dentre os sistemas avaliados, se destaca a W5, que apresentou maior eficiência, com menores valores finais dos parâmetros analisados.

	Sistema	DQO $mg\ L^{-1}$	Cor aparente	Turbidez Nefelométrica	pH
Contaminação	-	753	408	88,8	8,06
2 dias	W4	330	358	18,6	7,28
	W5	275	*	63,5	7,45
	W6	379	*	50,6	7,53
4 dias	W4	175	237	26,8	7,75
	W5	199	269	14	7,42
	W6	156	*	27,2	7,76
6 dias	W4	137	172	10,3	8
	W5	116	135	4,41	7,53

	W6	143	129	11	8,1
8 dias	W4	160	117	5,94	7,79
	W5	152	120	4,27	7,64
	W6	119	281	8,24	7,97

Tabela 05: Resultados obtidos a partir da análise dos parâmetros físico-químicos ao longo do tempo. Fonte: Autoras (2023)

A concentração residual da cafeína após o tratamento, foi obtida através da análise química de CG-MS, na qual foi realizada a verificação inicial da integridade das amostras e validação das concentrações encontradas através da comparação entre a concentração de cafeína obtida e o padrão interno de cocaína-d3 (Figura 04), que confirmou a confiabilidade dos dados, uma vez que as concentrações obtidas demonstram padrão semelhante, assegurando a integridade analítica.

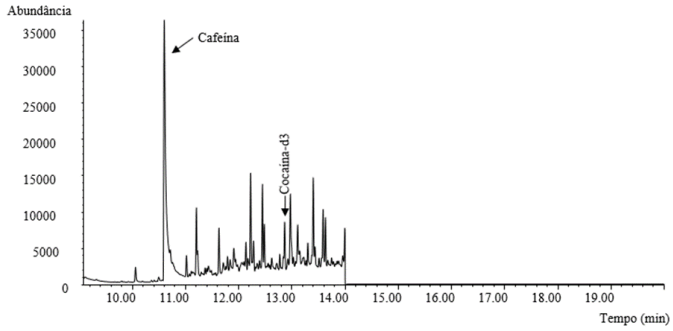


Figura 04: Cromatograma obtido por GC-MS. Amostra 1 fortificada com 200 ng.mL-1 do padrão interno (cocaína-d3). Fonte: MARTINS e GOMES (2024)

Após determinadas na análise por CG-MS, as concentrações foram comparadas com a dose de contaminação para obter a eficiência de remoção de cada sistema e foram constatadas eficiências de remoção superiores a 97% (Tabela 06), assim como apresentado na literatura (ARREDONDO et al., 2022; SÁNCHEZ et al., 2022), com destaque para a *Wetland* 6, que atingiu eficiência de remoção de 99,6% após 8 dias de tratamento.

Amostra	Concentração ($ng\ mL^{-1}$)	% de remoção
AW4-TDH4	154	99,3
AW5-TDH4	260	98,7
AW6-TDH4	282	98,6
AW4-TDH8	102	99,5
AW5-TDH8	432	97,8
AW6-TDH8	84	99,6

Tabela 06: Concentração de cafeína nas amostras analisadas. Fonte: adap. MARTINS e GOMES (2024)

Por fim, a resposta toxicológica das sementes de rúcula e trigo relativas às amostras de TDH para 0, 4 e 8 dias, são observadas através do índice de germinação relativa (Equação 01) e do índice de alongamento relativo (Equação 02) apresentado pelas sementes (Figura 05). A comparação entre efluente não tratado com ou sem contaminação indica um efeito negativo sobre a germinação e o alongamento radicular, com redução progressiva desses parâmetros. A presença de cafeína, contudo, gera respostas distintas entre as espécies: no trigo, se observa efeito estimulante, atenuando as perdas no desenvolvimento, enquanto a rúcula apresenta maior sensibilidade, com estímulo apenas em baixas concentrações (50%) e redução acentuada dos parâmetros em concentrações integrais, com quedas de até 27% na germinação e 47% no alongamento radicular, em relação ao controle.

$$IGR = \frac{(N° \text{ de sementes germinadas no controle} - N° \text{ de sementes germinadas na amostra})}{(N° \text{ de sementes germinadas no controle})} \quad (01)$$

$$IRAR = 100 - \left(\frac{(\text{Média do alongamento da raiz na amostra} \times 100)}{(\text{Média do alongamento da raiz no controle})}\right) \quad (02)$$

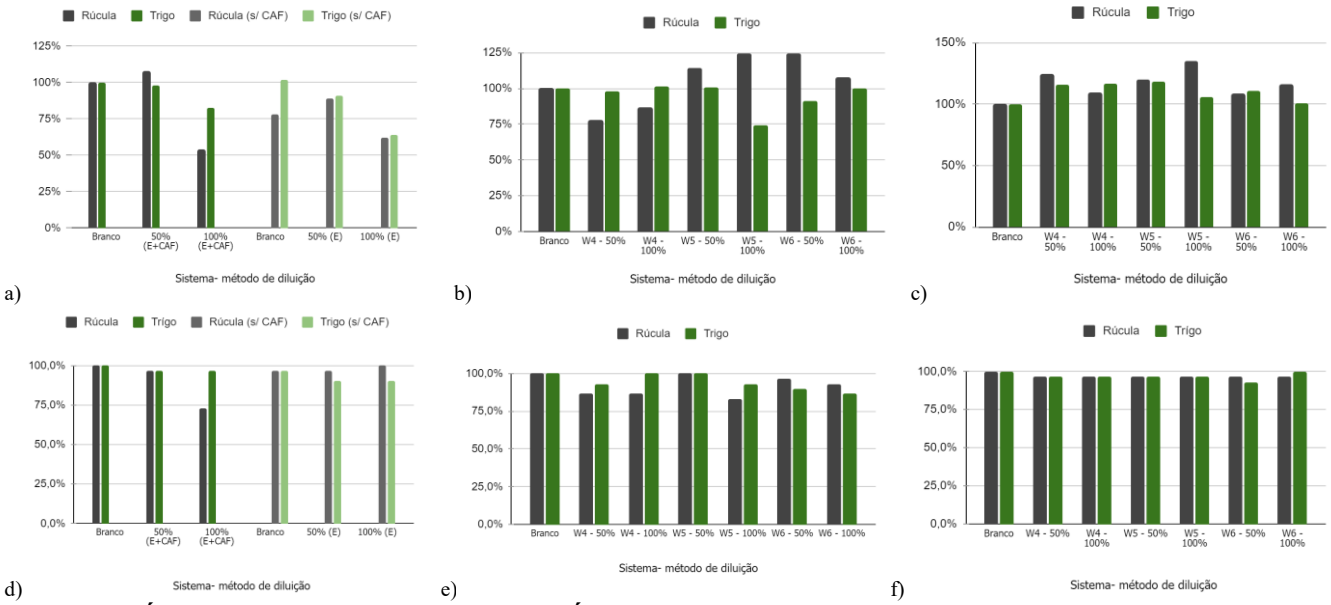


Figura 05: Índice de Alongamento Relativo (a) e Índice de Germinação Relativa (d) para a exposição pré-tratamento; Índice de Alongamento Relativo (b-c) e Índice de Germinação Relativa (e-f) para a exposição pós-tratamento. Fonte: Autoras (2024)

Para o trigo, o principal impacto foi observado na *W*5, com redução de 26% no alongamento radicular. Após 8 dias, ambas as espécies apresentaram respostas positivas no alongamento radicular, indicando redução da toxicidade do efluente tratado. O melhor desempenho foi observado para na *W4* e *W*5, enquanto a *W*6 apresentou leve efeito negativo na germinação (redução de 7%). De forma geral, a *W*5 destacou-se como o sistema mais eficiente, com menor toxicidade e maior estímulo ao desenvolvimento radicular, atingindo incremento de até 35% para sementes de rúcula, inclusive superior ao controle.

Comentários finais

As *WCs* estudadas apresentaram eficiência de tratamento satisfatória, atingindo valores de DQO inferiores a 200 $mg\ L^{-1}$, em conformidade com o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Observou-se, ainda, que esses sistemas constituem uma alternativa de baixo custo e elevada eficiência de tratamento, com melhora progressiva do desempenho ao longo do tempo de tratamento, com capacidade de alcançar padrões mais restritivos que os apresentados. Além disso, as *WC*s demonstraram eficiência de remoção da cafeína anidra próxima a 100% com apenas 8 dias de operação, evidenciando ser sistema eficiente para resolução dos problemas de contaminação em corpos hídricos decorrentes de lançamento de esgoto não tratado, uma vez que, esse sistema é acessível e pode ser empregado em regiões que não possuem sistema de coleta e tratamento de esgoto público, atuando para diminuir aspectos de racismo ambiental e os impactos negativos no meio ambiente.

Agradecimentos

As autoras gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT -UNICAMP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 - pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Relatório de conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2021*. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/ana. Acesso em: 27 out. 2025.

MONTGOMERY, Douglas C. Design and analysis of experiments. Hoboken: Wiley, 2019.

APHA – American Public Health Association. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington, D.C.: APHA, 2012.

ARREDONDO, A. et al. Toxicity and removal of pharmaceutical and personal care products: a laboratory scale study with tropical plants for treatment wetlands. *Water Science and Technology*, v. 85, n. 7, p. 2240–2253, 2022. DOI: 10.2166/wst.2022.099.

BERNEGOSSI, A. C. Efeito tóxico da cafeína sobre o ciclo de vida de *Chironomus sancticaroli* (Diptera: Chironomidae) e

Daphnia magna (Cladocera: Daphnidae). 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. DOI: 10.11606/D.18.2019.tde-23052019-104725.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 16 maio 2011.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Contaminantes emergentes nas águas: fármacos, hormônios e produtos de cuidado pessoal*. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br. Acesso em: 27 out. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo – 2020*. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores. Acesso em: 27 out. 2025.

CHAND, N. et al. Removal of pharmaceuticals by vertical flow constructed wetland with different configurations: effect of inlet load and biochar addition in the substrate. *Chemosphere*, v. 307, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522024687. Acesso em: 16 mar. 2024.

CRUZ, D. Caffeine impacts in the clam *Ruditapes philippinarum*: alterations on energy reserves, metabolic activity and oxidative stress biomarkers. *Chemosphere*, v. 106, p. 95–103, 2016. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.06.066.

GOGATE, P. R.; PANDIT, A. B. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances in Environmental Research*, v. 11, p. 1–25, 2021.

KATAKI, S.; PANDA, J. P.; DAS, S.; JENA, S. K.; MOHANTY, S. K. Constructed wetland: components, mechanisms, and applications. *Journal of Environmental Management*, v. 288, p. 112448, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112448.

MUIR, D. et al. Bioaccumulation of pharmaceuticals and personal care product chemicals in fish exposed to wastewater effluent in an urban wetland. *Scientific Reports*, v. 7, p. 16999, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-15462-x.

NAM, S.-W. et al. Adsorption characteristics of selected pharmaceuticals to granular activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, v. 344, p. 1139–1147, 2018.

RIBEIRO, A. R. et al. Removal of pharmaceuticals in water by adsorption using activated carbon: a review. *Science of the Total Environment*, v. 709, p. 136–148, 2020.

RIZZO, L. et al. Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: a review. *Science of the Total Environment*, v. 447, p. 345–360, 2019.

RODRIGUEZ-NARVAEZ, O. M. et al. Treatment technologies for emerging contaminants in water: a review. *Chemical Engineering Journal*, v. 323, p. 361–380, 2017.

SÁNCHEZ, M. et al. Removal of emerging pollutants by a 3-step system: hybrid digester, vertical flow constructed wetland and photodegradation post-treatments. *Science of the Total Environment*, v. 842, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156750.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, n. 3-4, p. 591–611, 1965.

TORRES, P. Desempenho de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) de bancada no tratamento de substrato sintético simulando esgotos sanitários. 1992. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/000735964. Acesso em: 01 ago. 2024.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters*. Washington, D.C., 2000. Disponível em: https://www.epa.gov. Acesso em: 27 out. 2025.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Ecological effects test guidelines OPPTS 850.4200 – seed germination/root elongation toxicity test*. Washington, D.C., 1996. Disponível em: https://www.epa.gov. Acesso em: 27 out. 2025.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Pharmaceuticals and personal care products in water: technical fact sheet*. Washington, D.C.: USEPA, 2019. Disponível em: https://www.epa.gov. Acesso em: 27 out. 2025.

APLICAÇÕES DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA EM TECNOLOGIAS DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

1Tuanne Carvalho Nunes; 2Ricardo Henrique Kretzmann; 3Ênio Leandro Machado; 4Carlos Alexandre Lutterbeck; 5Alexandre Rieger.

1Universidade de santa Cruz do Sul, e-mail:carvalho3@mx2.unisc.br; 2Universidade de santa Cruz do Sul, e-mail:ricardohkretzmann@mx2.unisc.br; 3Universidade de santa Cruz do Sul, e-mail: enio@unisc.br; 4Universidade de santa Cruz do Sul, e-mail: carlosalexandre@unisc.br; 5Universidade de santa Cruz do Sul, e-mail: rieger@unisc.br.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes; Micropoluentes; Indicadores ambientais.

Resumo:

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são alternativas promissoras para a remoção de contaminantes emergentes em águas residuárias, uma vez que as estações de tratamento convencionais não conseguem degradar esses poluentes. Apesar do elevado potencial do tratamento, os POAs precisam ser analisados por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para garantir a sua sustentabilidade, quantificando possíveis impactos negativos e buscando soluções. Portanto, o objetivo desse trabalho é analisar a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em estudos sobre Processos Oxidativos Avançados (POAs) voltados ao tratamento de águas residuárias. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática e bibliométrica utilizando a base Scopus, onde foram selecionados 23 artigos publicados entre 2005 e 2025. Os resultados demonstraram que as publicações sobre esse contexto são escassas e recentes, se intensificando a partir de 2019. Os artigos também indicam que a maioria das pesquisas sobre POAs ainda ocorrem em escala laboratorial ou piloto, com poucos estudos *in situ*. Dentre os POAs, os processos Fenton e seus derivados apresentaram maior recorrência com 36,17% das publicações, seguido pela fotocatálise e a ozonização. Quanto à metodologia de ACV, o método ReCiPe e as normas ISO 14040/14044 foram predominantes, com o USEtox sendo utilizado para análises de toxicidade. O consumo de energia elétrica foi identificado como o maior indicador de impacto ambiental e o ponto crítico dos processos. Desse modo, conclui-se que a integração entre POAs e ACV é uma estratégia importante para a tomada de decisões em relação ao tratamento de águas residuárias, pois permite identificar que a utilização de energias renováveis, como a energia solar pode mitigar esse impacto ambiental. No entanto, ainda existem lacunas significativas que precisam ser exploradas devido à escassez de trabalhos sobre esse contexto. A transição para a escala industrial e a padronização de indicadores voltados aos micropoluentes, são áreas importantes que podem direcionar futuros estudos.

Introdução

As estações convencionais de tratamento de águas residuárias não estão preparadas para realizar a remoção de contaminantes emergentes (ALVES; STREIT; PIZZOLATO, 2023). De acordo com Martins *et al*. (2021), nas últimas décadas houve uma tendência crescente no desenvolvimento de pesquisas sobre tecnologias eficazes para remover contaminantes persistentes das águas residuárias. Dentre as tecnologias, evidenciam-se os Processos Oxidativos Avançados (POAs), que geram radicais hidroxila e são capazes de remover substâncias químicas persistentes das águas residuárias por meio da oxidação (MARTINS *et al.* 2021).

Segundo Martins *et al*. (2021), os POAs são métodos que demonstram eficiência para degradar componentes persistentes que os tratamentos convencionais não conseguem remover. De acordo com Zhu *et al.* (2025), os POAs utilizam reativos oxidantes como o ozônio, peróxido de hidrogênio, persulfato e peroximonossulfato por exemplo, que podem ser auxiliados por processos térmicos, como a fotólise, eletrólise e o uso de catalisadores que potencializam os reativos de oxigênio e geram diferentes processos oxidativos. A finalidade desses processos é a mineralização de compostos para transformá-los em dióxido de carbono e água (ULUÇTAN *et al*. 2025).

Uluçtan *et al.* (2025), afirmam que os POAs em comparação aos sistemas de tratamento convencionais, são capazes de remover a toxicidade de compostos que geram danos ao meio ambiente e à saúde humana. Os Processos Oxidativos Avançados podem ser integrados aos métodos convencionais, como uma alternativa interessante principalmente de pós- tratamento. Porém, para implementar essa tecnologia os impactos ambientais que esses sistemas podem gerar devem ser avaliados (LUTTERBECK *et al.,* 2020).

De acordo com Lutterbeck *et al*. (2020), a Avaliação de Ciclo de Vida é uma ferramenta muito importante na tomada de decisão para determinar qual a alternativa mais apropriada para o tratamento de águas residuárias. Ela é uma metodologia objetiva e padronizada aplicada para avaliar os impactos ambientais dos processos e produtos (ZHANG *et al.* 2021). Além de ser bem desenvolvida e amplamente aplicada (LUTTERBECK *et al.,* 2020).

Esse método de avaliação, quantifica fatores de impacto ambiental e permite uma análise que compara materiais e energia em diferentes dimensões, o que facilita a identificação de problemas ambientais e auxilia na escolha da melhor tecnologia para minimizar esses impactos (COROMINAS *et al.,* 2020). Desse modo, o objetivo desse trabalho é analisar a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em estudos sobre Processos Oxidativos Avançados (POAs) voltados ao tratamento de águas residuárias.

Metodologia

Para a construção desse trabalho, realizou-se uma revisão sistemática a fim de responder o problema de pesquisa referente à evolução dos estudos sobre a aplicação de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em tecnologias de Processos Oxidativos Avançados (POAs), voltados ao tratamento de águas residuárias. Conforme Grant & Brootht (2009), a revisão sistemática de literatura, procura, avalia e sintetiza dados de uma pesquisa, realizando recomendações para futuros estudos. A metodologia empregada seguiu o passo-a-passo exposto por Gohr *et al.* 2013, os quais relatam que a revisão sistemática de literatura contribui para o desenvolvimento da ciência.

Quanto à análise bibliométrica, foi utilizada a base de dados da Scopus, para analisar as produções científicas associadas ao problema de pesquisa. Conforme Zhu & Liu (2020), a Scopus é reconhecida como uma das principais bases de dados científicos, sendo bem aceita e respeitada pela comunidade científica, devido a sua ampla cobertura de periódicos. Desse modo, a análise bibliométrica empregou os termos "AOPs" AND "*Life Cycle Assessment*", onde incialmente foram encontrados 53 documentos. Então, com a finalidade de refinar os resultados e alinhar a busca com enfoque no tratamento de águas residuárias, aplicou-se o filtro pela palavra-chave "*wastewater treatment*", que resultou em 25 publicações.

Com o objetivo de organizar, avaliar as produções científicas e auxiliar na discussão deste trabalho, foi elaborada uma tabela contendo as principais informações de cada documento. Essas informações incluem o tipo de POA empregado, a escala de aplicação da tecnologia e os resultados mediante a aplicação da ACV, selecionadas conforme os elementos recorrentes observados nos estudos analisados. Para garantir a efetividade da seleção, estabeleceram- se critérios de exclusão, desconsiderando-se os trabalhos que não abordavam ACV ou o tratamento de águas residuárias. Após essa etapa, definiu-se um conjunto final de 23 estudos, que serviu de base para o desenvolvimento dos resultados.

Resultados e Discussão

A partir da análise bibliométrica que obteve 23 trabalhos, o gráfico 01 expressa a distribuição temporal dos documentos analisados sobre a aplicação de ACV em POAs para o tratamento de águas residuárias, considerando os anos de publicação, que variam entre 2005 e 2025.

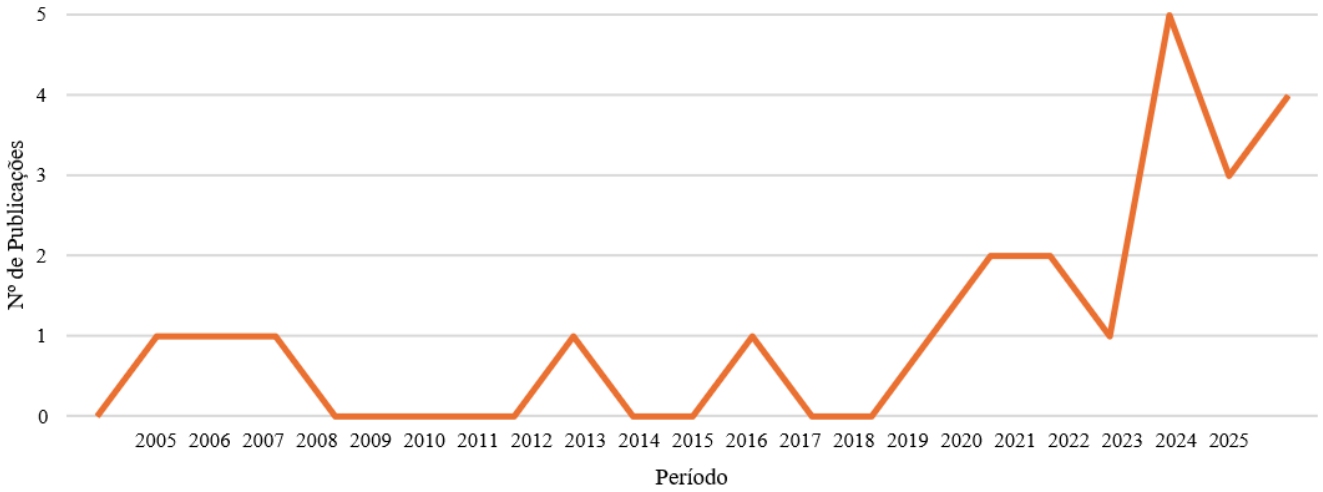


Gráfico 01: Distribuição temporal das publicações (2005-2025). Fonte: autores (2025).

O primeiro estudo foi publicado por MUÑOZ *et al.* (2006), onde foi realizado ACV para comparar diferentes POAs aplicados para remover a proporção de carbono dissolvido de um efluente oriundo do branqueamento de celulose Kraft. A partir de 2019, as pesquisas intensificam o ritmo de publicações, o que demonstra o interesse recente e a pouca quantidade de trabalhos sobre a aplicação de ACV na tecnologia de POAs para o tratamento de águas residuárias. De acordo com Rodríguez *et al.* 2016, o uso de ACV para avaliar POAs é relatado de forma escassa na literatura, embora essa ferramenta forneça uma aproximação sistemática de mudanças ambientais vinculadas ao tratamento com POAs, com dados sobre o consumo, as emissões e as influências a saúde humana. Li *et al.* 2025, afirmam que a ACV é um instrumento importante para avaliar a sustentabilidade de tecnologias associadas ao tratamento de água, no entanto, quando se trata da aplicação de POAs os estudos ainda permanecem pouco explorados.

A partir do gráfico 02, pode-se observar que os estudos são implementados predominantemente em escala laboratorial, seguido da escala piloto e com pouca aplicação de pesquisas *in situ*. Esse padrão sugere que há carência de investigações.

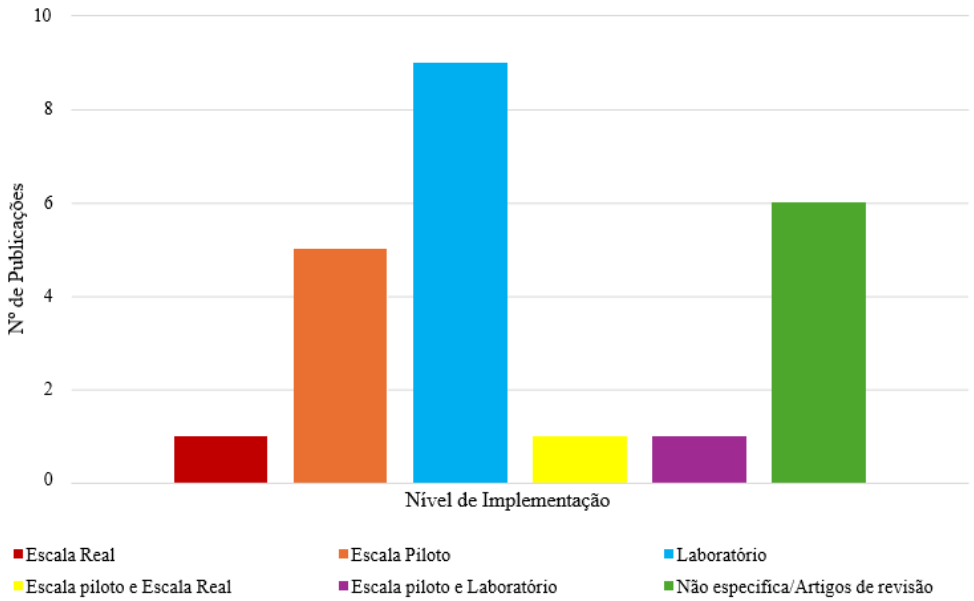


Gráfico 02: Relação entre o quantitativo de publicações e o nível de implementação dos estudos. Fonte: autores (2025).

De acordo com Ma *et al.* (2025), a literatura apresenta lacunas significativas entre as pesquisas em laboratório e as aplicações práticas. Isso é demonstrado por meio da predominância de estudos químicos sobre o tratamento de águas residuárias industriais e a falta de investigações no nível de implementação de escala piloto (MA *et al*., 2025).

Um exemplo citado por Shokri *et al*. (2023), é o sistema eletro-Fenton, que já demonstrou viabilidade e potencial de aplicação em escala piloto na indústria. Contudo, como a maioria das pesquisas ainda está restrita à escala laboratorial, os estudos em escala piloto permanecem limitados. De acordo com Feijo *et al.* (2023), os POAs apresentam potencial de implementação. No entanto, é necessário realizar experimentos em escala ampliada, com ênfase na mitigação de impactos causados pelos equipamentos que consomem energia para o tratamento de águas residuárias (FEIJO *et al.* 2023).

Segundo Clímaco *et al*. (2024), em relação ao ACV, tanto o impacto ambiental quanto o custo identificado podem ser utilizados para selecionar ou dimensionar POAs na escala de um projeto. Shokri *et al.* (2023), relata que a implementação e comercialização da tecnologia eletro-Fenton seria uma meta realista se houvessem mais pesquisas científicas que investigassem as limitações desse processo. Dentre as limitações pode-se citar a ampliação da escala laboratorial para industrial, a interação desse método com outras tecnologias de tratamento, ACV mais assertivo e voltado as pegadas ambientais, entre outras lacunas (SHOKRI *et al.,* 2023).

De acordo com Lu *et al*. (2024), os desafios dessa área exigem avanço tecnológico para promover aplicações em larga escala no futuro. Desse modo, a finalidade desses esforços é aumentar a capacidade dos POAs para o tratamento de águas residuárias (LU *et al.,* 2024). Apesar das limitações, a Alemanha e a Suíça são países que já implementaram POAs em larga escala, principalmente quando se trata de ozonização e carvão ativado em pó (PESQUEIRA *et al*, 2022).

Tipo de POA	Frequência de citações %
Processos Fenton e derivados	36,17%
Fotocálise (TiO2 e variações)	12,77%
Eletroquímicos	6,38%
Processos de Fotólise	6,38%
Adsorção por carvão ativado	2,13%
Ligação sílico-oxigênio	2,13%
Oxidação por ar úmido	2,13%
Ozônio	10,64%
Peroxidissulfato ativado por UV (PDS)	2,13%
Peróxido de Hidrogênio H2O2	4,26%
Peroximonossulfato (PMS)	6,38%
Persulfato	6,38%
TiO 2	2,13%

Tabela 01: Frequência de citações de POAs nos trabalhos. Fonte: autores (2025).

Além das escalas de implementação, na Tabela 01 estão representados os tipos de POAs mais recorrentes nos estudos analisados. A maioria dos trabalhos realizou comparações entre diferentes POAs para verificar qual apresentava maior eficiência, aplicando a ACV ao processo de tratamento de águas residuárias. Foram identificadas 47 citações de diferentes POAs entre os 23 artigos analisados, considerando que em alguns trabalhos foi aplicado mais de um processo simultaneamente ou em comparação. Os Processos de Fenton e seus derivados, foram os POAs mais utilizados ao longo das publicações, estando presente em (36,17%) das citações. Essa porcentagem de citações pode sugerir maior disponibilidade de dados de inventário, o que facilita a aplicação de metodologia de ACV se comparado a outras tecnologias com menos registro de consumo.

Em seguida, houve destaque para a fotocatálise utilizando TiO_2 (12,77%) e a aplicação de ozônio (10,64%). No entanto, ainda há um distanciamento no percentual em comparação aos processos de Fenton, evidenciando que embora a fotocatálise com TiO_2 e o ozônio sejam tecnologias robustas, ainda são POAs que necessitam de avaliação ambiental sistemática. Os demais processos como os eletroquímicos, fotólises, peroximonossulfato e persufato obtiveram frequências intermediárias com 6,38% cada. Enquanto a adsorção por carvão ativado, ligação sílico-oxigênio, oxidação por ar úmido, peroxidissulfato ativado por UV, H_2O_2 isolado e TiO_2 tiveram uma representatividade baixa (<5%), indicando lacunas que carecem da aplicação de ACV nesses processos.

É importante salientar que a escolha de um POA depende do tipo de efluente e do contaminante a ser removido. Nesse trabalho, a análise de literatura permitiu identificar os tipos de águas residuárias mais frequentes, com destaque para a aplicação de POAs como tratamento terciário em ETEs (35%), o que reforça a capacidade dos POAs como uma alternativa de polimento final para tratamento de águas residuárias. Dentre as citações, também é predominante a frequência de efluente simulado (22%), o que pode indicar que as aplicações do ACV em POAs ainda ocorrem em menor escala e carecem de pesquisas contínuas. As águas residuárias de origem farmacêutica obtiveram 13% de frequência, esse dado demonstra que os estudos de ACV em POAs estão concentrados em águas residuárias de alta complexidade e toxicidade, onde a demanda por processos de oxidação é maior.

Uma vez identificados os POAs e os tipos de águas residuárias, investigou-se também quais métodos de ACV foram empregados para avaliá-los. A seguir, o Gráfico 03 apresenta a distribuição dos tipos de metodologias de ACV mais recorrentes nas pesquisas analisadas.

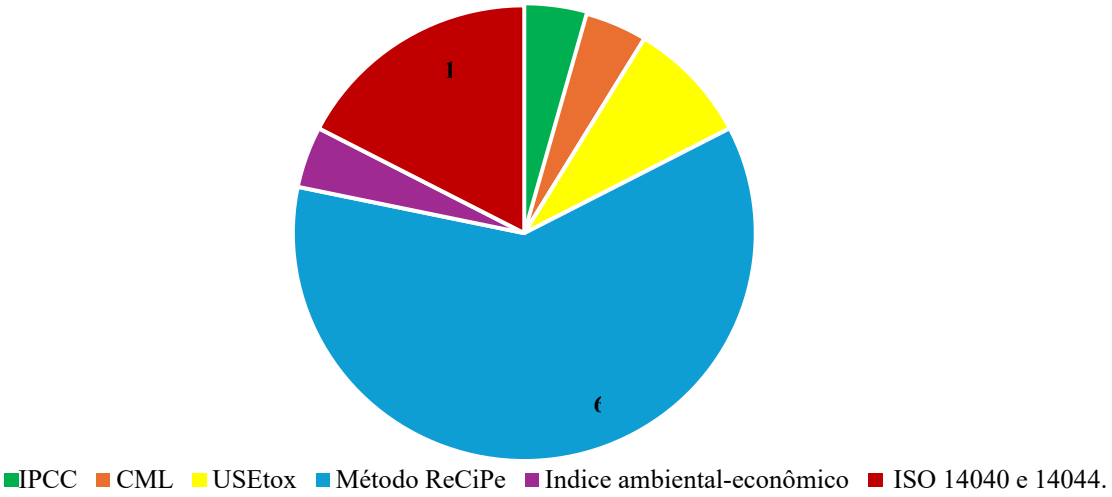


Gráfico 03: Métodos e Indicadores ACV. Fonte: autores (2025).

Conforme indicado no gráfico 03, o ReCiPe foi o método de ACV mais utilizado nos trabalhos selecionados. As normas ISO 14040 e 14044 também foram citadas frequentemente como base de aplicação para as publicações, enquanto o método USEtox, empregado em avaliações de toxicidade, obteve destaque como abordagem complementar. Um dado interessante evidenciado pelo gráfico 03 é a expressiva recorrência da citação das normas ISO 14040 e 14044 (17%). Vale salientar que essas normas fundamentam a ACV mas não são uma forma de calcular as categorias de impacto. A presença da citação dessas normas e do método ReCiPe pode sugerir uma sobreposição de citações, o que pode indicar que as pesquisas se basearam na ISO para estruturar a pesquisa e adotaram o método ReCiPe para cálculo de impactos ambientais. Essa situação reforça a necessidade de clareza nas publicações, principalmente quando se trata de citar a ferramenta analítica utilizada para análise de impacto ambiental.

Segundo Li *et al.* (2025), o método ReCiPe é amplamente aplicado em pesquisas de ACV, sendo muito abrangente e inclui um conjunto de categorias de impacto, que compreendem muitos critérios ambientais para avaliar a sustentabilidade. De modo analítico, o ReCiPe pode transformar os resultados do inventário de ciclo de vida (LCI) em uma pontuação, que indica a categoria de impacto ao meio ambiente facilitando a sua compreensão (CHATZISYMEON *et al*., 2013).

O modelo ReCiPe é encontrado na literatura para a avaliação de estações de tratamento de águas residuais, inclusive nos poucos trabalhos que citam os POAs (RODRÍGUEZ *et al.,* 2016). Já o USEtox é uma metodologia de ACV reconhecida e projetada especificamente para a avaliação de toxicidade. Sua principal vantagem é incluir informações sobre micropoluentes, aspecto não considerado pelo modelo ReCiPe (PESQUEIRA *et al,* 2022).

Para compreender como esses métodos foram aplicados, realizou-se uma análise sobre quais os indicadores ambientais foram mais abordados nas pesquisas. Desse modo, a tabela 02, é um compilado dos principais resultados referentes aos indicadores de impactos ambientais analisados nos trabalhos científicos. Com base nesses dados é possível constatar que o indicador de consumo de energia elétrica foi amplamente citado nos estudos como causador de impacto ambiental em metodologias com aplicação simultânea e comparativa de POAs.

	Resultados - Indicadores de Impacto Ambiental Mais Citados							
Autores	**Aquecimento Global**	**Pegada Hídrica**	**Energia Elétrica**	**Emissão de CO_2**	**Esgotamento de Recursos**	**Material Particulado**	**Toxicidade**	**Sem citação**
MUÑOZ *et al.,* (2006)			x					
MUÑOZ *et al.*, (2007)			x					
MUÑOZ et al., (2008)			x					
CHATZISYMEON *et al.*, (2013)			x	x	x			
RODRÍGUEZ *et al.*, (2016)		x						
ARZATE *et al., (*2019)								x
SBARDELLA *et al.,* (2020)			x				x	
SAN-ROMÁN *et al.,* (2020)							x	
MAGDY *et al.,* (2021)	x		x		x		x	
PESQUEIRA, J. F. J. R.; PEREIRA, M. F. R.; SILVA, A. M. T. (2021)			x					
PESQUEIRA *et al*., (2022)			x					
MANIAKOVA *et al*., (2023)								x
WANG *et al*., (2023)				x		x		
SHOKRI.; NASERNEJAD; SANAVI. (2023)								x
NOTARNICOLA *et al.* (2023)			x					
FEIJO *et al.* (2023)								x
LU *et al.* (2024)								x
DOGAN *et al*., (2024)			x					
CLÍMACO *et al*, (2024)								x
SALAZAR-SOGAMOSO; GÓMES-GARCÍA; DOBROSZ-GÓMEZ, (2025)			x					
TIAN *et al.* (2025)								x
MA *et al.* (2025)			x					
LI *et al.* (2025)			x					

Tabela 02: Indicadores ambientais presentes nos resultados dos artigos. Fonte: autores (2025).

Os resultados do estudo desenvolvido por Dogan *et al*. (2024), indicam que o consumo energético contribuiu para todas as categorias de impacto ambiental. Contudo, a energia elétrica é um parâmetro importante e seu impacto ambiental pode ser minimizado em quase todas as categorias de *endpoint*, uma vez que se utilize por alternativas de energia limpa (PESQUEIRA *et al.,* 2022). Embora os POAs sejam métodos eficientes e vantajosos, autores como Notarnicola *et al.* (2023) ressaltam a importância de compreender suas limitações e impactos para que os sistemas sejam aprimorados. A energia solar é apontada nos estudos como uma importante alternativa para dar continuidade às pesquisas com POAs e diminuir o impacto ambiental. Esse tipo de energia limpa explora as vantagens de remoção de contaminantes que os Processos Oxidativos avançados realizam, também, a energia solar é preferível sob o aspecto ambiental-econômico (MUÑOZ *et al.* 2006; MUÑOZ *et al.* 2007; MUÑOZ *et al*, 2008).

Além disso, vale destacar a importância da pegada hídrica como um parâmetro complementar ao ACV, principalmente quando se trata da comparação de POAs no tratamento de águas residuais, considerando que existem poucos trabalhos na literatura que utilizam esse indicador nesse contexto (RODRÍGUEZ *et al*., 2016).

Ao relacionar as tabelas 01 e 02, pode ser observado que apesar dos indicadores de impacto, entre os estudos que compararam POAs, os Processos de Fenton e Derivados (tabela 01) se destacaram como os mais promissores e com menor impacto ambiental. Esse destaque também pode ter ocorrido, porque essa tecnologia é a que aparece com mais frequência entre as publicações, sendo a mais estudada.

Estudos realizados por de Muñoz *et al.* (2007) e Muñoz *et al.* (2008), indicam que o processo de foto-Fenton acionado por energia solar é a tecnologia que obtêm menores impactos ambientais. Essa informação também é corroborada com o trabalho desenvolvido por Magdy *et al*. (2021). No entanto, os autores afirmam que ao comparar com um processo de adsorção, o processo de Fenton é mais caro. Conforme o estudo de Rodríguez *et al* (2016), que compara os processos Fenton homogêneos e heterogêneos, foi constatado que o processo heterogêneo é uma alternativa mais ambientalmente amigável no processo de tratamento de águas residuárias da indústria farmacêutica. Também, foi observado que esse tipo de processo reduz a pegada hídrica em 77% ao comparar com o processo Fenton homogêneo (RODRÍGUEZ *et al.,* 2016).

Outros publicações também observaram menor impacto ambiental em outras tecnologias de POAs como a eletrooxidação em um estudo feito por Chatzisymeon *et al*. (2013) e a utilização de peróxido de hidrogênio H_2O_2 em um trabalho desenvolvido por Pesqueira *et al*., (2022).

Outro ponto relevante observado na tabela 2, foi a presença de estudos que não mencionaram diretamente impactos ambientais em seus resultados relacionados à ACV. Isso ocorreu devido à inclusão de artigos de revisão e de trabalhos que adotaram abordagens voltadas a propor soluções para pesquisas futuras, sem explorar diretamente os indicadores ambientais. Um exemplo disso é o estudo desenvolvido por Arzate *et al.* (2019), que descreve as limitações do método de ACV para avaliar o impacto de micropoluentes. Devido a isso, há muita incerteza quanto a utilização de ACV nesse sentido, sendo necessário a ampliação de pesquisas de aprimoramento (ARZATE *et al*., 2019).

Wang *et al.* (2023), diz que a utilização de ACV apoia a seleção de processos de tratamento de águas residuais e contribui para a melhoria e desenvolvimento dessas tecnologias. Clímaco *et al*. (2024), valida a necessidade de mais estudos, e relata que é importante escolher de forma adequada as categorias de impacto para a avaliação ambiental. Assim como, é fundamental o estabelecimento de um método de análise de custos, para tornar a abordagem mais abrangente, eficaz e aplicável (CLÍMACO et al, 2024).

Considerações Finais

Por meio deste estudo, constatou-se que as pesquisas sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada a Processos Oxidativos Avançados (POAs) são recentes e concentram-se predominantemente em escalas laboratoriais e piloto, com escassez de estudos *in situ*. Entre os POAs analisados, destacaram-se os processos Fenton e derivados, sendo a tecnologia mais estudada e com resultados considerados positivos em relação aos indicadores ambientais.

Quanto às metodologias de ACV, o ReCiPe foi o método mais empregado, seguido das normas ISO 14040 e 14044, utilizadas como base em alguns trabalhos, e do USEtox, voltado a avaliações complementares de toxicidade. Os estudos também evidenciaram que o consumo de energia é o indicador ambiental mais relevante em relação aos POAs. Apesar da diversidade metodológica, muitos trabalhos apontam limitações quanto à aplicação prática em condições reais, uma vez que a maioria das investigações permanece em ambientes controlados. Por fim, conclui-se que a integração entre POAs e ACV representa uma ferramenta promissora para a avaliação do tratamento de águas residuárias. Entretanto, para que os POAs se consolidem como uma tecnologia limpa, é essencial ampliar as pesquisas sobre essa temática.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental (PPGTA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências Bibliográficas

ALVES, M. S; STREIT, L; PIZZOLATO, T. M. Utilização de modelos in sílico para avaliação da toxicidade de resíduos agrotóxicos, fármacos e metabólitos em águas naturais. **Quim. Nova.** Vol. 46, n. 9.

ARAÚJO, B. A; SOUZA, J. E. S; SARMENTO, K. K. F; REBOUÇAS, L. D; MEDEIROS, K. M; LIMA, C. A. P. Processos oxidativos avançados aplicados no tratamento de efluentes da produção de membranas: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, e27210414253, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.14253.

ARZATE, S.; PFISTER, S.; OBERSCHELP, C.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. A. Environmental impacts of an advanced oxidation process as tertiary treatment in a wastewater treatment plant. Science of The Total Environment, v. 694, 133572, 1 dez. 2019.

CHATZISYMEON, E.; FOT EINIS, S.; MANTZAVINOS, D.; TSOUTSOS, T. Life cycle assessment of advanced oxidation processes for olive mill wastewater treatment. **Journal of Cleaner Production,** v. 54, p. 229–234, set. 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.05.013.

CLÍMACO CUNHA, Isadora Luiza; MACHADO, Pedro Gerber; RIBEIRO, Celma de Oliveira; KULAY, Luiz. Bibliometric analysis of Advanced Oxidation Processes studies with a focus on Life Cycle Assessment and Costs. **Environmental Science and Pollution Research,** v. 31, n. 15, p. 22319–22338, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-32558-w.

COROMINAS, L. D. M; BYRNE, J. S; GUEST, A; HOSPIDO, P; ROUX, A; SHAW, M. D. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: a best practice guide and critical review. **Water Res**., 184 (2020), article 116058.

DOGAN, K.; TURKMEN, B. A.; ARSLAN-ALATON, I.; GERMIRLI BABUNA, F. Life cycle assessment as a decision-making tool for photochemical treatment of iprodione fungicide from wastewater. **Water,** v. 16, n. 8, art. n. 1183, 2024. DOI: 10.3390/w16081183.

FEIJOO, Sara; ESTÉVEZ, Sofía; KAMALI, Mohammadreza; DEWIL, Raf; MOREIRA, María Teresa. Scale-up modelling and life cycle assessment of electrochemical oxidation in wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal,** v. 455, p. 140627, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140627.

GOHR, C. F.; SANTOS, L. C.; GONÇALVES, A. M. C.; PINTO, N. O. (2013). Um método para a revisão sistemática da literatura em pesquisas de engenharia de produção. *XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Anais. Salvador, BA.

GRANT, M. J; BOOTH, A. (2009), A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health Information & Libraries Journal,** 26: 91-108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x.

LI, Yu-Qi; FAN, Yu-Han; MA, Jun; CHEN, Ming. Life cycle assessment-guided development of iron-based biomass catalyst for sustainable tetracycline degradation. **Process Safety and Environmental Protection,** v. 198, p. 107193, jun. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107193.

LU, Haoyun; HOU, Lifei; ZHANG, Yang; CAO, Xiaoqiang; XU, Xing; SHANG, Yanan. Pilot-scale and large-scale Fenton-like applications with nano-metal catalysts: From catalytic modules to scale-up applications. **Water Research,** v. 266, p. 122425, 2024. DOI:https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122425.

LUTTERBECK, C. A; COLARES, G. S; DELL'OSBEL, N; DA SILVA, F. P; KIST, L. T; MACHADO, Ê. L. Hospital laundry wastewater: A review on treatment alternatives, life cycle assessment and prognosis scenarios. **Journal of Cleaner Production,** v. 273, art. N.122851, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122851.

MA, Chao; ZHANG, Huiqin; LIU, Ziwei; MENG, Xinran; CHEN, Sijia; ZHANG, Jingsong; LI, Yeqiang; HUANG, Xia. Treatment options of nitrogen heterocyclic compounds in industrial wastewater: From fundamental technologies to energy valorization applications and future process design strategies. **Water Research,** v. 281, p.123575, 1 ago.2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.123575. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135425004889.

MAGDY, M.; GAR ALALM, M.; EL-ETRIBY, H. K. Comparative life cycle assessment of five chemical methods for removal of phenol and its transformation products. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, art. n. 125923, jan. 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125923.

MANIAKOVA, G.; POLO-LÓPEZ, M. I.; OLLER, I.; MALATO, S.; RIZZO, L. Ozonation vs sequential solar driven processes as simultaneous tertiary and quaternary treatments of urban wastewater: A life cycle assessment comparison. **Journal of Cleaner Production**, v. 413, art. n. 137507, 10 ago. 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137507.

MARTINS, T. A; ALMEIDA, M.C; LOPES, I. C. G; MORENO, I.F; OLIVEIRA, T. F. Agroindustrial Sustainability: Advanced Oxidative Processes (AOP) using Brazilian biosorbents, **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, e27310512830, 2021. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v-10i5.12830.

MUÑOZ, I.; MALATO, S.; RODRÍGUEZ, A.; DOMÈNECH, X. Integration of environmental and economic performance of processes: Case study on advanced oxidation processes for wastewater treatment. **Journal of Advanced Oxidation Technologies**, v. 11, n. 2, p. 270–275, jul. 2008. DOI: 10.1515/jaots-2008-0211.

MUÑOZ, I.; PERAL, J.; AYLLÓN, J. A.; MALATO, S.; MARTIN, M. J.; PERROT, J. Y.; VINCENT, M.; DOMÈNECH, X. Life-cycle assessment of a coupled advanced oxidation-biological process for wastewater treatment: Comparison with granular activated carbon adsorption. **Environmental Engineering Science,** v. 24, n. 5, p. 638–651, maio 2007. DOI: 10.1089/ees.2006.0134.

MUÑOZ, I.; RIERADEVALL, J.; TORRADES, F.; PERAL, J.; DOMÈNECH, X. Environmental assessment of different advanced oxidation processes applied to a bleaching Kraft mill effluent. **Chemosphere,** v. 62, n. 1, p. 9–16, jan. 2006. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.044.

NOTARNICOLA, Bruno; TASSIELLI, Giuseppe; RENZULLI, Pietro Alexander; DI CAPUA, Rosa; ASTUTO, Francesco; MASCOLO, Giuseppe; MURGOLO, Sapia; DE CEGLIE, Cristina; CURRI, Maria Lucia; COMPARELLI, Roberto;

DELL'EDERA, Massimo. Life Cycle Assessment of UV-C based treatment systems for the removal of compounds of emerging concern from urban wastewater. **Science of The Total Environment**, v. 857, p. 159309, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159309.

PESQUEIRA, J. F. J. R.; MARUGÁN, J.; PEREIRA, M. F. R.; SILVA, A. M. T. Selecting the most environmentally friendly oxidant for UVC degradation of micropollutants in urban wastewater by assessing life cycle impacts: Hydrogen peroxide, peroxymonosulfate or persulfate?. **Science of The Total Environment**, v. 808, 152050, 20 fev. 2022

PESQUEIRA, J. F. J. R.; PEREIRA, M. F. R.; SILVA, A. M. T. A life cycle assessment of solar-based treatments (H_2O_2, TiO_2 photocatalysis, circumneutral photo-Fenton) for the removal of organic micropollutants. **Science of The Total Environment**, v. 761, art. n. 143258, 20 mar. 2021.
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143258.

RODRÍGUEZ, R.; ESPADA, J. J.; PARIENTE, M. I.; MELERO, J. A.; MARTÍNEZ, F.; MOLINA, R. Comparative life cycle assessment (LCA) study of heterogeneous and homogenous Fenton processes for the treatment of pharmaceutical wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 21-29, 15 jun. 2016.

SALAZAR-SOGAMOSO, Luis Miguel; GÓMEZ-GARCÍA, Miguel-Ángel; DOBROSZ-GÓMEZ, Izabela. Comparative life cycle assessment of sequential chemical and electrochemical processes for the treatment of industrial textile wastewater. **Journal of Solid-State Electrochemistry,** v. 29, p. 3379–3399, 2025. DOI: 10.1007/s10008-024-05976-6.

SAN-ROMÁN, M. F.; SOLÁ-GUTIÉRREZ, C.; SCHRÖDER, S.; LASO, J.; MARGALLO, M.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; ORTIZ, I.; IRABIEN, A.; ALDACO, R. Potential formation of PCDD/Fs in triclosan wastewater treatment: An overall toxicity assessment under a life cycle approach. **Science of the Total Environment**, v. 707, art. no. 135981, mar. 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135981.

SBARDELLA, L.; VELO GALA, I.; COMAS, J.; MORERA CARBONELL, S.; RODRÍGUEZ-RODA, I.; GERNJAK, W. Integrated assessment of sulfate-based AOPs for pharmaceutical active compound removal from wastewater. **Journal of Cleaner Production,** v. 260, art. no. 121014, mar. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121014.

TIAN, Qingbai; ZHANG, Xin; CHANG, Jiale; CHEN, Dongdong; YOU, Siyuan; PENG, Xiaoming; GAO, Baoyu; SHANG, Yanan; WEI, Bo; LI, Qian; HU, Zhen; GAO, Yue; XU, Xing. Silico-oxygen bonding integrated with nano-size pore enrichment enables sustainable low-oxidant-consumption Fenton-like chemistry. **Water Research,** v. 281, p. 123550, 2025. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123550.

ULUÇTAN, P. S., EROĞLU, H. A., KADIOĞLU, E. N. & AKBAL, F. (2025). Decolorization of Acid Red 337 dye with hydroxyl and sulfate radical based advanced oxidation processes using different iron Catalyst: An experimental and statistical Investigation. **Journal of Photochemistry and Photobiology Chemistry**, 459(1), 116105.

WANG, S.; SADHUKHAN, J.; XUAN, J.; YU, Y.; MAO, X.; WANG, M.; CHEN, X.; ZHOU, X.; XING, L. Life cycle assessment and life cycle cost of sludge dewatering, conditioned with Fe^{2+}/H_2O_2, $Fe^{2+}/Ca(ClO)_2$, $Fe^{2+}/Na_2S_2O_8$, and Fe^{3+}/CaO based on pilot-scale study data. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, n. 20, p. 7798–7808, abr. 2023. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c00505.

ZHANG, L. Y. BAI, H; ZHANG, Y. W; WANG, Y; YUE, D. D. Life cycle assessment of leachate treatment strategies. Environ. Sci. Technol., 55 (19) (2021), pp.13264-13273. Zhu, J.; Liu, W. A Tale of Two Databases: The Use of Web of Science and Scopus in Academic Papers. **Scientometrics** 2020, 123, 321–335.

ZHU, Z. S., WANG, P., LIU, Y., ZHONG, S., DUAN, X., & WANG, S. (2025). Microenvironment modulation of carbon-based Single atom catalysts for advanced oxidation processes. **Environmental Functional Materials.** https://doi.org/10.1016/j.efmat.2025.01.002.

AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA RASC PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO POR MEIO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E DA ECOTOXICIDADE VISANDO REÚSO AGRÍCOLA

1 Daniel Vieira Minegatti de Oliveira, 2 Bianca Goulart de Oliveira Maia, 3 Aline Scheller Coan
1 Gayatri Saneamento, e-mail: daniel@gayatrisaneamento.com.br; 2 Universidade da Região de Joinville, e-mail: bianca.maia@univille.br; 3 Universidade da Região de Joinville, e-mail: alinescheller@univille.br

Palavras-chave: Ecotoxicidade; Reúso agrícola; Tratamento de efluente sanitário.

Resumo

O trabalho visa avaliar o desempenho da Tecnologia RASC, que é um inovador sistema para o tratamento de efluentes sanitários, em escala piloto instalado no Campus Universidade da Região de Joinville (Univille). O sistema foi monitorado dado os parâmetros físico-químicos e ecotoxicológicos para verificar a viabilidade do reúso agrícola do efluente tratado. A Tecnologia RASC consiste em três câmaras anaeróbias consecutivas, contendo suportes plásticos específicos que proporcionam áreas de superfície para formação de biomassa aderida (biofilme). O aparato experimental inclui uma estação elevatória de efluente bruto com vazão média de 0,33 L/min, promovendo um tempo de detenção hidráulica total de apenas 5 horas. Os resultados indicaram uma eficiência média na remoção de matéria orgânica (DQO e DBO) e sólidos suspensos totais (SST) de, aproximadamente, 65%, 73% e 86%, respectivamente. As análises de ecotoxicidade utilizando *Daphnia magna* revelaram que todos os resultados do efluente tratado apresentaram valores de CE_{50} entre 20% e 30%, caracterizando-os como medianamente tóxicos. Além disso, os testes de fitotoxicidade com sementes de rúcula (*Eruca sativa*), voltados principalmente para o reuso agrícola, mostraram que os valores médios do índice de germinação estiveram entre 80 e 100, indicando que o efluente tratado é não fitotóxico. Portanto, o efluente tratado pode ser aplicado com adequada diluição para reúso agrícola.

Introdução

O Brasil enfrenta desafios significativos no que se refere ao saneamento básico. Conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 62% dos municípios possuíam serviço de esgotamento sanitário por rede coletora em 2023, dos quais em torno de 52% realizavam o tratamento do esgoto coletado. Isso significa que somente 32% dos municípios brasileiros têm infraestrutura adequada para coletar e tratar esgotos. O estado de Santa Catarina, por exemplo, apresenta um dos piores índices de cobertura de rede coletora de esgoto, com apenas 36% de seu território atendido (SNIS, 2024). As áreas isoladas, periféricas e rurais, além dos municípios com recursos financeiros limitados, são particularmente afetadas pela falta de sistemas de esgotamento sanitário, o que compromete as condições básicas de saúde e aumenta a vulnerabilidade a doenças transmitidas pela água (SION, 2020). Nessas regiões, o tratamento e a disposição do esgoto frequentemente ocorrem de maneira independente, com a população utilizando predominantemente fossas sépticas rudimentares, às vezes complementadas por filtros anaeróbios e sumidouros (GUO *et al*., 2017; MOTA, 2017).

No contexto agrícola, cerca de 66% da água doce disponível no Brasil é destinada à irrigação e seu reúso não é possível, pois grande parte é perdida pela evapotranspiração das culturas (NUVOLARI, 2011). Embora o uso agrícola não seja rigoroso quanto à qualidade da água em algumas situações, o emprego de efluentes domésticos tratados é uma prática comum, especialmente em áreas urbanas próximas. No entanto, essa prática pode apresentar riscos de doenças de veiculação hídrica, em particular quando utilizada em culturas consumidas cruas (VON SPERLING, 2014).

Os nutrientes essenciais para as plantas, como nitrogênio e fósforo, presentes nos efluentes tratados, podem, em alguns casos, melhorar a produtividade agrícola e reduzir a necessidade de fertilizantes químicos, além de minimizar a contaminação de corpos d'água (NUVOLARI, 2011). Os sistemas de tratamento anaeróbio, como por exemplo o Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASB), são amplamente recomendados para aplicação agrícola de efluentes tratados devido ao baixo custo operacional, à produção de biogás e à baixa geração de lodo (VON SPERLING, 2014; CHERNICHARO, 2016).

Para garantir a conformidade do efluente tratado com os padrões regulatórios, diversas resoluções e normas, como a Resolução nº 357/2005 do CONAMA e as resoluções do CNRH nº 54/2005 e nº 121/2010, estabelecem diretrizes para o reúso direto não potável de água na agricultura. No entanto, a avaliação ecotoxicológica dos efluentes para fins de reuso ainda não é completamente abordada por essas normativas. Os ensaios ecotoxicológicos são fundamentais para avaliar o potencial impacto ambiental dos efluentes tratados, uma vez que permitem verificar a toxicidade geral do efluente e seus efeitos sobre organismos vivos em diferentes ecossistemas. Organismos-teste como *Daphnia magna* e diversas espécies vegetais são utilizados para essas avaliações, fornecendo informações cruciais para a gestão ambiental e a saúde pública (COSTA *et al*., 2008; COAN, 2019).

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de uma nova tecnologia anaeróbia em escala piloto, denominada Tecnologia RASC (Reator Anaeróbio Super Compacto), por meio de análises físico-químicas e ensaios ecotoxicológicos, visando também analisar o potencial reúso agrícola de efluente tratado.

Material e Métodos

A Tecnologia RASC em escala piloto foi instalado no campus da Univille, em Joinville/SC, que consistiu em três câmaras sequenciais e equivalentes, cada uma contendo meios de suporte, além de uma estação elevatória para recalque do

efluente sanitário até o reator. O sistema foi dimensionado para operar com uma vazão média de 0,33 L/min e um tempo de detenção hidráulica (TDH) de aproximadamente 5,0 horas. Os reatores foram construídos com tubos de Policloreto de Vinila (PVC), DN 200, e possuíam uma profundidade útil de 1,0m, como ilustrado na Figura 1. Os meios de suporte foram acomodados no interior dos reatores e fixados com o auxílio de uma tela plástica para evitar sua flutuação e arraste.

Ressalta-se que foram empregados 3 tipos de meios de suporte com áreas superficiais distintas, resultando em diferentes quantidades/volumes, com 90 m^2/m^3, 150 m^2/m^3 e 550 m^2/m^3, para primeira, segunda e terceira câmaras, respectivamente. E, o efluente sanitário utilizado foi proveniente de 4 banheiros compostos por 10 vasos sanitários e 10 lavatórios.

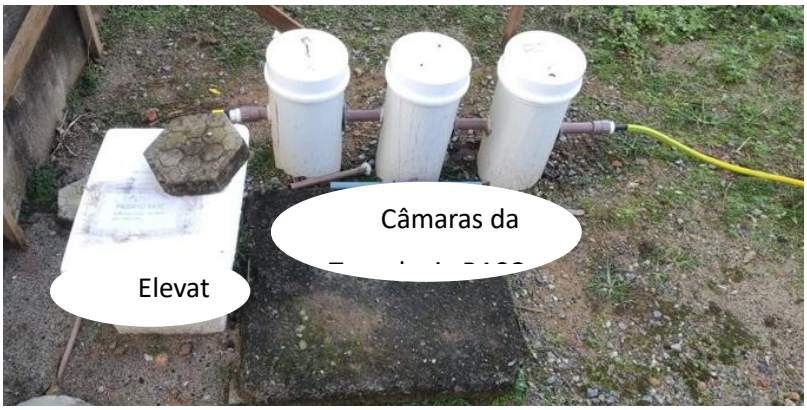


Figura 1: Vista geral do sistema de tratamento
Fonte: Autor (2022)

O estudo abrangeu o período entre os meses de abril a outubro de 2021, após o estágio de partida/aclimatação dos reatores, que perdurou por 2 meses. Foram realizados monitoramentos do efluente por meio de coletas de amostras do efluente bruto e tratado. As coletas de efluentes seguiram as normas NBR 9.898/1987 e NBR 15.469/2015. Os parâmetros físico-químicos foram: oxigênio dissolvido (OD), pH, temperatura, DBO, DQO, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e sólidos suspensos totais (SST). OD, pH e temperatura foram medidas com sonda multiparâmetro Hanna Instrumentos (HI9828), enquanto os demais parâmetros seguiram o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2021). Também foram analisados parâmetros biológicos, como coliformes e Escherichia coli, porém praticamente não houve remoção devido à ausência de unidade de desinfecção no sistema. Para os testes de ecotoxicidade, a solução-teste foi preparada conforme a NBR 12.713/2016, em frascos Erlenmeyer, utilizando proporções da amostra de efluente (bruto e tratado) e água destilada para diluição, com homogeneização manual antes da aplicação nos ensaios.

Tabela 1: Preparo de soluções-teste para o ensaio com efluentes.

Solução-teste (%)	Fator de diluição (FD)	Volume de amostra (mL)	Volume de água de diluição (mL)	Volume final (mL)
100	1	100	-	100
50	2	50	50	100
25	4	25	75	100
12,5	8	12,5	87,5	100
6,25	16	6,2	93,8	100
3,125	32	3,1	96,9	100

Fonte: NBR 12.713 (2016)

Para a caracterização das amostras coletadas, foram determinados pH, temperatura e oxigênio dissolvido (OD) utilizando a sonda da marca Hanna. Para preservação, as amostras foram mantidas refrigeradas conforme a NBR 15.469/2015.

Os testes de toxicidade com *Daphnia magna* seguiram a metodologia da NBR 12.713/2016 e da *International Standard for Organization* (ISO – 1994) para ensaios de toxicidade aguda. O cultivo dos organismos-teste foi realizado no Laboratório de Ecotoxicologia e Meio Ambiente da Univille, em incubadora com fotoperíodo de 12 h de luz e 12 h de escuro, a 25 °C, sendo alimentados com a alga *Scenedesmus subspicatus sp*. Neonatos de *Daphnia magna* (6–24 h) foram expostos às diluições de 50%, 25%, 12,5%, 6,25% e 3,125% das amostras de efluente bruto e tratado, além do controle (água de cultivo), mantidos a ±20 °C por 48 h. As diluições foram feitas em quadruplicata, em tubos de 15 mL contendo 10 mL de solução teste e cinco organismos cada, totalizando 220 organismos por mês. Após 48 h, avaliou-se a imobilidade ou letalidade, sendo os resultados válidos quando ≤10% dos organismos do controle apresentaram imobilidade. Os dados foram expressos pelo Fator de Toxicidade (FT), calculado a partir do Fator de Diluição (FD), e pela CE50, determinada por análise estatística.

Os ensaios de germinação e desenvolvimento radicular com *Eruca sativa* (rúcula) seguiram padronizações da US EPA (1996) e metodologias de Tam e Tiquia (1994) e Kleine (2018). Foram utilizadas sementes da marca ISLA – PAK, com pureza de 100% e germinação de 97%. Em cada placa Petri (9 cm) foram distribuídas 10 sementes sobre dois discos de papel filtro

embebidos em 3 mL de solução teste. As concentrações seguiram série geométrica (100%, 50%, 25%, 12,5%, 6,25% e 3,125%) para efluente bruto e tratado, além do controle com água destilada, totalizando 13 amostras por teste. Foram realizadas cinco réplicas por concentração, resultando em 61 placas e 610 sementes por mês. Os ensaios ocorreram a 20±2 °C com fotoperíodo de 16 h de luz e 8 h de escuro. Após sete dias, foram avaliados o número de sementes germinadas e o crescimento das radículas, considerando-se germinadas aquelas com radícula superior a 2 cm.

Para cada experimento, foram calculados o percentual de germinação (%G), o alongamento da raiz (%R) e o índice de germinação (IG), utilizando as Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$(\%G) = \frac{N° \ total \ de \ sementes \ germinadas \ na \ amostra}{Nº \ de \ sementes \ germinadas \ no \ controle} \times 100 \quad (1)$$

$$(\%R) = \frac{Média \ do \ alongamento \ da \ raíz \ nas \ sementes \ germinadas \ na \ amostra}{Média \ do \ alongamento \ da \ raíz \ nas \ sementes \ do \ controle} \times 100 \quad (2)$$

$$(IG) = \frac{(\%G) \times (\%R)}{100} \quad (3)$$

Onde: %G = Percentual de germinação nas amostras em relação ao controle; %R = Alongamento de raiz, ou percentual de crescimento radicular nas amostras em relação ao controle e IG = Índice de germinação.

Resultados e Discussão

Inicialmente, no tocante aos valores de pH, eles oscilaram entre 7,43 e 9,51 para o efluente bruto, e entre 6,46 e 9,36 para o tratado, com média de 8,72 e 8,55, respectivamente. Já em relação a temperatura, ela variou entre 17,28 °C e 28,30 °C para o efluente bruto e entre 17,42 °C e 27,57 °C para o tratado, atingindo medias iguais a 22,24 °C e 22,21 °C, respectivamente.

Os gráficos da Figura 2 ilustra a série histórica destes valores, sendo importante salientar que sistema de tratamento não operou em temperaturas ótimas (mesofílicas), na faixa de 30 a 35ºC, segundo METCALF & EDDY (2016) e CHERNICHARO (2016), o que pode ter influenciado nos resultados obtidos.

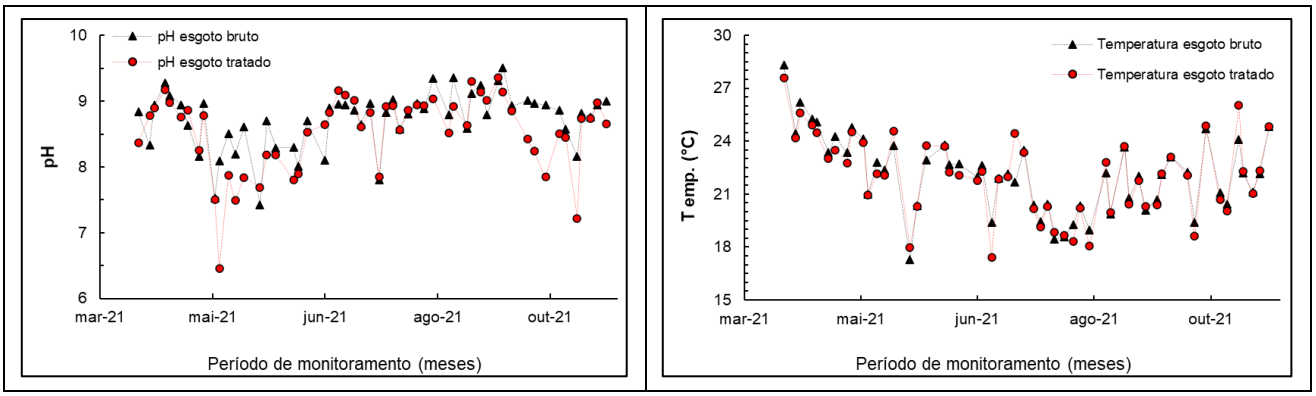


Figura 2: Série histórica dos valores de pH e temperatura
Fonte: Autor (2022)

No que tange à concentração de oxigênio dissolvido (OD), como era de se esperar devido ao processo anaeróbio de tratamento, os valores para o efluente tratado estiveram próximos de zero, com uma média da ordem de 0,1 mg/L.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em relação as análises DBO, DQO e SST.

Tabela 2: Preparo de soluções-teste para o ensaio com efluentes.

Parâmetro		Nº de dados	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Percentis				
						10	25	50	75	90
DQO	Afl	45	1001,7	398,5	0,40	226,0	390,0	468,0	681,0	840,0
	Efl	45	330,6	132,6	0,40	46,0	95,0	124,0	162,0	210,0
	Ef (%)	45	65	14,0	0,22	47,6	52,4	62,9	75,4	82,7
DBO	Afl	41	513,3	225,2	0,44	588,0	760,0	1024,0	1284,0	1488,2
	Efl	41	130,9	66,9	0,41	131,2	259,0	332,0	415,0	466,8
	Ef (%)	41	73	11,7	0,16	57,6	63,9	74,4	81,7	87,5
SST	Afl	43	667,1	463,7	0,70	224,0	299,5	576,0	882,5	1367,0
	Efl	43	77,1	69,7	0,97	22,2	39,3	62,0	80,0	108,4
	Ef (%)	43	86	11,4	0,13	70,5	81,2	87,6	94,7	96,5

Fonte: Autor (2022)

Ao analisar os resultados acima, observa-se que as eficiências médias de remoção de matéria orgânica, DQO e DBO, foram de 65% e 73%, respectivamente, alcançando valores da ordem de 85% no percentil de 90.

Quanto às eficiências de remoção de SST, nota-se um desempenho superior à matéria orgânica, com uma eficiência média de 86% e valores de aproximadamente 96% para o percentil 90. Esse resultado está diretamente associado à presença dos meios suportes no interior das câmaras, especialmente na última (terceira), pois possuem uma maior área superficial específica, atuando como filtro na retenção dos sólidos. De qualquer modo, pode-se perceber que houve uma considerável dispersão dos dados, como indicado pelos valores do desvio padrão e do coeficiente de variação. Essa dispersão pode ser atribuída à variabilidade na carga orgânica aplicada ao sistema, possivelmente influenciada pela flutuação no número de funcionários e alunos no campus da Universidade devido à pandemia. Ademais, esses dados destacam a eficácia da Tecnologia RASC, demonstrando que a utilização dos meios suportes contribui significativamente para a melhoria das eficiências de remoção de poluentes orgânicos e sólidos suspensos. Para uma melhor compreensão da dispersão dos dados, os comportamentos dos parâmetros de DBO, DQO e SST estão apresentados nos gráficos Boxplot da Figura 3 abaixo, representando as concentrações e eficiências.

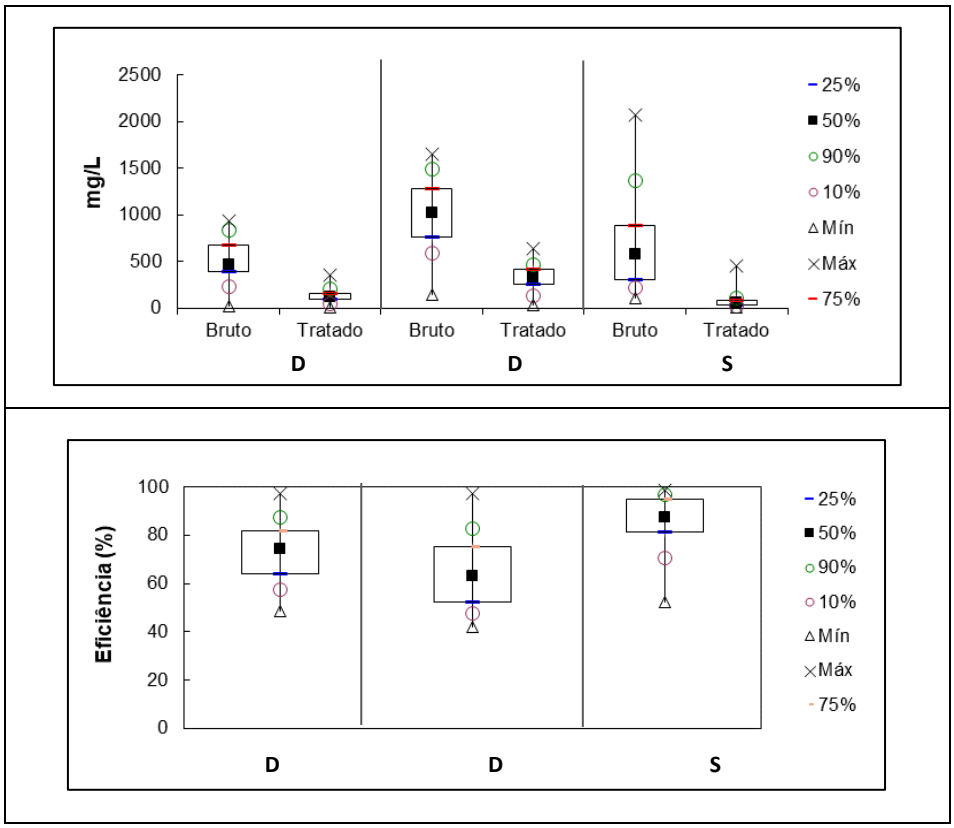


Figura 3: Gráficos Boxplot das concentrações e eficiências de DBO, DQO e SST
Fonte: Autor (2022)

Por fim, considerando que a Tecnologia RASC é totalmente anaeróbia, os resultados foram bastante satisfatórios pelo fato de que processos anaeróbios convencionais alcançam eficiências de remoção desses parâmetros na faixa de 45% a 75%, especialmente quando operam com TDH da ordem de 8h a 10h e em temperaturas mesofílicas (Jordão & Pessôa; 2017).

No que se refere aos compostos nitrogenados (Nitrogênio Total, Nitrogênio Amoniacal, Nitrito e Nitrato), pelo fato da Tecnologia RASC ser um processo anaeróbio, seu consumo se dá apenas para o metabolismo celular, seguindo a relação carbono e nitrogênio de 100:5 (VON SPERLING; 2018, JORDÃO & PESSÔA; 2017 e METCALF & EDDY; 2016). Portanto, não houve remoção significativa de nenhum destes compostos, com valores máximos de remoção de 18% para Nitrogênio Total.

Para os testes de toxicidade aguda com *Daphnia magna*, os resultados das diluições estão disponíveis na Tabela 3.

Pode-se notar que apenas em agosto houve registro de mortalidade no grupo controle, enquanto nos demais meses todos os organismos permaneceram vivos, indicando boa confiabilidade dos ensaios conforme a NBR 12.713/2016.

Na diluição de 50% (1/2), mais de três quartos dos organismos-teste morreram em todos os ensaios, sendo que em cinco deles ocorreu 100% de mortalidade. Na concentração de 25% (1/4), apenas os testes de maio e junho apresentaram mortalidade inferior à metade dos organismos (25% e 40%). Na diluição de 12,5% (1/8), somente as amostras de efluente tratado coletadas em agosto não apresentaram mortalidade. Já nas diluições de 6,25% (1/16) e 3,125% (1/32) praticamente não houve mortalidade. Os resultados também indicam redução da mortalidade quando comparado o efluente bruto ao tratado, sugerindo diminuição da toxicidade após o tratamento.

Tabela 3: Resultados do teste de toxicidade aguda com *Daphnia magna* nas amostras dos efluentes brutos e tratados

Mês	Amostras	Efluente Bruto		Efluente Tratado	
		Mortalidade/Total de Indivíduos	Mortalidade (%)	Mortalidade/Total de Indivíduos	Mortalidade (%)
Maio	Controle	0/20	0	0/20	0
	1/32	0/20	0	0/20	0
	1/16	3/20	15	0/20	0
	1/8	13/20	65	3/20	15
	1/4	20/20	100	5/20	25
	1/2	20/20	100	19/20	95
Junho	Controle	0/20	0	0/20	0
	1/32	0/20	0	0/20	0
	1/16	7/20	35	1/20	5
	1/8	11/20	55	5/20	25
	1/4	20/20	100	8/20	40
	1/2	20/20	100	18/20	90
Julho	Controle	0/20	0	0/20	0
	1/32	0/20	0	0/20	0
	1/16	0/20	0	0/20	0
	1/8	4/20	20	1/20	5
	1/4	17/20	85	13/20	65
	1/2	20/20	100	20/20	100
Mês	Amostras	Efluente Bruto		Efluente Tratado	
		Mortalidade/Total de Indivíduos	Mortalidade (%)	Mortalidade/Total de Indivíduos	Mortalidade (%)
Agosto	Controle	1/20	5	0/20	0
	1/32	0/20	0	0/20	0
	1/16	0/20	0	0/20	0
	1/8	2/20	10	0/20	0
	1/4	16/20	80	12/20	60
	1/2	19/20	95	20/20	100
Setembro	Controle	0/20	0	0/20	0
	1/32	0/20	0	0/20	0
	1/16	1/20	5	0/20	0
	1/8	3/20	15	1/20	5
	1/4	14/20	70	11/20	55
	1/2	15/20	75	16/20	80

Fonte: Autor (2022)

A CE50 foi calculada utilizando a ferramenta online da AAT Bioquest, que relaciona as concentrações ao número de organismos imóveis, gerando valores entre 0 e 1, em que valores próximos de 1 indicam maior linearidade e sensibilidade aos efeitos, apresentados juntamente com os Fatores de Toxicidade (FT) na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados CE50 e FT

Meses	CE_{50}		FT	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Maio	10,5%	28,9%	9,5	3,5
Junho	10,4%	26,9%	9,6	3,7
Julho	17,1%	22,3%	5,9	4,5
Agosto	18,8%	24,5%	5,3	4,1
Setembro	20,5%	21,5%	4,9	4,6

Fonte: Autor (2022)

De acordo com o Ibama (1996), todos os resultados de CE_{50} obtidos foram classificados como medianamente tóxicos ($10{,}0 \leq CE_{50} < 100$). Pode-se observar também que, a faixa de CE_{50} para o efluente bruto variou de 10% a 20%, enquanto para o efluente tratado de 20% a 30%. Analisando agora, por exemplo, os resultados de maio, a CE_{50} foi de 28,9% na saída e 10,5% na entrada, apontando que seria necessário diluir o efluente tratado 3,5 vezes e o efluente bruto 9,5 vezes para que metade dos organismos aquáticos sobrevivessem. Esses resultados evidenciam que o efluente tratado é menos tóxico do que o efluente bruto em todas as amostras avaliadas.

Os resultados referentes ao comprimento médio das raízes (%R), número de sementes germinadas (%G) e índice de germinação (IG) das sementes de rúcula após 7 dias estão apresentados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Resultados de germinação, alongamento de raízes e índice de germinação para *Eruca sativa* para as amostras de efluentes

	Maio		Junho		Julho		Agosto		Setembro	
Diluições (%)	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado
	%G									
100	92	92	92	98	98	98	94	94	98	86
50	96	86	86	88	108	104	96	94	100	100
25	90	92	90	92	100	88	90	88	94	90
12,5	88	92	92	90	98	96	90	96	92	92
6,25	84	94	90	68	88	94	90	96	96	86
3,125	86	94	92	92	94	86	92	90	92	94
Diluições (%)	**%R**									
100	96	85	66	62	60	34	55	31	112	33
50	107	97	77	110	120	89	80	98	93	76
25	109	101	103	88	108	96	96	107	84	106
12,5	102	91	97	98	97	77	96	102	109	87
6,25	95	93	76	94	77	87	116	106	112	86
3,125	95	88	86	94	87	85	94	107	95	100
Diluições (%)	**IG**									
100	88	78	60	60	59	34	52	29	109	28
50	103	83	66	97	130	92	76	92	93	76
25	98	93	93	81	108	85	86	94	79	95
12,5	90	84	89	88	95	74	87	98	100	80
6,25	80	88	68	64	68	82	104	102	107	74
3,125	82	83	80	86	82	73	87	96	88	94

Fonte: Autor (2022)

O %G das sementes, calculado com base na Equação 1 mencionada anteriormente, apresentou resultados satisfatórios com valores acima de 80% na maioria dos ensaios. No entanto, é importante realçar que os valores fora da faixa aceitável, como os destacados na Tabela 5 em laranja (abaixo de 80%) e verde (acima de 100%). Especificamente, o valor de 68% de germinação para a concentração de 6,25% (1/16) no mês de junho foi devido a uma falha experimental, onde houve má vedação de uma das placas, resultando na evaporação da água antes da germinação das sementes. Já em julho e setembro, algumas amostras apresentaram resultados superiores ao controle devido ao uso de placas que continham mais do que as 10 sementes padrão por teste. Com relação ao %R, calculado pela Equação 2 supracitada, pode-se observar na Tabela 5 que os valores foram consistentemente mais altos para as concentrações de efluente bruto em comparação com as de efluente tratado, indicando benefícios dos nutrientes presentes no efluente bruto para o crescimento das plantas.

Utilizando a Equação 3 referida acima, foi calculado o IG, conforme apresentado na Tabela 5. Porém, para uma melhor visualização, as médias e o desvio padrão destes resultados de IG estão descritos na Tabela 6 abaixo, juntamente com o comprimento médio das raízes medido *inloco*.

Tabela 6: Média dos IG e tamanho médio das raízes

%	Média IG Bruto	Desvio Padrão	Média IG Tratado	Desvio Padrão	Raíz Bruto (cm)	Desvio Padrão	Raíz Tratado (cm)	Desvio Padrão
Controle	100				4,79	0,42	4,79	0,42
100	74	21,72	46	20,09	3,7	1,06	2,3	1,02
50	94	22,11	88	7,65	4,6	0,79	4,5	0,54
25	93	10,08	90	5,68	4,8	0,45	4,8	0,33
12,5	92	4,96	85	8,16	4,8	0,23	4,4	0,42
6,25	86	17,11	82	12,81	4,6	0,80	4,5	0,34
3,125	84	3,15	87	8,31	4,4	0,19	4,5	0,38

Fonte: Autor (2022)

A classificação que determina o grau de toxicidade presente na amostra pode ser feita por meio do IG seguindo as metodologias de Belo (2011), cujas classificações são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Classificação a partir do IG

Índice de Geminação (IG)	Classificação
< 30	Muito fitotóxico
30 – 60	Fitotóxico
60 – 80	Moderadamente fitotóxico
80 – 100	Não fitotóxico
> 100	Potencializa a germinação

Fonte: Belo, 2011.

Com base na Tabela 6 e no Quadro 1, a maioria dos valores médios de Índice de Germinação (IG) ficou entre 80 e 100, indicando que o efluente bruto e tratado foi, em geral, não fitotóxico. A exceção ocorreu na concentração de 100%, em que os valores médios de IG foram 74 para o efluente bruto e 46 para o tratado, caracterizando toxicidade moderada e fitotoxicidade, respectivamente. Em relação ao tamanho médio das raízes, os resultados foram semelhantes ao controle em quase todas as diluições, exceto na concentração de 100%. Os melhores resultados de desenvolvimento vegetal ocorreram na concentração de 25% do efluente, tanto para o bruto quanto para o tratado.

Considerações Finais

Este trabalho permitiu avaliar diversos aspectos da aplicabilidade da Tecnologia RASC, tais como:

- Foi viável produzir um efluente com boas características utilizando um sistema totalmente anaeróbio, operando com um TDH de apenas 5,0 horas.
- Devido ao uso de meios suportes específicos, pode-se inferir que a última câmara também atuou como um filtro, retendo uma quantidade significativa de sólidos.

Em relação aos resultados dos parâmetros físico-químicos:

- O sistema operou com um pH relativamente básico, com médias de 8,72 e 8,55 para o efluente bruto e tratado, respectivamente.
- A temperatura média do efluente durante todo o período de monitoramento foi de aproximadamente 22 °C, abaixo da faixa ideal (30-35 °C) para tratamento anaeróbio.
- As eficiências médias de remoção foram de 65% para DQO, 73% para DBO e 86% para SST. Não houve remoção significativa de NT, NA, $N\text{-}NO_2$ e $N\text{-}NO_3$, conforme esperado em processos anaeróbios.

Quanto aos resultados dos ensaios de ecotoxicidade:

- A CE_{50} para *Daphnia magna* variou de 10% a 20% para o efluente bruto e de 20% a 30% para o tratado, indicando toxicidade moderada.
- Independentemente do ensaio realizado, o FT para o efluente tratado foi superior ao bruto, sugerindo que o tratamento reduziu a toxicidade para *Daphnia magna*.
- O %G das sementes de rúcula em testes de fitotoxicidade para concentrações do efluente bruto e tratado foi superior a 80%, classificado como ótimo.
- O %R das sementes de rúcula foi maior para as concentrações de entrada em comparação com as de saída, indicando benefícios dos nutrientes presentes no efluente bruto para o crescimento das plantas.
- O IG das sementes variou de 80 a 100, caracterizando o efluente como não fitotóxico tanto no bruto quanto no tratado.
- Os tamanhos médios das raízes de rúcula foram semelhantes ao controle, independentemente da diluição, igual a 4,7 cm; ocorrendo maior crescimento para concentração do efluente (bruto ou tratado) de 25%, equivalente a 4,8 cm.

Em suma, este estudo demonstrou que a Tecnologia RASC é capaz de produzir um efluente com excelentes características, mesmo operando em condições anaeróbias com baixo tempo de detenção hidráulica e temperaturas abaixo do ideal.

Referências Bibliográficas

APA – Agência portuguesa do Ambiente. **Ecotoxicologia**. Disponível em: <https://apambiente.pt/_zdata/LRA/Ecotoxicologia.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2021.

APHA (American Public Health Association). ***Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater***, 23rd Ed., American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC. 2017. 2671p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17.076 – Projetos de sistema de tratamento de esgoto de menor porte – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABNT. **NBR 15.527: Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. **NBR 12.713: Ecotoxicologia aquática – Toxicidade Aguda – Método de ensaio com Daphnia spp.** (*Cladocera, Crustacea*). Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 15.469: Ecotoxicologia aquática - Preservação e preparo de amostras**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2015.

NBR 9.897: Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores – Procedimentos. Rio de Janeiro: 1987.

BRASIL. (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, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/ res/res05/res35705.pdf. Acesso em: 20 ago. 2021.

BRASIL. (2011) **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre. cfm?codlegi=646. Acesso em: 20 ago. 2021.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios.** Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.5. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

IBAMA. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (1996). **Portaria normativa n°84/1996. Sistema de classificação quanto ao potencial de periculosidade ambiental – PPA**. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/qualidade-ambiental/avaliacaodo-potencial-de-periculosidade-ambiental-ppa/pagina-4>. Acesso em 7 de out. de 2021.

INTERNATIONAL STANDARD FOR ORGANIZATION. 1994. **Water Quality: Determination of the inhibition of the mobility of Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea)**. Acute toxicity test. ISO/TC147/SC5, 1994.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8ª ed. ABES-RJ, 2017.

KLEINE, T. **Desenvolvimento de método de ensaio de toxicidade transgeracional com *Daphnia Magna* para aplicações em estudos de saúde ambiental – estudo de caso: Análise da toxicidade do efluente de sistema de absorção de ar atmosférico.** Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE) – Tese de Doutorado. Joinville, 2018.

METCALF & EDDY INC. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. Tradução de Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5. ed, Nova Iorque: McGraw-Hill; Porto Alegre: AMGH. 2016.

MOTA, B. O. **Alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes domésticos em zonas rurais.** 2017. 56 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário:** coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. 2.ed. São Paulo: Blucher, 2011.

SILVA, V. F. *et al*. Tratamento anaeróbio de esgoto doméstico para fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, pp.186- 190, 2005.

SION, A. O. **Necessidade de investimentos em infraestrutura para universalização do saneamento básico no combate a pandemias: Uma análise do enfrentamento à Covid-19 à luz do novo Marco Legal do Saneamento Básico**. Revista De Ciências Jurídicas e Sociais - Iurj, *[S. L.]*, v. 1, n. 1, pp. 111–141, 2020.

SNIS (2024). Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos. Brasília: SNSA/MCIDADES.

TAM, N. F. Y.; TIQUIA, S. M. **Assessing toxicity of 'spent pig litter' using seed germination technique**. Resources, Conservation and Recycling Journal, v. 11, pp.261-274. 1994.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. US EPA. **Seed Germination/ Root Elongation Toxicity Tests:** Ecological Effects Tests Guidelines. 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Vol. 2. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 2018.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 1. 4.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

DESEMPENHO E CONTROLE DA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO EM REATOR DE LEITO ESTRUTURADO COM AERAÇÃO INTERMITENTE (SBRIA) MONITORADO POR SONDAS

Vinícius Godoi Cipelli, Alessandra Giordani, Rafael Brito de Moura
Universidade Federal de Alfenas, vinicius.cipelli@sou.unifal-mg.edu.br.
Universidade Federal de Alfenas, giordani.alessandra1211@gmail.com
Universidade Federal de Alfenas, rafael.moura@unifal-mg.edu.br

Palavras-chave: nitrificação e desnitrificação simultânea, anammox, remoção de nitrogênio.

Resumo

O reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA) permite a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação em um único reator, atingindo elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica e nitrogênio total, apresentando um baixo consumo de energia e não necessitando de suplementação de fonte externa de carbono. Este trabalho teve como objetivo avaliar a remoção biológica de nitrogênio em um SBRIA utilizando efluente sintético com propriedades similares a efluente tratado em reator anaeróbio. Foram testados diversos métodos de controle da aeração intermitente, e sondas de medição de oxigênio dissolvido (OD), e nitrato (NO_3^-) foram empregadas, buscando a otimização e controle dos processos biológicos. Construiu-se um SBRIA em escala de bancada, cilíndrico, em acrílico, com volume físico aproximado de 10,8 L, diâmetro interno de 14,6 cm e altura de 61 cm. O reator foi operado com tempo de detenção hidráulica de 10 horas. O leito foi feito de espuma de poliuretano com porosidade de 83%. A operação foi dividida em oito fases, com base em diferentes estratégias de controle da aeração intermitente. Nas fases 1 a 3, o controle foi realizado por temporização fixa, com ciclos de 120 minutos e tempos de aeração de 20, 15 e 10 minutos, respectivamente. Nas fases 4 a 8, o controle foi realizado por sondas, utilizando valores limites de OD e, posteriormente, combinações de OD e NO_3^- para acionamento e interrupção da aeração. Foi possível observar a partir dos resultados, que maiores tempos de aeração favoreciam a nitrificação e desfavoreciam a desnitrificação. A maior remoção de nitrogênio total e desnitrificação ocorreu na fase 8 (65,5% e 85,0% respectivamente), e a melhor nitrificação ocorreu na fase 1 (98,4%). O controle automatizado da aeração intermitente mostrou-se desafiador devido a necessidade de garantir o pleno funcionamento das sondas de medição, e distúrbios no seu comportamento, reduziam o período total de aeração do sistema, prejudicando o tratamento. Mesmo assim, tal método de controle permitiu otimizar os processos biológicos, apresentando elevado potencial para otimização do reator. A adição de matéria orgânica ao efluente sintético na Fase 8 trouxe um aumento considerável na remoção de nitrogênio. De forma geral, os resultados indicam que o SBRIA é uma tecnologia promissora para a remoção de nitrogênio em efluentes com baixa relação C/N, sendo o controle da aeração intermitente e a confiabilidade e estabilidade das sondas fatores determinantes para sua aplicação em escala real.

Introdução

O nitrogênio é um elemento essencial para o funcionamento celular, fazendo parte da estrutura de aminoácidos e ácidos nucleicos. Os seres vivos podem captar o nitrogênio presente na natureza e converte-lo em compostos por eles assimiláveis através de reações químicas que integram o chamado ciclo biológico do nitrogênio (Figura 01). A nitrificação é um processo bioquímico de oxidação de amônia ($N\text{-}NH_4^+$), primeiro a nitrito ($N\text{-}NO_2^-$), depois a nitrato ($N\text{-}NO_3^-$), conhecidos como nitritação e nitratação, respectivamente. Tal processo ocorre em condições aeróbias através de microrganismos autotróficos e quimiolitotróficos como parte de sua atividade metabólica (SCHMIDT *et al.*, 2003). A desnitrificação é o processo inverso da nitrificação e consiste na redução de $N\text{-}NO_3^-$ e $N\text{-}NO_2^-$ em formas reduzidas de nitrogênio, produzindo gás nitrogênio (N_2) principalmente, em condições de ausência de oxigênio, por meio de bactérias e arqueias heterotróficas, dessa forma, tais microrganismos utilizam NO_3^- como receptor de elétrons, necessitando de matéria orgânica para ser doadora de elétrons. O processo de oxidação anaeróbia de amônia (*Anaerobic ammonium oxidation* – Anammox), consiste na oxidação de NH_4^+ a N_2 e NO_3^-, utilizando NO_2^- como receptor de elétrons, em condições de ausência de oxigênio e sem a necessidade de fonte externa de carbono. Os microrganismos anammox são anaeróbios, além de autotróficos e quimiolitotróficos (MARQUE; DANIEL, 2023).

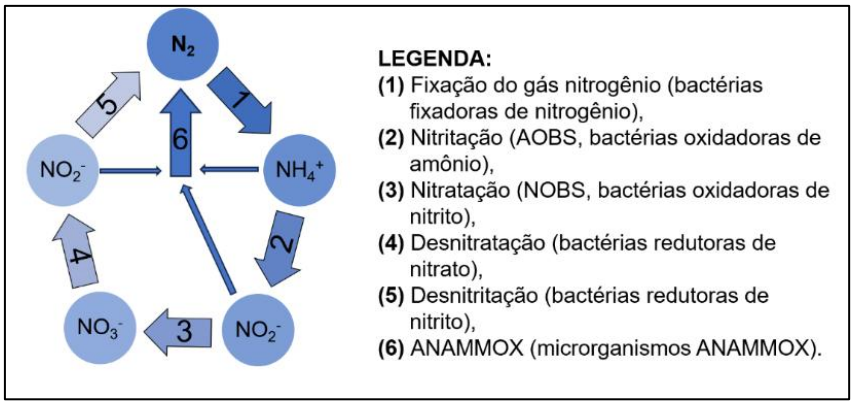


Figura 01: Etapas do Ciclo Biológico do Nitrogênio
Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (2014).

O tratamento inadequado do nitrogênio, pode fazer o mesmo se acumular no meio aquático, causando o processo de eutrofização, em que ocorre o esgotamento do oxigênio, tornando o meio anóxico e levando a morte da população aeróbia que habita nele. Além disso, muitas das formas do nitrogênio, como amônia, nitrito e nitrato, são altamente tóxicas a humanos e outros animais (METCALF & EDDY, 2014).

Apesar da importância que a remoção de matéria nitrogenada em águas residuárias representa do ponto de vista ambiental, no Brasil e em vários outros países em desenvolvimento, a maior parte dos sistemas de tratamento não são capazes de realizar essa remoção, por conta do aumento dos custos de implementação e operação. As tecnologias de nitrificação e desnitrificação simultânea – NDS possuem grande relevância no campo da remoção de nitrogênio. O reator de leito estruturado com aeração intermitente (*Structured-bed Reactor with Intermittent Aeration* – SBRIA) é um exemplo dessa tecnologia e se destaca por promover a nitrificação e desnitrificação em um único reator, em contrapartida aos métodos convencionais, reduzindo os custos de construção e garantindo elevada eficiência de tratamento (CORREA *et al.*, 2023).

O sistema SBRIA está sendo estudado de maneira consistente e se mostrou bem sucedido quando aplicado em escala de bancada e piloto para remoção biológica de carbono e nitrogênio, tanto em efluentes sintéticos quanto em reais.

Por exemplo, Moura *et. al.* (2018) avaliaram a remoção da demanda química de oxigênio (DQO) e nitrogênio total (NT) de um SBRIA com recirculação de lodo, para esgoto doméstico real, variando o tempo de detenção hidráulica (TDH) e a razão tempo de aeração por tempo de não aeração (A/NA). Os melhores resultados foram obtidos com as condições TDH de 12 horas e A/NA de 2h/1h, em que se obteve remoção de DQO e NT de 93% e 82%, respectivamente.

Oliveira *et al*. (2021) apuraram a remoção simultânea de matéria orgânica e nitrogênio em um SBRIA de bancada alimentado com efluente sintético, variando a vazão de ar e a duração da aeração, sendo os ciclos aeração - não aeração com duração de 3 horas. A melhor eficiência de remoção de NT foi 79,6%, obtida com uma hora e 45 minutos de aeração e com a vazão de 4,5 $L.min^{-1}$.

Correa *et al.* (2023) investigaram a remoção de matéria orgânica e nitrogênio em um SBRIA operado com diferentes cargas orgânicas para tratamento de efluentes de laticínios, mostrando-se uma alternativa viável. O aumento da carga orgânica reduziu a eficiência de remoção de NT, devido ao favorecimento e proliferação de organismos desnitrificantes heterotróficos em detrimento aos nitrificantes. As eficiências de remoção de DQO de 86,3% e NT de 83,0% foram obtidas com a carga orgânica de 1800 $gDQO.m^{-3}.dia^{-1}$.

Barbosa; Giordani; Moura (2024) projetaram um sistema SBRIA em escala piloto para nitrificação e desnitrificação simultâneas e remoção de DQO em esgoto sanitário doméstico, e obtiveram eficiência de remoção de DQO de 56% e NT de 57%. Além disso, o sistema mostrou elevada capacidade de consumir alcalinidade sem necessitar de adição de alcalinizante.

Apesar do potencial das tecnologias de NDS, as mesmas exigem o monitoramento e controle dos parâmetros de processo, o que dificulta sua aplicação em regiões remotas, com pouca disponibilidade de mão de obra. Dessa forma, seria de grande importância desenvolver a automatização da operação. O uso de sondas específicas, como as que medem oxigênio dissolvido (OD) e nitrato (NO_3^-), permite controlar e otimizar os processos de remoção de nitrogênio, tanto os convencionais, quanto os não convencionais (RUANO *et al.*, 2009).

Considerando a carência de estudos a respeito da aplicação de sondas em biorreatores NDS e o seu potencial na melhoria da eficiência energética e a remoção de nitrogênio, este estudo objetivou otimizar a remoção biológica de nitrogênio de um reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA) em escala de bancada e alimentado com efluente sintético simulando esgoto pós tratamento prévio em reator anaeróbio.

Material e Métodos

Descrição do Reator De Leito Estruturado e Aeração Intermitente (SBRIA)

O reator foi construído em escala de bancada, é feito de acrílico e possui formato cilíndrico com diâmetro interno de 14,6 cm e altura de 61,0 cm. O volume físico é de 10,8 L, sendo que o leito em seu interior ocupa um volume total de 1,3 L, e a biomassa 1,5 L, de forma que o volume útil do reator equivale a 8 L. O leito é composto de 13 hastes cilíndricas de espuma de

poliuretano, cada uma delas fixadas na base e no topo do reator, com porosidade de 83%, diâmetro médio de 2,5 cm e altura de 65 cm. O sistema ao qual o reator está integrado tem como demais componentes: bomba de alimentação, compressor de ar e sondas de medição (Figura 2).

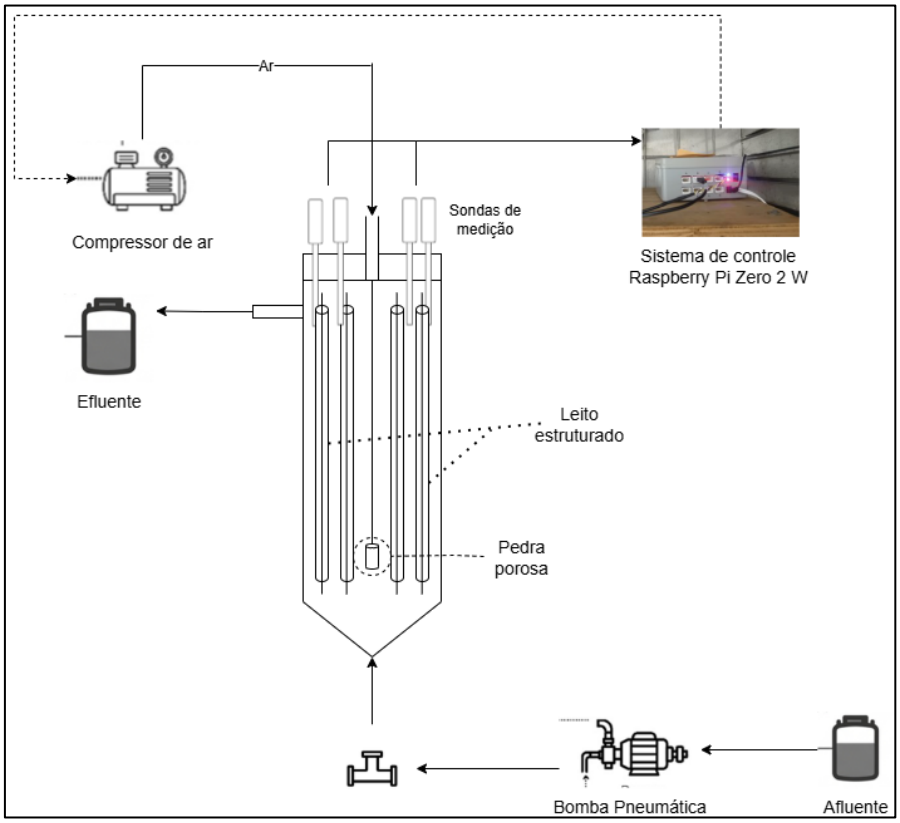


Figura 02: Modelo Esquemático SBRIA de Bancada
Fonte: Adaptado de MOURA (2018)

A inoculação do reator utilizou amostras de lodo coletadas de uma estação de tratamento de esgoto doméstico localizada no município de Poços de Caldas (MG). O tempo de detenção hidráulica (TDH) foi ajustado para 10 horas. A alimentação do reator é de fluxo contínuo e sem recirculação, sendo adotada vazão constante de 0,8 L/h.

Um sistema de monitoramento e controle foi instalado no reator, o qual era composto por: placa de desenvolvimento, módulos de conversão analógica-digital e sondas de medição, e sua implementação se baseou em Giordani *et al.* (2025). A placa de desenvolvimento utilizada foi Raspberry PI Zero 2 W, com sistema operacional versão Lite 64-bit, configurado para gerar sua própria rede wifi, por meio da qual ele envia os dados das sondas ao software do sistema.

As seguintes sondas de medição para OD e nitrato foram empregadas, gerando novos dados a cada 5 segundos:

- Medidor de OD Renke modelo RS-LDO*-N01-2-20-EX
- Sensor de nitrato Vernier

O compressor de ar eletromagnético ACQ-003, responsável pela aeração intermitente do biorreator, foi configurado para ligar e desligar, com base nas condições de controle configuradas pelo software.

Efluente Sintético

A alimentação do reator foi adaptada de Oliveira et al. (2021), de modo a simular a composição e as características de esgoto sanitário pós-tratado em reator anaeróbio. O afluente preparado foi adaptado para uma concentração de nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) equivalente a 50 mg/L.

O meio de alimentação foi composto de macronutrientes e metais traços. Os compostos do esgoto sintético eram adicionados nas devidas concentrações em mg/L: NH_4Cl – 190,53; $NaHCO_3$ – 1000,00; KH_2PO_4 – 25,26; $MgSO_4$ – 32,63; $CaCl_2$ - 20,00; $FeSO_4.7H_2O$ – 4,21. A solução de metais traços foi preparada com os seguintes componentes, com concentrações em mg/L: EDTA – 10,8; $FeSO_4.7H_2O$ – 4,6; $ZnSO_4$ – 472; $CoCl_2$ – 289; $MnCl_2$ – 700; $CuSO_4$ – 195; $NaMoO_4$ – 110; $NiCl_2$ – 203,5; Na_2SeO_3 – 53; H_3BO_4 – 7. A solução de metais traço foi adicionada ao meio na proporção de 0,5 mL por litro de alimentação.

Este estudo testou a operação do reator em condições de ausência e presença de fonte de carbono. Inicialmente, a não adição de fonte de carbono foi adotada como uma maneira de possivelmente favorecer processos autotróficos para remoção de nitrogênio, entre eles o anammox. Na fase final, a matéria orgânica foi adicionada mantendo uma baixa relação C/N na forma de acetato de sódio tri hidratado ($C_2H_3NaO_2.3H_2O$), na concentração de 150 mg/L.

Procedimento Experimental

A operação do reator foi dividida em diferentes fases baseadas na configuração da aeração intermitente (Tabela 01). Nas primeiras 3 fases, o ligamento e desligamento do aerador foi controlado por um timer, com cada ciclo com duração fixa de 2 horas. Posteriormente, a aeração foi controlada com base no monitoramento de parâmetros, feito por suas respectivas sondas, sendo inseridas condições com base nos limites inferiores e superiores destes parâmetros. A adição de matéria orgânica ao afluente ocorreu a partir da fase 8.

Fase	Controle de aeração	Variável(is) controlada(s)	Vazão de ar (L/min)	Dias de operação	Total de dias de análise
1	Por timer: ciclo com 20 min aeração ligada e 100 min desligada	t	2	1 - 42	5
2	Por timer: ciclo com 15 min aeração ligada e 105 min desligada	t	2	43 - 83	12
3	Por timer: ciclo com 10 min aeração ligada e 110 min desligada	t	2	84 - 154	19
4	Por sensores: *setup* — se OD ≤ 0,1 mg/L, aeração ligada; se OD > 0,5 mg/L, aeração desligada	OD	1	155 - 189	11
5	Por sensores: *setup* — se OD ≤ 0,2 mg/L, aeração ligada; se OD > 0,5 mg/L, aeração desligada	OD	1	190 - 216	7
6	Por sensores: *setup* — se OD ≤ 0,5 mg/L, aeração ligada; se OD > 1,5 mg/L, aeração desligada	OD	1	217 - 277	14
7	Por sensores: setup — se OD < 0,5 mg/L e NO_3^- < 14.5 mg/L, aeração ligada; se OD > 1,5 mg/L ou NO_3^- > 15 mg/L, aeração desligada.	OD e NO_3^-	1	278 - 329	11
8	Por sensores: setup igual ao da fase 7.	OD e NO_3^-	1	330 - 395	13

Tabela 01: Especificações das Fases de Operação

Métodos Analíticos

Durante todas as fases de operação, amostras de efluente e afluente foram coletadas duas vezes por semana para realização de análise de parâmetros físico químicos, cujos métodos são descritos em: "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater"* (APHA, 2012). Os parâmetros e seus respectivos métodos foram: pH - método 4500-H+ B. (método eletrométrico); Alcalinidade - método 2320 B. (método titulométrico); Nitrogênio amoniacal – método 4500-NH_3 F. (método do fenato); Nitrito – método 4500-NO_2^- B. (método colorimétrico ou teste de Griess); Nitrato - método colorimétrico de nitritação do ácido salicílico e DQO - método 5220 D (colorimétrico – refluxo fechado).

Com os dados obtidos nas análises, as eficiências de nitrificação, desnitrificação, remoção de nitrogênio e remoção de DQO são expressas por meio das equações (1) a (4):

$$\eta_{nitrificação}\,(\%) = \frac{[NH_4^+]_E - [NH_4^+]_S}{[NH_4^+]_E}.100 \qquad (1)$$

$$\eta_{\text{ desnitrificação}-\text{anammox}}(\%) = \frac{[NH_4^+ + NO_2^- + NO_3^-]_E - [NH_4^+ + NO_2^- + NO_3^-]_S}{[NH_4^+ + NO_2^- + NO_3^-]_E - [NH_4^+]_S}.100 \qquad (2)$$

$$\eta\,RN\,(\%) = \frac{[NH_4^+ + NO_2^- + NO_3^-]_E - [NH_4^+ + NO_2^- + NO_3^-]_S}{[NH_4^+ + NO_2^- + NO_3^-]_E}.100 \qquad (3)$$

$$\eta\,RDQO\,(\%) = \frac{[DQO]_E - [DQO]_S}{[DQO]_E}.100 \qquad (4)$$

Resultados e Discussão

Controle dos Ciclos de Aeração Intermitente

A operação do reator foi dividida em diferentes fases baseadas na configuração da aeração intermitente. Inicialmente a remoção de nitrogênio no reator foi estabelecida com valores fixos de tempo de aeração e não aeração, posteriormente sondas de medição foram inseridas para monitoramento e controle de tais tempos.

A Figura 03 contém o gráfico de dispersão dos tempos de aeração e não aeração ao longo dos dias de operação. Os dados indicam os períodos em que ocorreram distúrbios no funcionamento do sistema de sensoriamento, os quais estão em concordância com os períodos em que se verificou queda no desempenho do reator. As causas de tais problemas variam, podendo envolver: quedas de energia, mau contato dos cabos na rede, erros de calibração dos sensores, incrustações e mau posicionamento dos sensores, entre outros. Comparando as fases, a maior razão A/NA foi apresentada na fase 8, e a menor, na fase 5.

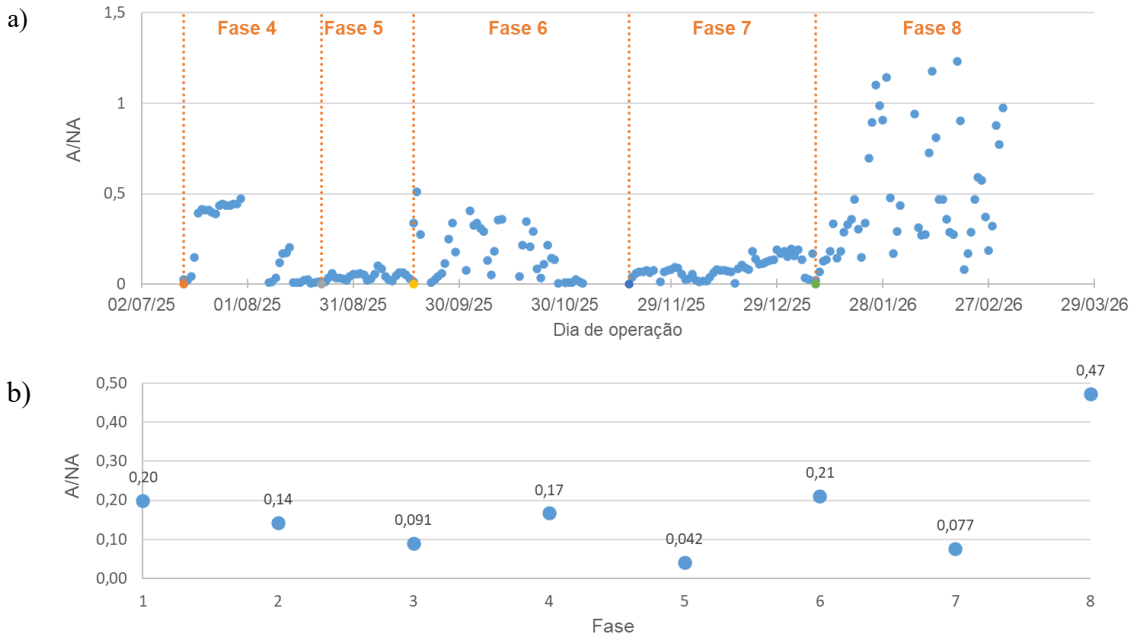


Figura 03: Razões A/NA
Legenda: a) Diárias, b) Por fase
Fonte: DO AUTOR (2026)

Eficiências de Remoção de NT, Nitrificação e Desnitrificação

As eficiências de nitrificação, desnitrificação e remoção de NT do reator foram calculadas a partir dos dados obtidos nas análises laboratoriais, e são apresentados pela Tabela 02 e Figura 04. A remoção de NT variou de 20,6 a 65,5%, os melhores resultados de remoção de NT e desnitrificação ocorreram na fase 8 (65,5% e 85,0%, respectivamente), e a melhor nitrificação ocorreu na fase 1 (98,4%).

Nas fases com maior razão A/NA, e, portanto, maiores tempos de aeração médios, notou-se que o processo de nitrificação foi favorecido e o desnitrificação desfavorecido, como no caso da fase 8, sendo o inverso observado nas fases com menores valores.

Outros estudos, como Oliveira *et al.* (2021), Santos *et al.* (2015) e Souza *et al.* (2021), avaliaram o desempenho do biorreator SBRIA em condições semelhantes (escala de bancada e esgoto sintético) e obtiveram alta remoção de nitrogênio total (79,6 a 87,2%), resultados os quais puderam ser atingidos ao estabelecer um equilíbrio entre os processos de nitrificação e desnitrificação. Em tais estudos, nas fases em que o efluente chegou as menores concentrações de nitrogênio, a nitrificação obtida esteve entre 94,4 e 99,1%, e a desnitrificação entre 84,5 e 88,0%, sendo os resultados obtidos na nitrificação ligeiramente maiores que o deste trabalho.

A adição de acetato ao efluente sintético na Fase 8 trouxe um aumento considerável na nitrificação e desnitrificação do reator, tendo um aumento de aproximadamente 45% da remoção de NT média, em comparação a remoção com a não adição de acetato e mantidas as mesmas configurações de controle das sondas. Como um motivo possível para esse aumento, pode-se considerar que a presença de matéria orgânica teria promovido relação de sintrofia entre diferentes microrganismos responsáveis pelos processos de remoção de nitrogênio. Outro fator a ser considerado é o fato de que a fase 8 apresentou um A/NA superior às demais, favorecendo a nitrificação. A remoção de DQO também foi monitorada na Fase 8 e a média obtida foi de 71,0% ± 17,7%, demonstrando assim, elevada eficiência do reator nessas condições.

As eficiências mais elevadas de remoção de nitrogênio observadas nas fases 1 e 2 podem ter sido influenciadas pela disponibilidade de matéria orgânica residual, a qual possivelmente atuou como fonte de carbono para a desnitrificação heterotrófica. Nas fases subsequentes, com o consumo dessa matéria orgânica, esse efeito pode ter se reduzido.

A desnitrificação convencional é feita por bactérias heterotróficas. Apesar disso, observou-se a ocorrência de desnitrificação nas fases em que matéria orgânica (fonte de carbono) não foi adicionada, podendo indicar a atuação de bactérias autotróficas nesse processo.

Nas fases controladas apenas pela sonda de OD, condições de controle referentes às fases 4 e 6 obtiveram desempenho semelhante, sendo em ambas superiores ao da fase 5.

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8
Remoção de NT (%)	48,8 ± 28,3	53,7 ± 14,8	45,4 ± 13,8	33,4 ± 28,3	20,8 ± 9,1	29,6 ± 12,4	20,6 ± 10,7	65,5 ± 17,7
Nitrificação (%)	78,7 ± 43,8	87,8 ± 24,4	60,7 ± 18,6	66,5 ± 22,1	33,7 ± 13,0	55,8 ± 31,3	40,3 ± 25,5	77,2 ± 21,6
Desnitrificação (%)	56,7 ± 16,3	62,7 ± 9,8	75,4 ± 9,8	55,1 ± 20,2	58,6 ± 18,3	55,9 ± 12,1	49,7 ± 14,6	85,0 ± 4,8

Tabela 02: Remoção Biológica de Nitrogênio em Cada Fase

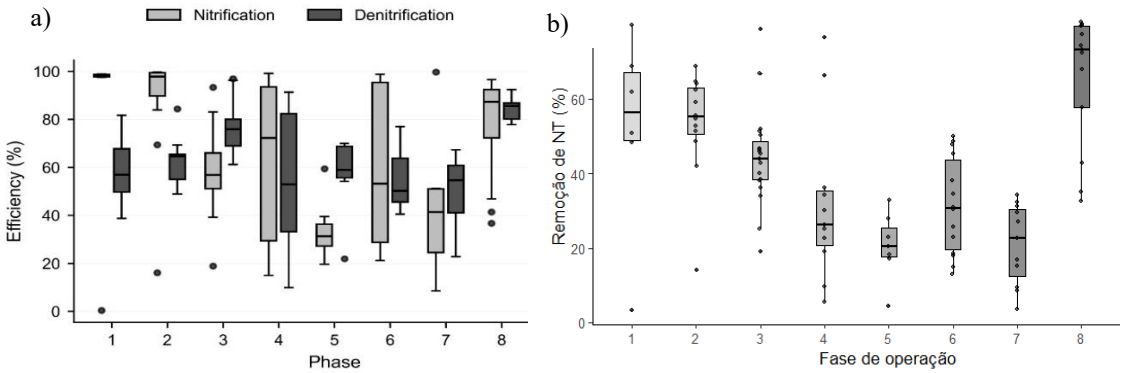


Figura 04: Boxplots das Eficiências. Legenda: a) Nitrificação e Desnitrificação, b) Remoção de NT
Fonte: DO AUTOR (2026)

As concentrações de amônia, nitrato e nitrito para afluente e efluente foram monitoradas durante todas as fases de operação (Figura 05). As concentrações foram constantes para o afluente, e variaram consideravelmente no efluente, de acordo com a fase de operação. Nos ensaios em que ocorria o aumento da concentração de nitrogênio na forma de amônia, a forma de nitrato era reduzida, e vice-versa.

PH E Alcalinidade

Os parâmetros pH e alcalinidade foram monitorados para o afluente e efluente durante todas as fases de operação (Tabela 03). O pH manteve-se ligeiramente alcalino no reator, variando de 8,16 a 8,50 no afluente e de 8,08 a 8,55 no efluente, com baixo desvio padrão, demonstrando estabilidade. O esgoto sintético era preparado para ter alcalinidade de 595 $mgCaCO_3/L$. O consumo de alcalinidade da nitrificação autotrófica é igual a 7,14 mg de $CaCO_3$ para cada mg de amônia e a geração de alcalinidade da desnitrificação convencional é 3,57 mg de $CaCO_3$ para cada mg de nitrato (RUANO *et al.*, 2009). Dessa forma, tem-se que a alcalinidade (em concentração massa/volume) consumida na nitrificação foi igual a 357 $mgCaCO_3/L$, e a alcalinidade gerada pela desnitrificação convencional foi 178,5 $mgCaCO_3/L$. Considerou-se que a desnitrificação convencional teria ocorrido somente na fase 8, em que matéria orgânica foi adicionada (Tabela 04).

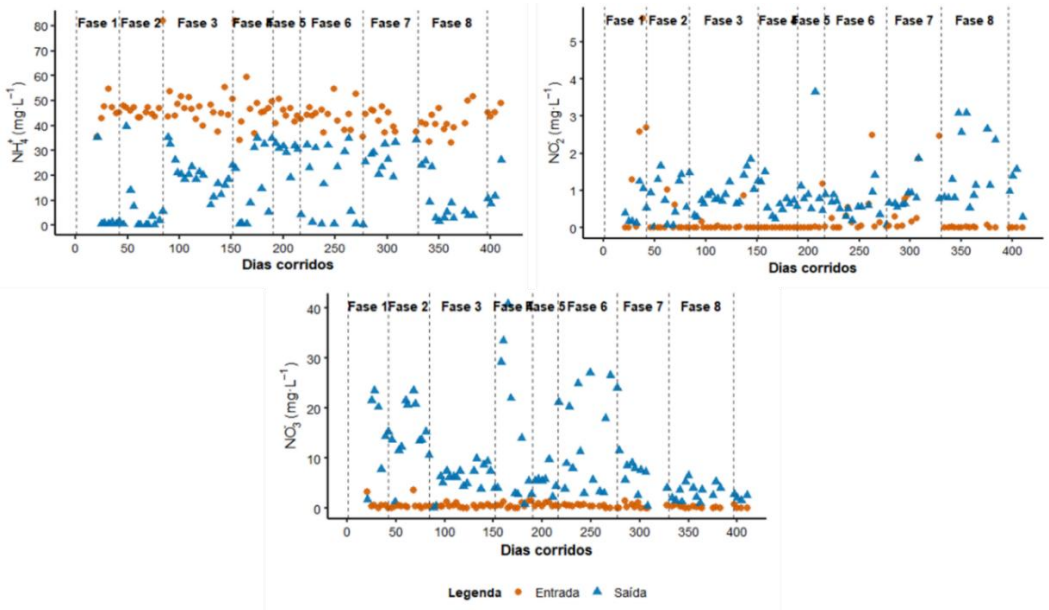


Figura 05: Concentrações das Formas de Nitrogênio (em mg/L) ao Longo do Tempo
Fonte: DO AUTOR (2026)

Fase		1	2	3	4	5	6	7	8
pH	Entrada	8,50 ± 0,12	8,43 ± 0,16	8,35 ±0,15	8,16 ± 0,20	8,32 ± 0,28	8,26 ± 0,21	8,49 ± 0,13	8,24 ± 0,17
	Saída	8,27 ± 0,15	8,35 ± 0,15	8,32 ± 0,15	8,08 ± 0,20	8,15 ± 0,32	8,34 ± 0,18	8,55 ± 0,12	8,26 ± 0,17
Alc entrada		539,4 ± 33,3	571,4 ± 62,6	467,9 ± 97,4	553,0 ± 98,8	615,4 ± 10,7	539,3 ± 78,5	614,5 ± 11,8	736,0 ± 22,0
Alc consumido por nitrificação		339,3 ± 31,7	325,8 ± 12,3	347,3 ± 66,1	57,7 ± 91,8	320,1 ± 2,3	316,7 ± 35,9	297,6 ± 31,1	296,9 ± 39,3
Alc gerado por desnitrificação		0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	148,4 ± 19,6
Alc saida teórica		200,1 ± 1,6	245,7 ± 50,3	120,6 ± 31,3	495,3 ± 7,0	295,4 ± 8,4	222,5 ± 42,6	316,9 ± -19,3	587,5 ± 2,3
Alc saida real		307,8 ± 37,5	332,0 ± 52,3	373,9 ± 97,9	416,4 ± 160,9	516,8 ± 27,3	391,6 ± 102,5	499,7 ± 86,8	612,7 ± 49,0

Tabela 03: pH e Alcalinidade em Cada Fase

As alcalinidades teóricas, em que foram consideradas as vias convencionais de remoção de nitrogênio, são superiores às reais, podendo servir como um indício de que houve produção de alcalinidade por meio de processos não convencionais. Tal observação também foi encontrada nos estudos de Moura *et al.* (2018) e Oliveira *et al.* (2021).

Considerações Finais

Este estudo tratou da operação de um biorreator de leito estruturado (SBRIA) em escala de bancada, sendo alimentado por efluente sintético simulando esgoto pós tratamento prévio, com e sem adição de matéria orgânica, e com o controle de aeração intermitente realizado por timer e por sondas de medição de oxigênio dissolvido, nitrato e amônia.

Foi possível observar que maiores tempo de aeração favoreciam a nitrificação e prejudicaram a desnitrificação. As eficiências de remoção médias obtidas apresentaram valores condizentes com as apresentadas em estudos anteriores sobre esse tipo de reator. Tais resultados, corroborados com os de pH e alcalinidade, verificam potenciais vantagens da configuração SBRIA, entre elas, a capacidade de realizar desnitrificação na ausência de necessidade de suplementação de uma fonte de carbono externa, ao contrário de processos convencionais. O processo de aeração intermitente possibilitou realizar eficientemente a nitrificação e desnitrificação simultâneas no efluente sintético, sendo o controle da aeração intermitente e a confiabilidade e estabilidade das sondas fatores determinantes para sua aplicação em escala real.

A adição de matéria orgânica melhorou o desempenho do reator, tanto para a nitrificação, quanto para a desnitrificação, por favorecer o metabolismo da comunidade microbiana, fazendo da fase 8, com aeração controlada por sondas de OD e nitrato, a fase mais eficiente analisada até o momento.

O controle automatizado da aeração intermitente mostrou-se suscetível a distúrbios das sondas de medição, que diminuíam sua exatidão, reduzindo o período total de aeração do sistema, o que prejudicaram as eficiências do tratamento. Mesmo assim, tal método de controle permitiu otimizar os processos biológicos, apresentando elevado potencial para otimização do reator.

Agradecimentos

Este estudo foi apoiado pela FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) e pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Referências Bibliográficas

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 22. ed. Washington, D.C., 2012.

BARBOSA, T. A.; GIORDANI, A.; MOURA, R. B. de. A pilot-scale study of a novel system for simultaneous nitrogen and carbon removal: technological advancement of a structured bed reactor with intermittent aeration (SBRIA) in real domestic sewage treatment. **Environmental Science And Pollution Research.** [S.L]: Springer Science and Business Media LLC. 8**:** 12591–12596 p. 2024.

CORREA, C. Z. *et al*. Removal of organic matter and nitrogen from dairy effluents in a structured bed reactor operated with intermittent aeration. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 30, n. 39, p. 91060-91073, 19 jul. 2023. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-28581-y.

GIORDANI, A. *et al*. Low-cost AI-driven prediction of nitrogen dynamics for smarter wastewater treatment. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 80, n. 109146, p. 1-14, 16 nov. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.109146.

MARQUE, M. B. de; DANIEL, L. A. Remoção de nitrogênio em efluente com baixa relação C/N: uma revisão. **Revista Dae**, [S.L.], v. 71, n. 241, p. 121-140, 26 jun. 2023. Revista DAE. http://dx.doi.org/10.36659/dae.2023.043.

METCALF & EDDY (Hong Kong). **Fundamentals of Biological Treatment**. In: METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering**: treatment and resource recovery. 5. ed. Hong Kong: McGraw Hill Education, 2014. Cap. 7. p. 1-2049.

MOURA, R. B. et al. Carbon-nitrogen removal in a structured-bed reactor (SBRRIA) treating sewage: operating conditions and metabolic perspectives. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 224, n. 1, p. 19-28, 15 out. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.014.

OLIVEIRA, E. P. *et al*. Optimization of airflow and aeration cycles in a new structured bed reactor configuration for carbon and nitrogen removal. **Environmental Technology**, [S.L.], v. 43, n. 16, p. 2540-2552, 4 mar. 2021. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2021.1887370.

RUANO, M. V. *et al*. Low cost-sensors as a real alternative to on-line nitrogen analysers in continuous systems. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 60, n. 12, p. 3261-3268, 1 dez. 2009. IWA Publishing. http://dx.doi.org/10.2166/wst.2009.607.

SANTOS, C. E.D. *et al*. Influence of COD/N ratio and carbon source on nitrogen removal in a structured-bed reactor subjected to recirculation and intermittent aeration (SBRRIA). **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 166, n. 1, p. 519-524, 15 jan. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.054.

SCHMIDT, I. *et al*. New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. **Fems Microbiology Reviews**, [S.L.], v. 27, n. 4, p. 481-492, 27 fev. 2003. Oxford University Press (OUP). http://dx.doi.org/10.1016/s0168-6445(03)00039-1.

SOUZA, João Vr de *et al*. Simultaneous carbon and nitrogen removal in a structured bed reactor subjected to intermittent aeration (SBRIA): effect of support material diameter and bed porosity. **Journal Of Chemical Technology & Biotechnology**, [S.L.], v. 97, n. 6, p. 1436-1445, 13 out. 2021. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/jctb.6936.

CARACTERIZAÇÃO E BIODEGRADAÇÃO AERÓBIA UTILIZANDO MICROBIOTA AUTÓCTONE DE EFLUENTE DE BIOFÁBRICA

1 Bertolino, Sueli Moura, 2 Caixeta, Ediene

1 Universidade Federal de Uberlândia (UFU), e-mail: suelibertolino@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia (UFU), e-mail: Ediene.caixeta@ufu.br

Palavras-chave: efluente industrial; Biofábrica; Tratabilidade

Resumo

A expansão das biofábricas *on farm* para produção de bioinsumos microbiológicos tem ampliado a geração de efluentes líquidos cujas características e alternativas de tratamento ainda são pouco descritas na literatura científica. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo caracterizar físico-quimicamente o efluente gerado na lavagem de biorreatores, embalagens e áreas operacionais de uma biofábrica localizada no município de Lagoa Formosa - MG, bem como avaliar seu potencial de tratabilidade visando o reuso interno da água tratada. Amostras coletadas em dois períodos distintos foram submetidas à caracterização laboratorial segundo metodologias descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Foram determinados os parâmetros demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pH, turbidez, sólidos suspensos totais, sólidos sedimentáveis, condutividade elétrica, cor aparente, cloro residual, nitrogênio total e fósforo total. Os resultados evidenciaram variabilidade temporal do efluente, com DQO entre 183 e 405 mg L^{-1}, DBO entre 113 e 119 mg L^{-1}, pH entre 2,1 e 5,54 e sólidos suspensos totais entre 134 e 146 mg L^{-1}. A redução da carga orgânica na segunda campanha indicou efeito positivo do maior tempo de retenção hidráulica no tanque de armazenamento. A biodegradabilidade foi complementada por ensaio cinético de demanda bioquímica de oxigênio última (DBOu), conduzido com microbiota autóctone presente no próprio efluente. O ajuste ao modelo de primeira ordem apresentou demanda bioquímica última estimada de 1,41 mg L^{-1} e constante cinética aparente de biodegradação de 0,0406 h^{-1} (0,974 d^{-1}), evidenciando atividade biológica e rápida assimilação da fração orgânica biodegradável. Conclui-se que o efluente estudado apresenta potencial favorável ao tratamento biológico aeróbio associado a etapas físico-químicas complementares, constituindo alternativa promissora para mitigação de impactos ambientais e promoção do reuso hídrico em biofábricas.

Introdução

A produção de bioinsumos de origem biológica tem assumido papel estratégico na agricultura contemporânea, contribuindo para a redução da dependência de insumos sintéticos, fortalecimento da bioeconomia e promoção de sistemas produtivos mais sustentáveis. Nesse contexto, destacam-se as biofábricas, unidades destinadas à produção de agentes microbiológicos, como fungos e bactérias, empregados no controle biológico e na melhoria da produtividade agrícola. Essas unidades podem operar em escala comercial ou no modelo *on farm*, no qual a produção é destinada ao consumo próprio da propriedade rural (XAVIER et al., 2024; BRASIL, 2002; BRASIL, 2009)

No Brasil, a expansão das biofábricas *on farm* foi impulsionada pela possibilidade de produção para uso exclusivo próprio, sem fins comerciais, conforme previsto no Decreto nº 4.074, de 2002, posteriormente alterado pelo Decreto nº 6.913, de 2009. Esse marco regulatório favoreceu o crescimento da produção microbiológica em propriedades rurais, especialmente voltada ao manejo fitossanitário e à redução de custos produtivos (BRASIL, 2002; BRASIL, 2009; SANTOS; DINNAS; FREIRE, 2020). Apesar desse avanço, o modelo *on farm* ainda apresenta lacunas regulatórias relacionadas ao controle de qualidade, biossegurança e gestão ambiental. Entre os principais aspectos ambientais associados a essas unidades destaca-se a geração de efluentes líquidos provenientes da lavagem de biorreatores, embalagens, utensílios e pisos operacionais. Quando descartados inadequadamente, esses resíduos líquidos podem comprometer parâmetros físicos, químicos e biológicos essenciais à qualidade ambiental de corpos hídricos receptores (AMARAL, 2022; XAVIER, 2022; VIDAL et al., 2023).

As características físico-químicas e a tratabilidade desses efluentes ainda são pouco conhecidas na literatura científica, especialmente em relação às biofábricas *on farm*. A escassez de estudos dificulta a definição de tecnologias adequadas de tratamento, protocolos operacionais e critérios técnicos para reuso ou descarte ambientalmente seguro. Além disso, a limitada regulamentação específica amplia a necessidade de pesquisas aplicadas nessa temática. Para que o efluente possa ser lançado em corpos receptores ou reutilizado, é necessário tratamento prévio e atendimento aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental vigente, destacando-se a Conselho Nacional do Meio Ambiente Resolução CONAMA nº 430/2011 e a Deliberação Normativa COPAM/CERH-MG nº 08/2022 (BRASIL, 2011; MINAS GERAIS, 2022).

O tratamento de efluentes compreende a aplicação integrada de processos físicos, químicos e biológicos destinados à remoção de poluentes, redução da carga orgânica e adequação aos padrões de lançamento ou reuso. Em geral, o tratamento preliminar remove sólidos grosseiros; o primário reduz sólidos sedimentáveis e materiais flutuantes; o secundário promove a remoção biológica da matéria orgânica dissolvida; e o terciário visa à remoção complementar de nutrientes, patógenos e micropoluentes (VON SPERLING, M. 2012) Entre essas alternativas, os processos biológicos aeróbios destacam-se pela elevada eficiência na remoção de matéria orgânica biodegradável. Nesses sistemas, microrganismos utilizam compostos orgânicos como fonte de carbono e energia, empregando o oxigênio dissolvido como aceptor final de elétrons, com formação de biomassa, dióxido de carbono e água (BERTOLINO; CARVALHO; AQUINO, 2008).

Adicionalmente, processos físico-químicos como coagulação e floculação podem complementar o tratamento, promovendo remoção de sólidos suspensos, turbidez e compostos coloidais. O uso de biopolímeros naturais tem recebido atenção crescente por representar alternativa mais sustentável aos coagulantes convencionais, em função de sua biodegradabilidade, baixa toxicidade, menor geração de lodo e potencial de reaproveitamento agrícola dos resíduos gerados (RAVELE et al., 2025).

Diante desse cenário, torna-se fundamental ampliar o conhecimento técnico-científico sobre os efluentes gerados em biofábricas *on farm*, integrando caracterização físico-química e avaliação de tratabilidade. Essas informações são essenciais para subsidiar a seleção de tecnologias eficientes, reduzir impactos ambientais e promover o reuso hídrico no setor produtivo. Assim, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar e avaliar a tratabilidade do efluente gerado pela lavagem de biorreatores e embalagens durante o processo produtivo de uma biofábrica do tipo *on farm*, localizada no município de Lagoa Formosa - MG, visando propor alternativas de tratamento e reuso alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido com efluente líquido gerado na lavagem de biorreatores, embalagens e piso operacional de uma biofábrica do tipo *on farm*, localizada no município de Lagoa Formosa - MG, dedicada à produção de bioinsumos microbiológicos à base de fungos e bactérias. A metodologia experimental foi estruturada em quatro etapas: (i) coleta, preservação e armazenamento das amostras; (ii) caracterização físico-química; (iii) determinação da demanda bioquímica de oxigênio última (DBOu); e (iv) ensaio de tratabilidade em biorreator aeróbio de bancada.

A amostra do efluente bruto foi coletada diretamente no ponto de geração (tanque de armazenamento), correspondente ao sistema de drenagem das águas residuárias provenientes da higienização dos tanques biorreatores, recipientes plásticos e piso da unidade produtiva. Foram realizadas, até o momento, duas campanhas de amostragem, nos dias 06/05/2025 e 23/03/2026. Ressalta-se que, durante a campanha de amostragem realizada em 2025, o tanque de armazenamento do efluente encontrava-se operando em sua capacidade volumétrica máxima, com recebimento recente de águas residuárias provenientes do processo produtivo, com tempo de retenção hidráulica de 1 dia. Por outro lado, na campanha de 2026, o reservatório apresentava aproximadamente metade de sua capacidade útil preenchida, contendo efluente com maior tempo de retenção hidráulica (20 dias). Essas condições operacionais distintas podem influenciar diretamente as características físico-químicas observadas entre os períodos avaliados. A coleta foi executada em frascos de polietileno previamente higienizados, com volume compatível às análises laboratoriais. Após a coleta, os frascos foram acondicionados em caixas térmicas com gelo reciclável, mantidos a temperatura aproximada de 4 °C e transportados ao laboratório. O armazenamento ocorreu sob refrigeração até a realização dos ensaios, respeitando os prazos recomendados pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2023) para cada parâmetro analítico.

A caracterização do efluente bruto foi realizada conforme metodologias padronizadas descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2023). Foram determinados os seguintes parâmetros: pH, condutividade elétrica, turbidez, cor aparente, sólidos suspensos totais, sólidos sedimentáveis, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5), nitrogênio total, fósforo total e cloro residual.

A biodegradabilidade do efluente foi avaliada por meio de ensaio cinético de demanda bioquímica de oxigênio última (DBOu), conduzido com base nos princípios estabelecidos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, com adaptação do período de monitoramento para análise temporal do consumo de oxigênio dissolvido. Diferentemente do procedimento convencional com adição de inóculo externo, neste estudo optou-se por utilizar exclusivamente a biomassa autóctone naturalmente presente no efluente, partindo-se da hipótese de que os microrganismos remanescentes do processo produtivo da biofábrica seriam capazes de promover a biodegradação da matéria orgânica sob condições aeróbias controladas. Dessa forma, o ensaio buscou representar de maneira mais realista o comportamento biológico intrínseco do próprio efluente.

As amostras foram previamente homogeneizadas e diluídas em água de diluição enriquecida com nutrientes, de modo a se obter concentração inicial equivalente a aproximadamente 150 mg/L de DBO. Os ensaios foram realizados em triplicata, utilizando frascos específicos para DBO, além de frasco branco para correção de eventuais consumos não associados à amostra. Os frascos foram completamente preenchidos, evitando-se aprisionamento de bolhas de ar, e incubados a 20 ± 1 °C, na ausência de luz. O oxigênio dissolvido (OD) foi monitorado periodicamente ao longo de 32 horas, por meio de medidor eletrométrico previamente calibrado.

O consumo acumulado de oxigênio dissolvido foi determinado a partir da diferença entre o OD inicial e o OD medido em cada intervalo de tempo, com correção pelo comportamento do branco experimental. Como o período de incubação adotado não resultou na completa estabilização da curva de consumo, os resultados foram tratados como ensaio cinético preliminar de estimativa da DBO última. A estimativa da DBOu e da constante cinética aparente de biodegradação foi obtida por ajuste dos dados experimentais ao modelo de primeira ordem:

$$L_t = L_0\,(1 - \ e^{-kt}), \qquad (01)$$

Onde, L_t refere-se ao oxigênio consumido no tempo (t); L_0 à demanda bioquímica de oxigênio última estimada; k é a constante cinética aparente de biodegradação e t é o tempo de incubação.

Os parâmetros do modelo foram obtidos por regressão não linear, minimizando-se a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores observados e estimados. Essa abordagem permitiu avaliar o potencial de biodegradação da matéria orgânica presente no efluente e a atividade metabólica da microbiota nativa, fornecendo parâmetros preliminares úteis ao dimensionamento e à operação de sistemas biológicos aeróbios aplicáveis ao tratamento do efluente da biofábrica.

Resultados e Discussão

A comparação da caracterização físico-química entre as campanhas de amostragem de 2025 e 2026 (Tabela 11) evidencia significativa variabilidade temporal na composição do efluente gerado pela biofábrica, fato esperado em sistemas produtivos *on farm*, nos quais a geração de resíduos líquidos depende diretamente do tipo de bioinsumo produzido, frequência de lavagem dos equipamentos, volume de água utilizado e estágio operacional da unidade.

	Efluente biofábrica			DN. COPAM 08/22
Parâmetros	**Amostragem 2025**	**Amostragem 2026**	**Média±DP**	**VMP**
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)	119	113	116 ± 3	60
Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	405	183	294 ± 111	180
Sólidos Totais	525	585	555 ± 30	-
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	134	146	140 ± 6	100
Sólidos Dissolvidos Totais (m/L)	380	344	362 ± 18	1
pH	2,1	5,54	3,82 ± 1,72	5 - 9
Tubidez (NTU)	67	15	41 ± 26	-
Condutividade (µS/cm)	694	487	590,5 ±1 03,5	-

Tabela 01. Valores dos parâmetros físico-químicos obtidos na campanha de amostragem (*SST-Sólidos Suspensos Totais; **SD-Sólidos Decantáveis. Fonte: Caixeta, 2025

Os resultados da caracterização físico-química evidenciaram diferenças relevantes entre as campanhas de amostragem realizadas em 2025 e 2026, demonstrando a influência direta das condições operacionais do sistema de armazenamento sobre a qualidade do efluente gerado na biofábrica. Ressalta-se que, na campanha de 2025, o tanque encontrava-se em sua capacidade volumétrica máxima, com recebimento recente de águas residuárias oriundas do processo produtivo. Em contrapartida, na campanha de 2026, o reservatório apresentava aproximadamente metade de sua capacidade útil preenchida, contendo efluente com maior tempo de retenção hidráulica. Essas condições distintas ajudam a explicar a variabilidade observada entre os parâmetros analisados.

A maior concentração de matéria orgânica observada em 2025, expressa pelos valores da demanda química de oxigênio (DQO = 405 mg/L) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO = 119 mg/L), pode estar associada ao aporte recente de efluentes contendo resíduos de meios de cultura, biomassa microbiana, metabólitos e produtos utilizados na higienização dos equipamentos. O recebimento contínuo e recente do efluente tende a reduzir o tempo disponível para processos naturais de sedimentação, volatilização e biodegradação parcial no tanque de equalização. Já em 2026, a redução da DQO para 183 mg/L e da DBO para 113 mg/L sugere que o maior tempo de retenção hidráulica (20 dias) favoreceu a estabilização parcial da carga orgânica por mecanismos físicos e biológicos espontâneos.

Comportamento semelhante foi observado para a turbidez, que reduziu de 67 para 15 NTU, e para a condutividade elétrica, que passou de 694 para 487 µS/cm entre as campanhas. A diminuição da turbidez pode ser atribuída à sedimentação natural de partículas suspensas e biomassa residual durante o armazenamento prolongado. Da mesma forma, a redução da condutividade pode indicar processos de diluição, precipitação de sais ou consumo biológico de compostos iônicos presentes no efluente. Em relação aos sólidos suspensos totais, os valores permaneceram elevados em ambas as campanhas (134 e 146 mg/L), acima do limite de 100 mg/L estabelecido pela legislação aplicável, indicando presença persistente de material particulado. Esse comportamento sugere que, embora o armazenamento contribua para certa estabilização do efluente, ele não é suficiente para promover remoção eficiente da fração sólida, tornando necessária a adoção de etapas complementares de separação físico-química ou sedimentação assistida.

O pH apresentou a maior variação entre os períodos avaliados, passando de 2,1 em 2025 para 5,54 em 2026. O valor extremamente ácido observado na primeira campanha pode estar relacionado ao descarte recente de soluções sanitizantes, detergentes ácidos ou subprodutos fermentativos do processo microbiológico. Já a elevação do pH em 2026 sugere neutralização natural ao longo do tempo, possivelmente por volatilização de compostos ácidos, tamponamento do meio ou mistura com correntes residuárias menos ácidas.

De forma geral, os resultados indicam que o tempo de retenção hidráulica no tanque de armazenamento exerce papel importante na modificação das características do efluente, funcionando parcialmente como unidade de equalização e pré-estabilização. Entretanto, mesmo após esse período de retenção, os parâmetros de DBO, DQO e sólidos suspensos ainda permaneceram em níveis que demandam tratamento adicional antes do lançamento ou reuso. Dessa forma, recomenda-se a implantação de sistema integrado envolvendo equalização, correção de pH, remoção de sólidos e tratamento biológico aeróbio, visando atender aos padrões ambientais e promover a reutilização segura da água no processo produtivo.

A Figura (a) demonstra redução progressiva do oxigênio dissolvido médio ao longo de 32 horas, passando de aproximadamente 7,9 para 6,7 mg L^{-1}. Esse comportamento evidencia atividade respiratória dos microrganismos presentes na amostra e consumo da matéria orgânica biodegradável disponível no efluente. Resultados semelhantes foram reportados por Mohseni-Bandpi et al. (2010), ao avaliarem efluentes com elevada fração biodegradável, observando consumo acelerado de oxigênio nas primeiras horas de incubação em função da atividade microbiana sobre compostos orgânicos solúveis.

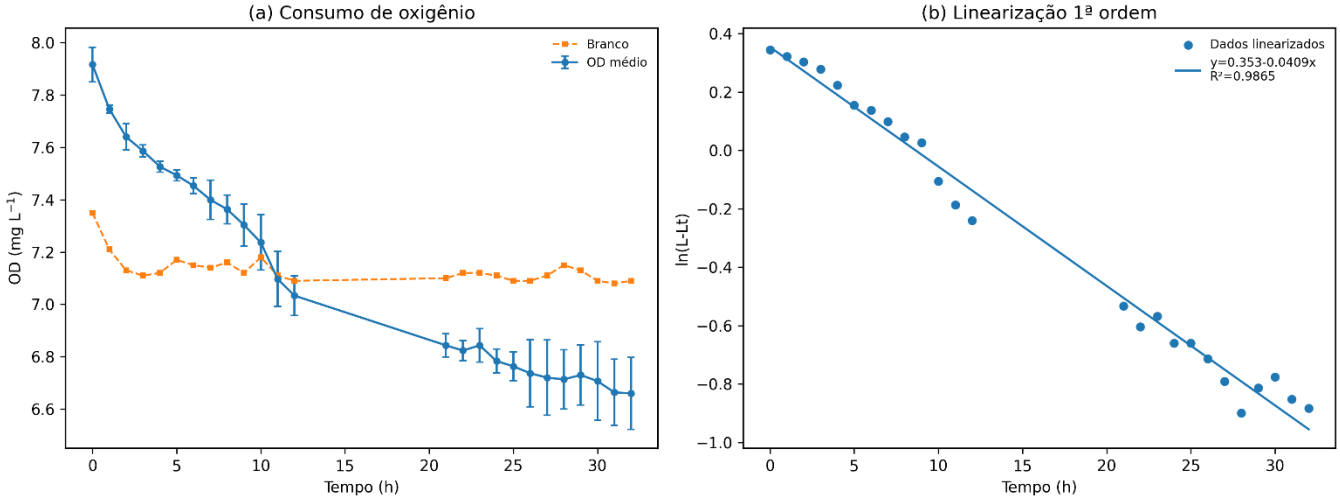


Figura 1. (a) Variação temporal do oxigênio dissolvido médio e do branco durante ensaio de biodegradação aeróbia do efluente da biofábrica. (b) Linearização do modelo cinético de primeira ordem aplicado ao consumo acumulado de oxigênio, evidenciando elevada aderência dos dados experimentais.

A redução mais acentuada do oxigênio dissolvido nas primeiras 12 horas indica predominância inicial de compostos orgânicos prontamente biodegradáveis, os quais são rapidamente assimilados pela biomassa ativa. Esse comportamento é compatível com modelos cinéticos de primeira ordem aplicados à remoção de matéria orgânica em sistemas biológicos, nos quais se observa maior taxa inicial de consumo do substrato, seguida por desaceleração progressiva à medida que a matéria orgânica disponível se reduz (VON SPERLING; DE PAOLI, 2013). Em estudo conduzido por Chmielowski et al. (2021), a fração facilmente biodegradável de efluentes agroindustriais também promoveu maior demanda inicial de oxigênio, seguida por estabilização gradual da curva respirométrica.

Considerando que o ensaio foi conduzido sem adição de inóculo externo, o consumo observado confirma que o próprio efluente continha concentração natural de microrganismos metabolicamente ativos. Esse resultado é coerente com resíduos líquidos provenientes de biofábricas, os quais podem conter células viáveis, esporos, metabólitos e nutrientes remanescentes do processo produtivo. Sistemas contendo biomassa previamente adaptada ao substrato tendem a apresentar resposta biodegradativa mais rápida quando comparados à biomassa não aclimatada, em razão da seleção microbiana e da indução enzimática específica para utilização do composto-alvo (KARTHIKEYAN; BALASUBRAMANIAN; IYER, 2018). De modo convergente, Makinia et al. (2018) demonstraram que comunidades microbianas previamente adaptadas apresentam maiores taxas respiratórias e menor tempo de resposta em ensaios cinéticos.

Na Figura X(b), a linearização do modelo de primeira ordem apresentou elevada aderência aos dados experimentais, com coeficiente de determinação de $R^2 = 0{,}9865$, indicando que a biodegradação ocorreu de forma proporcional à fração remanescente do substrato. A equação ajustada $y = 0{,}353 - 0{,}0409x$ permitiu estimar constante cinética aparente de biodegradação de $k = 0{,}0409\ h^{-1}$, equivalente a 0,974 d^{-1}, confirmando o comportamento cinético favorável do efluente e seu potencial para tratamento biológico aeróbio. O coeficiente cinético obtido pode ser considerado elevado em comparação a valores frequentemente reportados para esgotos domésticos sem aclimatação específica, geralmente entre 0,1 e 0,3 d^{-1} a 20 °C (VON SPERLING, 2014). Valores superiores normalmente indicam presença de substrato facilmente biodegradável e microbiota previamente adaptada às características do resíduo. Valores cinéticos nessa mesma ordem de grandeza foram observados por Andreottola et al. (2002), ao avaliarem sistemas biológicos submetidos a efluentes industriais com elevada biodegradabilidade.

A tendência de estabilização parcial da curva após aproximadamente 24 horas sugere esgotamento da fração orgânica mais facilmente assimilável e permanência de compostos de degradação mais lenta. Esse comportamento é típico de matrizes complexas compostas por mistura de substâncias simples e frações mais recalcitrantes (TCHOBANOGLOUS et al., 2014). Segundo Orhon e Artan (1994), efluentes industriais frequentemente apresentam compartimentalização da matéria orgânica em frações rapidamente biodegradáveis, lentamente biodegradáveis e inertes, o que explica a mudança de inclinação observada na curva de consumo de oxigênio.

Sob o ponto de vista prático, os resultados demonstram que o efluente apresenta potencial favorável ao tratamento biológico aeróbio, uma vez que a microbiota nativa foi capaz de promover consumo consistente de oxigênio e remoção inicial da matéria orgânica. Esse comportamento indica possibilidade de redução da necessidade de inoculação externa na partida de sistemas biológicos, favorecendo aplicações como lodo ativado, reatores aeróbios em batelada sequencial (SBR) ou sistemas aerados compactos.

Considerações Finais

Os resultados obtidos permitiram caracterizar, de forma preliminar, o efluente gerado em biofábrica do tipo *on farm*, evidenciando tratar-se de matriz líquida com composição variável e influenciada diretamente pelas condições operacionais da

unidade produtiva e pelo tempo de retenção hidráulica no tanque de armazenamento. As campanhas de amostragem demonstraram diferenças expressivas entre os períodos avaliados, especialmente quanto aos valores de DQO, turbidez, condutividade elétrica e pH, confirmando a importância da equalização e do controle operacional como etapas iniciais do gerenciamento desse resíduo líquido.

Os parâmetros físico-químicos analisados indicaram presença de carga orgânica moderada a elevada, sólidos suspensos acima dos limites legais e episódios de acidez acentuada, evidenciando a necessidade de tratamento prévio antes do lançamento em corpos receptores ou do reuso interno. Por outro lado, a relação entre DQO e DBO, associada aos resultados do ensaio de DBO última, demonstrou que parcela significativa da matéria orgânica presente no efluente é biodegradável, indicando viabilidade técnica para aplicação de processos biológicos aeróbios.

O ensaio cinético de consumo de oxigênio revelou atividade metabólica da microbiota autóctone presente no próprio efluente, fato particularmente relevante para sistemas oriundos de biofábricas microbiológicas. O ajuste ao modelo cinético de primeira ordem indicou elevada taxa aparente de biodegradação, sugerindo que a biomassa nativa encontra-se adaptada ao substrato residual gerado no processo produtivo. Esse resultado reforça o potencial de utilização de sistemas aeróbios compactos, reatores em batelada sequencial ou processos de lodo ativado para o tratamento desse tipo de efluente.

De forma integrada, conclui-se que o efluente estudado apresenta características compatíveis com tratamento combinado, envolvendo equalização, correção de pH, remoção físico-química de sólidos e etapa biológica aeróbia subsequente. Tal arranjo pode viabilizar não apenas a conformidade ambiental do lançamento, mas também o reuso hídrico interno, contribuindo para redução do consumo de água e fortalecimento de práticas sustentáveis no setor de bioinsumos.

Como continuidade do estudo, recomenda-se: (i) ampliar o número de campanhas amostrais ao longo do ano agrícola; (ii) avaliar a influência dos diferentes bioinsumos produzidos sobre a composição do efluente; (iii) realizar ensaios de tratabilidade em escala piloto com diferentes tempos de retenção hidráulica; (iv) testar processos físico-químicos complementares, como coagulação/floculação e flotação; (v) investigar parâmetros microbiológicos; e (vi) estabelecer critérios de qualidade para reuso operacional da água tratada dentro da própria biofábrica.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós Graduação em Qualidade Ambiental da UFU pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas.

ANDREOTTOLA, G.; FOLADORI, P.; RAGAZZI, M.; TATÀNO, F. Experimental comparison between MBR and activated sludge system for the treatment of industrial wastewater. **Water Science and Technology**, London, v. 46, n. 9, p. 209-216, 2002.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, DC, 2022.

AMARAL, D. F. S. Produção *on farm* de insumos biológicos no Brasil: benefícios, riscos e tendências. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard methods for the examination of water and wastewater. 24. ed. Washington, DC, 2022.

BRASIL. **Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002**. Regulamenta a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2002.

BRASIL. **Decreto nº 6.913, de 23 de julho de 2009**. Altera o Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2011.

Referências complementares (ABNT NBR 6023:2018)

BERTOLINO, S. M.; CARVALHO, C. F.; AQUINO, S. F. Caracterização e biodegradabilidade aeróbia e anaeróbia dos esgotos produzidos em campus universitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 271-277, jul./set. 2008. DOI: 10.1590/S1413-41522008000300005.

CHMIELOWSKI, K.; ŚLIZOWSKI, R.; BUGAJSKI, P. Oxygen uptake rate as a tool for assessment of biodegradability of agro-industrial wastewater. **Desalination and Water Treatment**, v. 214, p. 168-176, 2021.

KARTHIKEYAN, O. P.; BALASUBRAMANIAN, R.; IYER, P. V. R. **Adaptation of microbial communities for enhanced biodegradation of industrial wastewaters: mechanisms and process implications**. *Bioresource Technology*, v. 268, p. 716–725, 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.08.021.

MAKINIA, J.; ROSSO, D.; COKGOR, E. U. Activated sludge adaptation and kinetic response under variable wastewater composition. **Water Research**, v. 137, p. 323-332, 2018.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM); Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-MG). **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08, de 21 de novembro de 2022**. Estabelece diretrizes para lançamento de efluentes no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2022.

MOHSENI-BANDPI, A.; ELLIS, T. G.; ALLEN, D. G. Oxygen uptake kinetics for readily biodegradable organic matter in industrial effluents. **Biochemical Engineering Journal**, v. 51, p. 50-56, 2010.

ORHON, D.; ARTAN, N. **Modeling of activated sludge systems**. Lancaster: Technomic Publishing, 1994.

RAVELE, M. P.; OLATUNDE, O. C.; OYEWO, O. A.; MAKGATO, S. S.; ONWUDIWE, D. C. Plant-based coagulants for wastewater treatment: recent advances and applications. **Cleaner Water**, v. 1, p. 100147, 2025. DOI: 10.1016/j.clwat.2025.100147.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

VON SPERLING, M.; DE PAOLI, A. C. **First-order COD decay coefficients associated with different hydraulic models applied to planted and unplanted horizontal subsurface-flow constructed wetlands**. *Ecological Engineering*, v. 57, p. 205–209, 2013. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.036.

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE ÁGUA EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL

1 Nathalia Mendes Felizzola, 2 Maria Cristina de Almeida Silva, 3 Anelise Nardi Hüffner
1 Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS, e-mail: nathalia.felizzola@gmail.com, 2 Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS, e-mail: maria.almeida@ufrgs.br, 3 Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS, e-mail: ane.huffner@gmail.com

Palavras-chave: Recuperação de água, reuso industrial, sustentabilidade industrial.

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da reimplantação do sistema de recuperação e reutilização de água proveniente dos processos operacionais da estação de tratamento de água de uma planta industrial. A investigação envolveu análise dos fluxos internos, caracterização das correntes disponíveis para reuso, diagnóstico das condições estruturais do sistema desativado e estudo de retorno financeiro baseado em estimativas atualizadas de consumo. Os resultados mostraram que a água utilizada na retrolavagem dos filtros, juntamente com as vazões contínuas dos analisadores automáticos, somam mais de onze mil metros cúbicos anuais de água tratada atualmente descartada. A interrupção da recuperação gerou desperdícios significativos de um recurso com qualidade suficiente para retorno ao processo ou uso auxiliar após tratamento complementar. A avaliação técnica indicou necessidade de modernizações, como substituição do reservatório degradado, renovação parcial das tubulações e instalação de instrumentação para monitoramento contínuo. A análise econômica confirmou a viabilidade financeira do projeto, com tempo de retorno do investimento estimado de aproximadamente 4 a 7 anos, compatível com o horizonte considerado pela empresa. Além das vantagens econômicas, o projeto proporciona benefícios ambientais importantes, como redução de efluentes descartados, menor dependência de água potável e maior resiliência hídrica da unidade. A reimplantação do sistema de recuperação representa, portanto, uma estratégia eficiente para otimizar recursos, aprimorar o desempenho ambiental e fortalecer a gestão hídrica da operação. As conclusões obtidas evidenciam que a recuperação de água não apenas reduz desperdícios, mas também redefine a forma como a gestão hídrica pode impulsionar eficiência, segurança e sustentabilidade industrial.

Introdução

A água constitui um recurso natural essencial para a vida e para o desenvolvimento econômico, desempenhando papel estratégico em diversos setores produtivos, notadamente na indústria de alimentos e bebidas. No contexto atual, a gestão eficiente da água tornou-se um desafio crescente devido às mudanças climáticas, que estão intensificando o ciclo hidrológico global. Todos componentes do ciclo da água - precipitação, evaporação, derretimento de neve e gelo, e disponibilidade de água doce - estão sendo afetadas por essas alterações climáticas, resultando em padrões mais extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, o que aumenta a vulnerabilidade das regiões que já enfrentam escassez hídrica (“IPCC AR6 Working Group 1”, 2021).

Consequentemente, a pressão sobre os recursos hídricos se intensifica, exigindo estratégias adaptativas eficazes para garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade ambiental. Na indústria de bebidas, em especial, o consumo de água é elevado tanto para compor o produto final quanto para as operações de limpeza, processos auxiliares e utilidades. A utilização ineficiente desse recurso implica não apenas em custos operacionais adicionais, mas também em potenciais riscos de impacto ambiental e de imagem corporativa (Fonseca, 2023). Dessa forma, estratégias de reúso e otimização hídrica vêm ganhando relevância como alternativa para atender às exigências legais e de sustentabilidade, além de promover ganhos econômicos e competitivos (Chesnutt, 2021).

O presente estudo foi desenvolvido em uma planta industrial de bebidas não alcoólicas localizada no norte da França, onde se identificou a necessidade de aprimorar o consumo hídrico por meio da reativação de um sistema de recuperação de água da Estação de Tratamento de Água (ETA). O sistema anteriormente implantado compreendia a captação de dois fluxos principais: (i) a água de retrolavagem dos filtros de carvão e areia; e (ii) a água descartada pelos analisadores automáticos de parâmetros de qualidade da água. Entretanto, em razão da corrosão do tanque de recuperação e de riscos associados à qualidade da água, o sistema foi desativado, levando ao descarte direto desses volumes como efluentes.

A desativação do sistema resultou em perdas significativas de água potável tratada, aumento do consumo hídrico total da unidade e maior dependência de recursos naturais da região. Nesse contexto, destaca-se o papel da Direção Regional do Meio Ambiente, do Ordenamento Territorial e da Habitação (DREAL, sigla em francês), um serviço descentralizado do Estado francês vinculado aos Ministérios da Transição Ecológica e da Coesão dos Territórios (“Direction régionale de l’environnement, de l’aménagement et du logement (DREAL) - Hauts-de-France - Siège de Lille - Annuaire | Service-Public.fr”, 2025). Sob autoridade do prefeito regional, a entidade implementa políticas relacionadas ao meio ambiente, ao planejamento territorial e à gestão da água, bem como avalia os impactos ambientais dos projetos públicos e privados (“Unité départementale Nord de la Direction régionale environnement, aménagement et logement (DREAL)”, 2025). Além disso, a região Norte da França tem enfrentado episódios graves de seca, acionando os níveis de alerta do plano nacional de escassez hídrica - conhecidos como “vigilância”, “alerta”, “alerta reforçado” e “crise” (“Pourquoi il y a la sécheresse en France et que faire contre la sécheresse”, 2024).

Em junho de 2025, por exemplo, o departamento do Norte foi colocado em alerta de seca reforçada, com restrições como a proibição de irrigação de jardins, enchimento de piscinas e lavagem de veículos em horários específicos (“Sécheresse dans le

Nord", 2025). Nesses cenários, uma gestão responsável e otimizada da água torna-se essencial, tanto para garantir a continuidade das operações industriais quanto para preservar os recursos hídricos diante das exigências legais e dos riscos crescentes de indisponibilidade.

O consumo excessivo de água em cenários de seca severa pode levar a medidas restritivas cada vez mais rígidas impostas pelos órgãos gestores. Em fases críticas da "vigilance sécheresse", as indústrias podem ser obrigadas a reduzir drasticamente suas captações ou, em casos extremos, até interromper totalmente a produção para priorizar o abastecimento humano e agrícola ("Guide de mise en œuvre des mesures de restriction des usages de l'eau en période de sécheresse", 2022). Para uma fábrica de bebidas, tal cenário significaria não apenas prejuízos econômicos imediatos e perda de competitividade, mas também riscos de ruptura na cadeia de suprimentos e impacto negativo na imagem institucional.

A adoção de práticas de reúso e a otimização contínua do consumo hídrico tornam-se estratégias indispensáveis para assegurar a resiliência operacional e o cumprimento das exigências legais e ambientais (Tzanakakis, 2023). Diante dessa realidade, a questão de pesquisa que orienta o presente trabalho é: "como a reimplantação do sistema de recuperação de água da Estação de Tratamento de Água de uma planta industrial pode contribuir para a redução do consumo de água potável e para a otimização da gestão hídrica da unidade?".

Materiais e métodos

O estudo foi conduzido em uma planta industrial de bebidas localizada no norte da França, em operação desde a década de 1980, com múltiplas linhas de produção e elevada demanda hídrica. A água utilizada provém da rede pública e passa por tratamento complementar em uma ETA própria, composta por etapas de filtração em areia, decarbonatação, cloração, decloração por carvão ativado, desinfecção por radiação ultravioleta e, em alguns casos, osmose reversa.

A metodologia adotada baseou-se em um estudo de caso, estruturado em etapas sequenciais: diagnóstico do sistema existente, levantamento de dados operacionais, estimativa de volumes de água recuperáveis, proposição técnica de reimplantação e análise de viabilidade econômica. Inicialmente, foi realizada a caracterização do sistema de recuperação de água anteriormente existente e atualmente desativado, incluindo a identificação das causas de sua interrupção.

Foram analisados dois principais fluxos com potencial de reaproveitamento: (i) a água proveniente da retrolavagem de filtros de areia e carvão ativado e (ii) os descartes contínuos dos analisadores automáticos de qualidade da água. A quantificação desses fluxos foi realizada com base em dados operacionais históricos e medições estimadas. A proposição técnica incluiu a definição de melhorias estruturais, seleção de materiais e equipamentos, e elaboração de um novo arranjo conceitual do sistema de recuperação.

A análise econômica foi conduzida por meio da estimativa de custos de implantação, economia gerada pela redução do consumo de água potável e cálculo do tempo de retorno do investimento (payback).

Descrição da Estação de Tratamento de Água

A água da unidade industrial vem da rede pública e já é potável, mas passa por tratamento adicional para atender padrões mais rigorosos da indústria de bebidas. Após a entrada, parte é usada em áreas administrativas e parte segue para a ETA. O tratamento começa com filtração em areia para remover partículas sólidas, seguida de decarbonatação para reduzir a dureza causada por cálcio e carbonatos. Depois ocorre a cloração para desinfecção. Parte dessa água já é usada em atividades menos críticas, como limpeza e lubrificação. Para usos mais exigentes, a água passa por decloração com carvão ativado, removendo o cloro que pode afetar o sabor e gerar subprodutos indesejáveis. Em seguida, é tratada com radiação UV para eliminar microrganismos, tornando-a adequada como ingrediente e para limpeza interna de equipamentos. Uma fração ainda passa por osmose reversa, removendo sais, metais e outros contaminantes, gerando água de altíssima pureza para processos mais sensíveis. Essa água recebe um tratamento UV final antes do uso. Assim, a ETA combina várias etapas para garantir qualidade, segurança e adequação da água a diferentes usos dentro da indústria.

Sistema de Reuso de Água: Histórico e Desativação

O sistema de reuso de água da planta industrial, atualmente desativado, foi projetado para reduzir o consumo de água externa e otimizar o uso interno. Ele reaproveitava água do enxágue final da lavagem de filtros (areia e carvão ativado) e dos descartes de analisadores automáticos de qualidade. Essa água, de melhor qualidade após o enxágue ou monitoramento, era armazenada e direcionada ao tanque R09, de onde retornava ao início do tratamento, passando novamente por todas as etapas da ETA. Antes do reuso, a água era rigorosamente analisada, garantindo parâmetros como baixa turbidez, ausência de microrganismos e níveis controlados de cloro e pH. O sistema contribuía para economia hídrica, redução de desperdícios e maior sustentabilidade da planta. No entanto, problemas estruturais e operacionais — como a deterioração do tanque R09 e falhas no sistema de desinfecção UV — comprometeram sua confiabilidade, levando à desativação em 2021. A falta de priorização, recursos e manutenção também influenciou essa decisão. Em 2025, com a possibilidade de novo investimento, surgiu o interesse em reativar o sistema, motivando a realização de um estudo de viabilidade técnica e econômica para avaliar sua retomada com segurança e eficiência

Resultados e discussão

A avaliação do potencial de recuperação de água ETA industrial foi conduzida com base em diagnóstico operacional, medições experimentais e análise de dados históricos, permitindo a identificação das principais fontes de geração de efluentes passíveis de reúso e das condições necessárias para a reimplantação do sistema.

Inicialmente, o diagnóstico evidenciou que a interrupção do sistema de recuperação esteve associada a limitações estruturais e operacionais, destacando-se a degradação do reservatório de armazenamento, falhas no controle de desinfecção e ausência de monitoramento contínuo de parâmetros de qualidade. Esses fatores comprometem a segurança sanitária do sistema e indicam que a retomada do reúso depende da implementação de medidas de controle mais rigorosas, incluindo monitoramento microbiológico periódico, controle de cloro residual e adequações na infraestrutura hidráulica. O resultado obtido reforça que sistemas de reúso em ambiente industrial devem ser operados sob uma abordagem integrada de controle de qualidade, garantindo confiabilidade operacional e segurança do processo.

A estimativa do volume recuperável foi realizada a partir de duas fontes principais: a água proveniente da retrolavagem dos filtros e as vazões contínuas oriundas dos analisadores automáticos da ETA. No caso da retrolavagem, foram realizados testes experimentais de turbidez ao longo do tempo de enxágue. Ao longo do proceso, observou-se uma redução progressiva da turbidez, indicando melhoria da qualidade da água.

As curvas de turbidez obtidas para os filtros D32 e D34 (Figura 1 e 2) demonstram que o limite de qualidade adotado para reúso (turbidez inferior a 1 NTU) é atingido apenas na fase final do enxágue, após aproximadamente 10 minutos para o filtro D32 e 3 minutos para o filtro D34. Tal comportamento evidencia que apenas uma fração do volume total utilizado na lavagem apresenta qualidade adequada para recuperação, sendo necessária a definição de janelas operacionais específicas para aproveitamento da água.

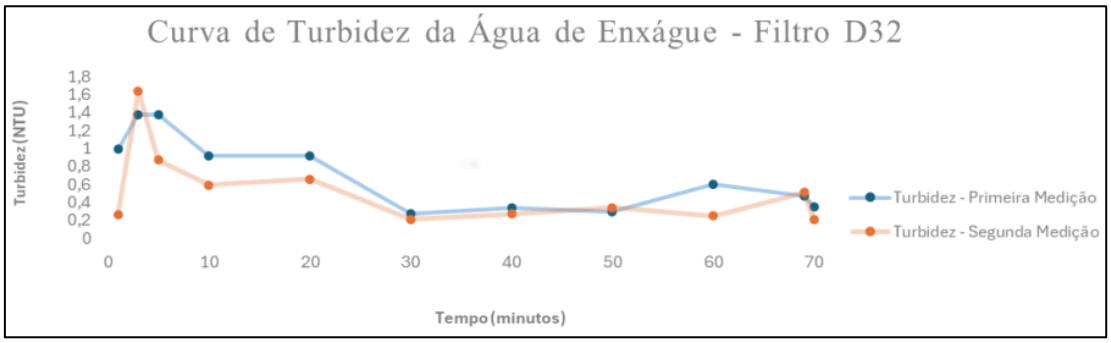


Figura 1: Curva de turbidez da água de enxágue do filtro D32
Fonte: Elaborada pela autora.

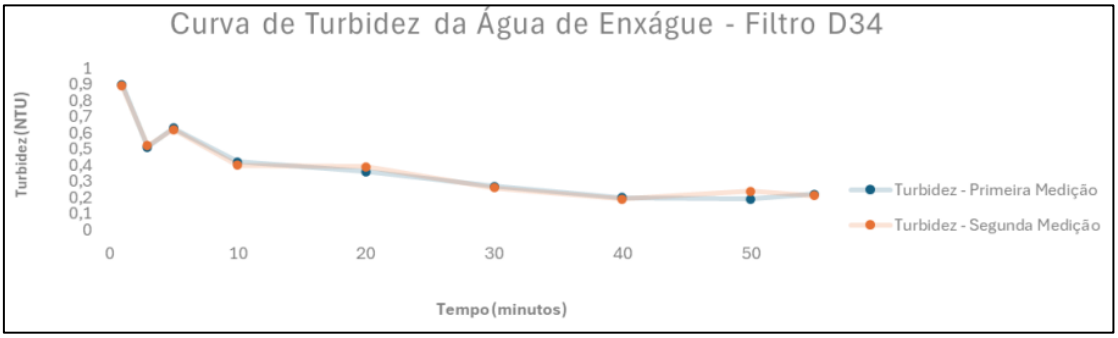


Figura 2: Curva de turbidez da água de enxágue do filtro D34
Fonte: Elaborada pela autora.

Com base em informações operacionais da ETA, sabe-se que o volume total de água utilizado na etapa de enxágue de cada ciclo é de aproximadamente 80 m³. Assim, considerando os resultados obtidos nos ensaios, estimou-se o volume potencialmente recuperável em função do tempo durante o qual a água apresenta turbidez inferior a 1 NTU. Por exemplo, se apenas os últimos 10 minutos de um ciclo de 30 minutos atendem ao critério de qualidade, então cerca de um terço do volume total da lavagem é considerado apto para reúso. As estimativas resultantes encontram-se na Tabela 01.

Parâmetro	2024 (jan - dez)	2025 (jan - ago)
Número de ciclos	118	59
Volume recuperado por ciclo (m³)	60	60
Volume total recuperado (m³)	7.080	3.540

Tabela 01: Estimativa do volume total de água recuperável nos filtros de carvão e areia (2024–2025)
Fonte: Elaborada pela autora.

Com base nesses resultados e considerando a capacidade do reservatório existente, estimou-se um volume médio recuperável de aproximadamente 60 m³ por ciclo de lavagem. A partir dos dados operacionais de 2024, correspondentes a 118

ciclos, o volume anual recuperável proveniente da retrolavagem foi estimado em 7.080 m³. Esse resultado indica que a retrolavagem constitui a principal fonte de recuperação hídrica do sistema, tanto em termos de volume quanto de previsibilidade operacional. No entanto, a limitação imposta pela capacidade do reservatório configura um gargalo estrutural, restringindo o aproveitamento integral do potencial identificado.

Adicionalmente, a análise das vazões provenientes dos analisadores automáticos indicou a existência de um fluxo contínuo e relativamente constante, permitindo a estimativa de um volume anual recuperável de 4.172 m³. Embora inferior ao volume gerado pelas retrolavagens, essa fonte apresenta relevância operacional devido à sua continuidade, contribuindo para a estabilidade do sistema de reúso e reduzindo a dependência de eventos intermitentes.

A integração das duas fontes avaliadas resultou em um volume total recuperável de 11.252 m³ por ano, evidenciando um potencial expressivo de economia hídrica. A distribuição relativa dos volumes indica que aproximadamente 63% do total provém da retrolavagem dos filtros, enquanto 37% é oriundo dos analisadores automáticos. Esses resultados demonstram que a combinação de fontes intermitentes e contínuas constitui uma estratégia eficiente para maximização do reúso, aumentando a robustez do sistema.

No que se refere à reimplantação do sistema, a proposta técnica desenvolvida prevê a reinserção da água recuperada no início do processo de tratamento, conforme ilustrado na Figura 3. A configuração proposta permite que a água reutilizada seja novamente submetida a todas as etapas da ETA, minimizando riscos sanitários e garantindo conformidade com os padrões de qualidade. Tal abordagem caracteriza um sistema de reúso indireto interno, amplamente recomendado para aplicações industriais devido ao seu maior nível de segurança operacional. No entanto, sua efetividade está diretamente associada à implementação de sistemas de monitoramento contínuo e ao adequado controle da desinfecção.

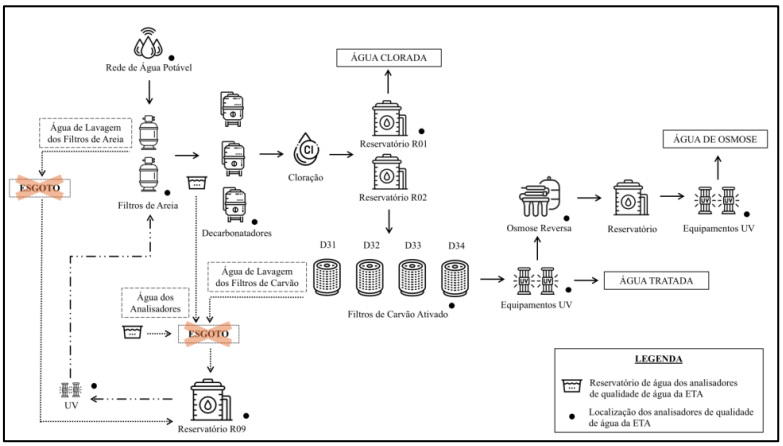


Figura 3: Diagrama conceitual do sistema proposto de recuperação e reutilização de água da ETA
Fonte: Elaborada pela autora.

A análise econômica demonstrou que o volume recuperável corresponde a uma economia potencial anual de aproximadamente 40.844 €, considerando o custo da água no contexto da planta industrial. O custo energético associado ao bombeamento mostrou-se pouco representativo no balanço global do sistema, indicando que os benefícios econômicos são predominantemente decorrentes da redução do consumo de água potável. A avaliação do Valor Presente Líquido (VPL) indicou viabilidade econômica do projeto, com tempo de retorno do investimento estimado entre 4 e 7 anos, conforme apresentado na Figura 4.

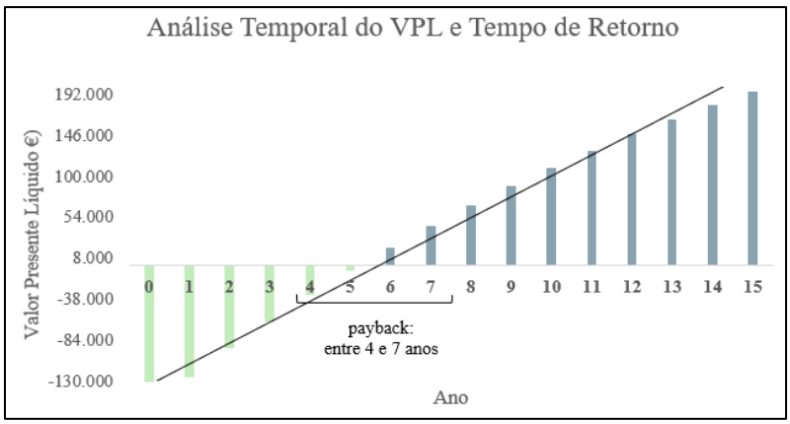


Figura 4: Análise Temporal do Valor Presente Líquido e Tempo de Retorno
Fonte: Elaborada pela autora

De forma integrada, os resultados obtidos demonstram que a reimplantação do sistema de recuperação de água apresenta viabilidade técnica, econômica e ambiental. O potencial de recuperação identificado é significativo, sendo condicionado, entretanto, à superação de limitações estruturais e à implementação de um sistema robusto de controle de qualidade. Além disso, os benefícios associados não se restringem à economia de água, incluindo também a redução da geração de efluentes e o aumento da resiliência hídrica do sistema industrial, aspectos particularmente relevantes em cenários de crescente escassez de recursos hídricos.

Conclusões

O estudo permitiu demonstrar que a reimplantação do sistema de recuperação e reutilização de água da estação de tratamento de água da planta industrial apresenta viabilidade técnica e econômica. A análise dos fluxos hídricos confirmou que as retrolavagens dos filtros representam a fonte mais expressiva de reaproveitamento, complementada pelas vazões contínuas dos analisadores automáticos. A desativação do sistema de recuperação resultou em desperdícios significativos de água potável já tratada, recurso estratégico que poderia ser reinserido em etapas do processo produtivo ou destinado a usos auxiliares após condicionamento adequado.

A avaliação econômica indicou que o investimento necessário permanece amplamente dentro do limite orçamentário estabelecido pela empresa, ao mesmo tempo em que proporciona economias anuais significativas e impacto positivo direto na redução do consumo de água potável. Além disso, a proposta de reativação fortalece a resiliência hídrica da unidade industrial, ampliando a segurança operacional em períodos de escassez e contribuindo para o cumprimento de exigências ambientais cada vez mais rigorosas. O reaproveitamento interno de água também favorece a sustentabilidade da operação, reduzindo o volume de efluentes descartados e promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais.

Embora o estudo confirme a viabilidade geral da reimplantação, foram identificados elementos que exigem atenção antes da execução definitiva, como a substituição do reservatório deteriorado, a renovação parcial das tubulações e a instalação de um sistema de monitoramento robusto que garanta controle contínuo da qualidade da água reaproveitada. Tais ajustes são essenciais para assegurar segurança sanitária, estabilidade operacional e alinhamento integral com a regulamentação francesa aplicável ao setor de alimentos e bebidas.

Para garantir continuidade e eficácia ao longo do tempo, recomenda-se a adoção de um plano estruturado de monitoramento microbiológico e físico-químico, inspeções regulares, manutenção preventiva de todos os equipamentos envolvidos e avaliação periódica do desempenho do sistema. A reativação do sistema de recuperação representa, portanto, uma estratégia clara para reduzir perdas, otimizar recursos, fortalecer a sustentabilidade da operação e elevar o padrão de gestão hídrica da unidade. A análise conduzida oferece uma base sólida para a tomada de decisão e evidencia que a retomada do sistema pode contribuir de maneira significativa para a eficiência operacional e ambiental da indústria.

Referências bibliográficas

CHESNUTT, T. *The economics of sustainable industrial water use, reuse, and the value of water*. In: IWA PUBLISHING. *IWA Publishing eBooks*. [S.l.]: IWA Publishing, 2021. p. 199–205.

DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DU LOGEMENT (DREAL) - HAUTS-DE-FRANCE. *Siège de Lille - Annuaire | Service-Public.fr*. Disponível em: <https://lannuaire.service-public.fr/hauts-de-france/nord/e32151fd-e462-401c-86c8-4b762f8b1e20>. Acesso em: 29 set. 2025.

FONSECA, M. *Gestão sustentável do consumo de água numa indústria alimentar*. 2023.

GUIDE de mise en œuvre des mesures de restriction des usages de l'eau en période de sécheresse. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide_secheresse.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers*. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report (AR6). [S.l.]: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

POURQUOI il y a la sécheresse en France et que faire contre la sécheresse. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2025-09/secheresse_economiser_eau_FALC.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

SÉCHERESSE dans le Nord: le bassin versant de l'Yser placé en alerte. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.nord.gouv.fr/Actualites/Actualites/Secheresse-dans-le-Nord-le-bassin-versant-de-l-Yser
place-en-alerte>. Acesso em: 29 set. 2025.

TZANAKAKIS, V.; CAPODAGLIO, A.; ANGELAKIS, A. *Insights into global water reuse opportunities*. Sustainability, v. 15, n. 17, p. 13007, 2023.

PARTIDA E MONITORAMENTO OPERACIONAL DE UMA LAGOA AERADA MECANICAMENTE NO TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS E INDUSTRIAL: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E RESPIROMÉTRICA

1José Gilmar da Silva do Nascimento, 2Everton Oliveira Ponte Perrote, 3Marcilene Lopes, 4Marcos Vinicius Silva Dornelles, 5Jamyson Enzon Melo da Silva, 6José Demontier Vieira de Souza Filho, 7Savytha Hellen Lopes Lima, 8Silvio Luiz de Sousa Rollemberg

1 Universidade Federal do Ceará, e-mail: biocontroller@recoveryambiental.com; 2 Instituto Federal de educação do Ceará, e-mail:evertonifce@gmail.com; 3 Instituto Federal de educação do Ceará, e-mail:lopesmarcilene467@gmail.com; 4 Instituto Federal de educação do Ceará, e-mail: m.viniciusdornelles@gmail.com; 5 Universidade de Fortaleza, e-mail: jamysonenzon@gmail.com; 6 Universidade Federal do Ceará, e-mail: demontier.vieira@gmail.com; 7 Instituto Federal de educação do Ceará, e-mail: savythahllima@gmail.com; 8 Universidade Federal do Ceará, e-mail: silviorollemberg@gmail.com

Palavras-chave: lagoa aerada; tratamento de efluentes; partida de sistemas biológicos

Resumo

A fase de partida de sistemas biológicos de tratamento de efluentes é determinante para a estabilidade operacional e eficiência do processo ao longo do tempo. Este estudo avaliou a partida e o comportamento inicial de uma lagoa de estabilização aerada mecanicamente utilizada no tratamento de efluentes sanitários de uma unidade industrial localizada no Nordeste do Brasil. O sistema foi inoculado com aproximadamente 30 m³ de lodo proveniente de uma estação de lodos ativados, seguido por alimentação escalonada do efluente. Foram monitorados parâmetros físico-químicos, incluindo pH, oxigênio dissolvido, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV), além da sedimentabilidade do lodo e ensaios de respirometria. Os resultados indicaram evolução positiva do pH, manutenção de concentrações adequadas de oxigênio dissolvido, relações SSV/SST entre 0,73 e 0,78, compatíveis com biomassa ativa, e melhora gradual da sedimentabilidade do lodo. Os ensaios respirométricos evidenciaram baixa atividade metabólica inicial, característica de biomassa jovem, reforçando a importância do controle de carga orgânica durante a partida. O sistema apresentou condições favoráveis para a etapa subsequente de mistura com efluente industrial tratado.

Introdução

Lagoas aeradas mecanicamente são amplamente utilizadas no tratamento biológico de efluentes sanitários e industriais devido à sua simplicidade operacional, elevada capacidade de amortecimento de cargas orgânicas e custos relativamente reduzidos quando comparadas a sistemas mais complexos, como lodos ativados convencionais (Von Sperling, 2014).

Apesar de sua robustez, a fase de partida desses sistemas representa um período crítico, no qual a biomassa precisa se adaptar às condições ambientais e à carga orgânica afluente. Falhas nessa etapa podem resultar em baixa eficiência de remoção, problemas de odor, instabilidade do lodo e prolongamento do tempo até a plena operação (Metcalf & Eddy, 2014).

A inoculação com lodo proveniente de sistemas biológicos estabilizados é uma estratégia amplamente adotada para acelerar a aclimatação microbiana. No entanto, o acompanhamento sistemático de parâmetros físico-químicos e biológicos é indispensável para avaliar o desempenho do sistema durante a partida. Nesse contexto, a respirometria se destaca como uma ferramenta eficiente para monitorar a atividade metabólica da biomassa em tempo real, permitindo inferir sobre sua capacidade de degradação da matéria orgânica (Barros, 2014).

O presente estudo tem como objetivo avaliar a partida e o comportamento inicial de uma lagoa aerada mecanicamente destinada ao tratamento de efluentes sanitários, por meio do monitoramento de parâmetros físico-químicos, da sedimentabilidade do lodo e da atividade metabólica microbiana avaliada por ensaios de respirometria.

Materiais e Métodos

O sistema de tratamento avaliado pertence a uma unidade industrial localizada no município de Pacajus, Ceará, Brasil. O efluente industrial é tratado previamente por um sistema físico-químico de coagulação e decantação, seguido de tratamento biológico. O efluente sanitário, por sua vez, é tratado exclusivamente em uma lagoa de estabilização aerada mecanicamente. Durante o período avaliado, a lagoa aerada encontrava-se em fase de partida, não recebendo ainda o efluente industrial tratado. O sistema passou por processo de inoculação e alimentação escalonada, visando à aclimatação da biomassa.

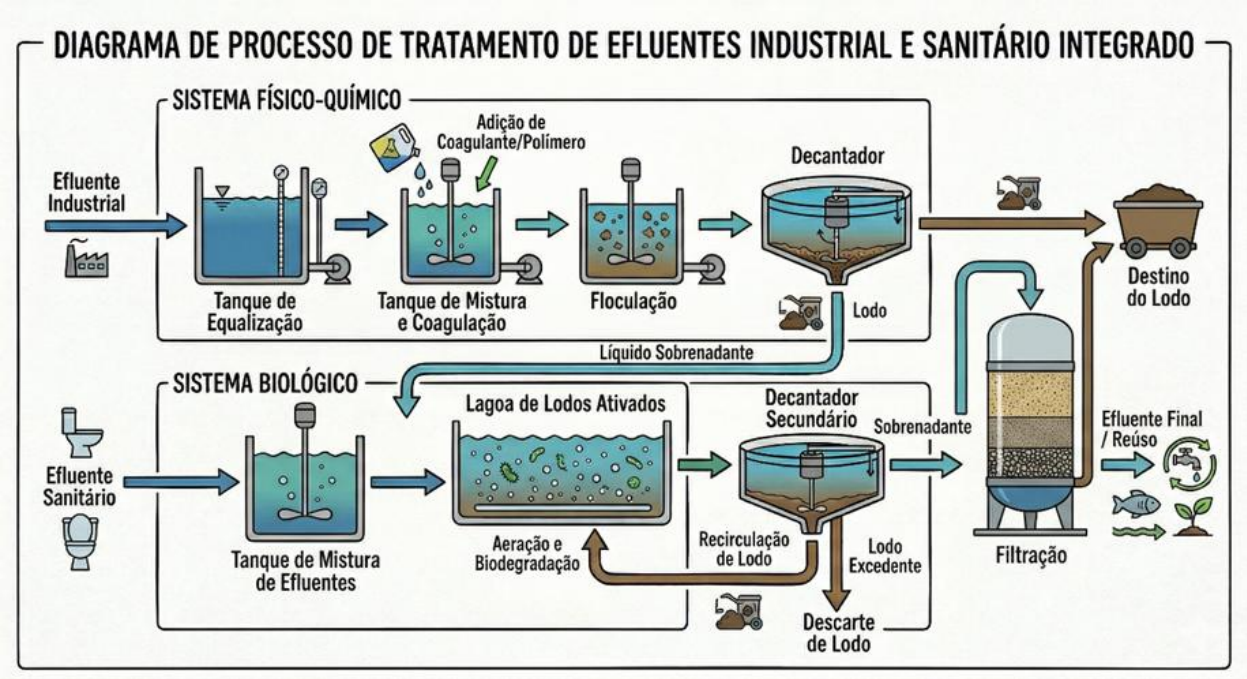


Figura 01: Sistema de tratamento combinado, físico-químico seguido de polimento em lagoa aerada.
Fonte: Autor (2026)

Inoculação e estratégia de partida

Foram inoculados aproximadamente 30 m³ de lodo proveniente de uma estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados. Inicialmente, a lagoa foi preenchida com efluente sanitário bruto até atingir o nível adequado para operação dos aeradores, evitando cavitação.

A alimentação do sistema foi realizada de forma escalonada, conforme as seguintes etapas:

- Semanas 1 a 3: aplicação de 25 a 30% da carga orgânica, com operação contínua dos aeradores, mantendo oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg/L;
- Semanas 4 a 6: aumento da carga para aproximadamente 50%, com reforço da biomassa e observação da adaptação microbiana;
- Semanas 8 a 10: operação próxima à carga plena, com expectativa de formação de flocos biológicos bem definidos.

Durante o período de monitoramento, foram coletadas amostras do efluente bruto, do licor misto da lagoa aerada e do efluente tratado. Os parâmetros analisados incluíram pH, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais (TDS), oxigênio dissolvido (OD), turbidez, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV).

As análises foram realizadas conforme metodologias padronizadas descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

Respirometria

A taxa de consumo de oxigênio (TCO) foi o parâmetro utilizado para obter as características da biomassa dos principais grupos funcionais que utilizam o oxigênio como aceptor final de elétrons, por vias heterotróficas e nitrificantes. Assim, os valores de TCO permitem conhecer e monitorar a atividade metabólica dos microrganismos presentes no lodo em tempo real através do respirograma. As taxas foram obtidas através do respirômetro Beluga e do software Resp43 com concentração de OD mínima e máxima fixadas em 3,0 e 4,0 $mg \cdot L^{-1}$, respectivamente, para garantir condições metabólicas ideais para os diferentes grupos estudados. Para a execução desses testes, além do respirômetro acima citado, foram utilizados: um béquer de 1 litros para comportar o licor misto de lodo, um agitador mecânico para manter a biomassa em constante suspensão durante os testes, um aerador com pedra porosa, um eletrodo de oxigênio (Modelo YSI 5718), um notebook com o software Resp43 instalado para gerar o respirograma (Fig. 2) e os substratos ácido acético (1000 mg $DQO \cdot L^{-1}$ grupos microbianos presentes na biomassa.

A partir dos respirogramas obtidos (taxa de consumo de oxigênio em função do tempo), foram estimadas a taxa de consumo de oxigênio exógena e a concentração de biomassa ativa, conforme metodologias descritas por Barros (2014) e Silva Filho et al. (2015).

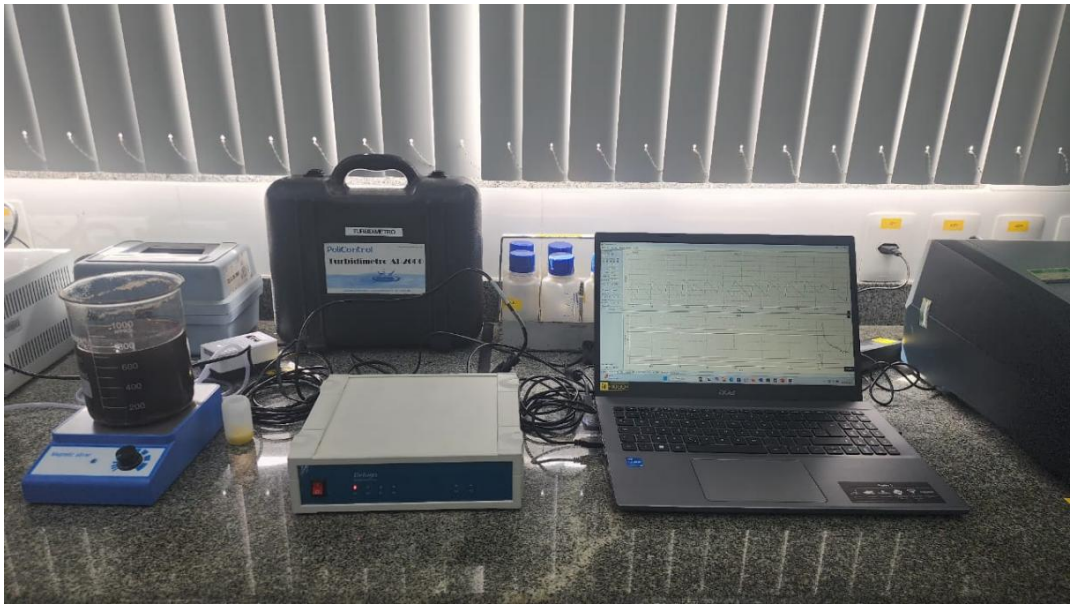


Figura 02 - Configuração do ensaio de respirometria. Fonte: Autor (2026)

Resultados e discussão

Durante o mês de dezembro, observou-se uma evolução positiva do pH do licor misto, com valores inicialmente ácidos (próximos a 4,3) e estabilização em torno de 6,7 ao final do período, indicando adaptação progressiva da biomassa. Como mostra a figura 3.

Os resultados de res pirometria mostraram que o lodo ainda estava em fase de aclimatação e não possuía grande atividade biológica. Com adição de efluente industrial na proporção de 20% em relação ao volume de entrada da Lagoa obteve-se um aumento na TCO.

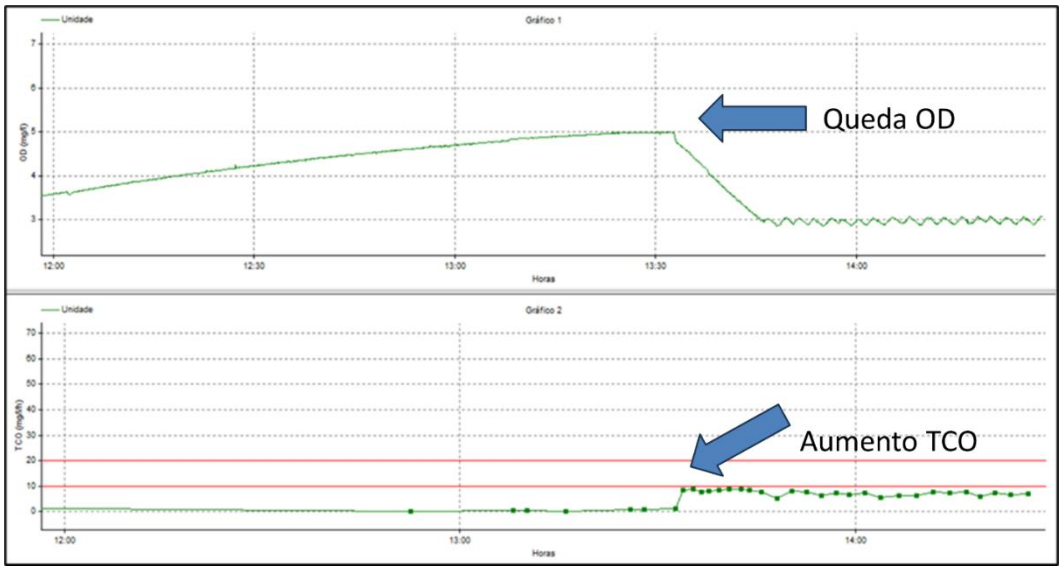


Figura 03 – Respirograma do ensaio de lodo suplementado com efluente industrial. Fonte: Autor (2026)

A concentração de SSV (sólidos suspensos voláteis) manteve a média de 578,0 mg/L, durante o período de avaliação, valores de literatura para uma configuração semelhante, seria da ordem de 1500 mg/L. Para estimular o aumento de SSV foi proposto os ensaios de respirometria, utilizando ácido lático e dextrose anidra, os ensaios de respirometria são mostrados a seguir.

A disponibilidade de uma fonte externa de carbono é o fator determinante para a manutenção da taxa de crescimento específico (μ) das bactérias heterotróficas em sistemas de lodos ativados. Quando o afluente apresenta baixa carga orgânica, a biomassa entra em fase de respiração endógena acentuada, onde as células consomem as próprias reservas intracelulares para sobrevivência. A dosagem controlada de carbono externo garante que o substrato não seja o fator limitante, permitindo que os microrganismos operem em uma fase de crescimento logarítmico ou de declínio controlado, essencial para a síntese de polímeros extracelulares (EPS) que promovem o crescimento do floco de lodo.

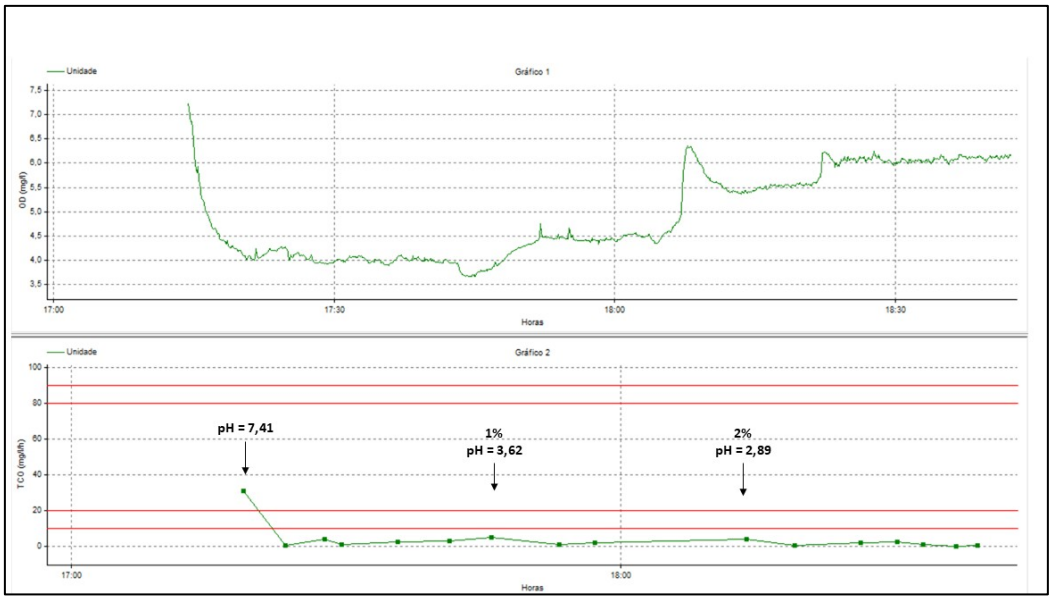


Figura 04 – Respirograma do ensaio de lodo suplementado com ácido lático. Fonte: Autor (2026)

Nessa análise foi adicionado 1 e 2% (v/v) de ácido láctico e observou-se que houve um discreto aumento do TCO (Taxa de Consumo de Oxigênio) e diminuição do pH. Esse comportamento indica que os microrganismos estão reagindo, porém com baixa eficiência para esse substrato. O próximo ensaio foi feito utilizando uma solução de glucose.

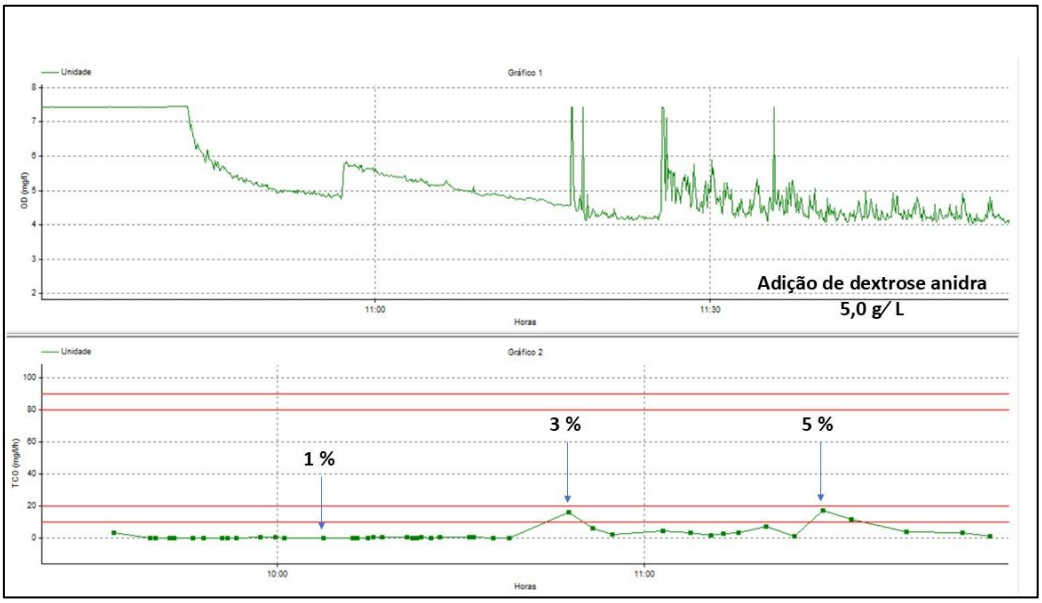


Figura 05 – Respirograma do ensaio de lodo suplementado com dextrose anidra. Fonte: Autor (2026)

No respirograma anterior foi apresentado o resultado do teste de respirometria com a adição de dextrose (glucose), como fonte de carbono para o lodo da lagoa aerada. Foi feita a adição crescente de 1 a 5% desse substrato e observou-se que houve um aumento de TCO a partir da adição de 3%, sinalizando que houve o consumo do substrato pelo microrganismos aeróbios presentes no lodo. Esse perfil é um indicador claro de que na adição de melaço, poderemos ter valores de TCO altos. Fica como recomendação avaliar porcentagens maiores de dextrose. No que diz respeito à estabilidade operacional, o aporte de carbono atua como um amortecedor contra o fenômeno do bulking filamentoso. Organismos filamentosos frequentemente têm vantagem competitiva em ambientes com baixa concentração de substrato orgânico (baixa relação F/M). Ao elevar a oferta de carbono prontamente assimilável, favorece-se o crescimento de bactérias formadoras de flocos, que possuem maior afinidade por concentrações mais altas de alimento. Isso resulta em um lodo com excelentes propriedades de sedimentabilidade (baixo IVL - Índice Volumétrico de Lodo) e maior resistência a choques de carga ou variações hidráulicas bruscas.

Relação Alimento/microrganismos

Para determinar a relação alimento/microrganismos (F/M), utilizamos os dados de SSV, volume da lagoa, DBO afluente e vazão de efluente bruto. Os resultados são apresentados na tabela 1.

Data da coleta	Carga orgânica (kg DBO/dia)	Volume do tanque de aeração (m^3)	Sólidos em suspensão (mg/L)	F/M (kg DBO/d.Kg SSTA
09/02/2026	3,37	460	391,0	**0,0086**
05/03/2026	3,80	940	799,0	**0,0048**
10/03/2026	4,65	280	238,0	**0,0195**
13/03/2026	5,29	280	238,0	**0,0222**

Tabela 01 – Cálculo da relação alimento/microrganismos (F/M). Fonte: Autor (2026)

A relação F/M ideal para sistemas de lodos ativados e lagoas aeradas de mistura completa costuma operar na faixa de 0,05 a 0,30. Como podemos observar nos cálculos, os seus resultados estão extremamente baixos (variando entre 0,004 e 0,022). Podemos concluir que: O sistema possui um volume muito grande (850 m³) para uma carga de matéria orgânica facilmente biodegradável (DBO) muito pequena.

A variação de SSV e SST ao logo do período

Nos dois gráficos a seguir pode ser observado o resultado da variação de SSV e SST ao longo do período de acompanhamento.

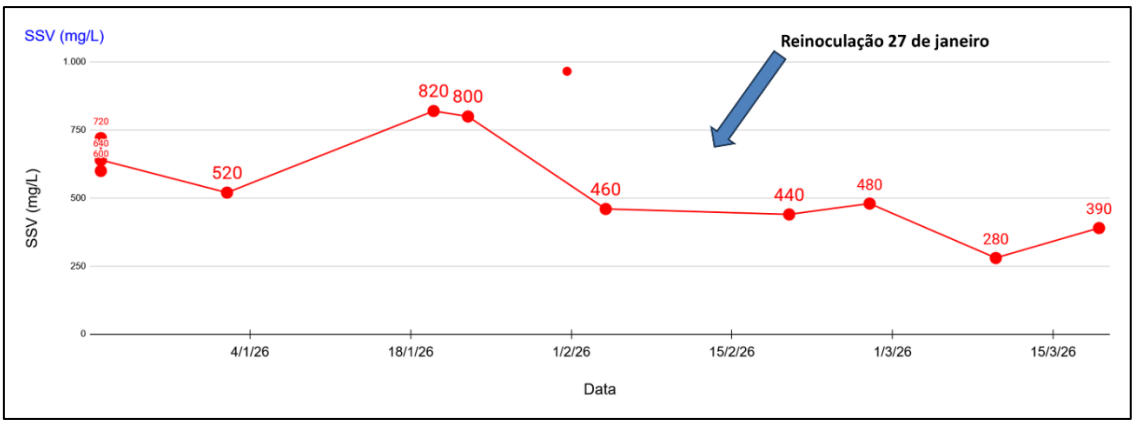


Figura 06 – Variação de SSV ao longo do período. Fonte: Autor (2026)

O gráfico anterior mostra que o SSV aumentou no período de janeiro de 2026, por conta da biorremediação utilizando um biorremediador vendido comercialmente.

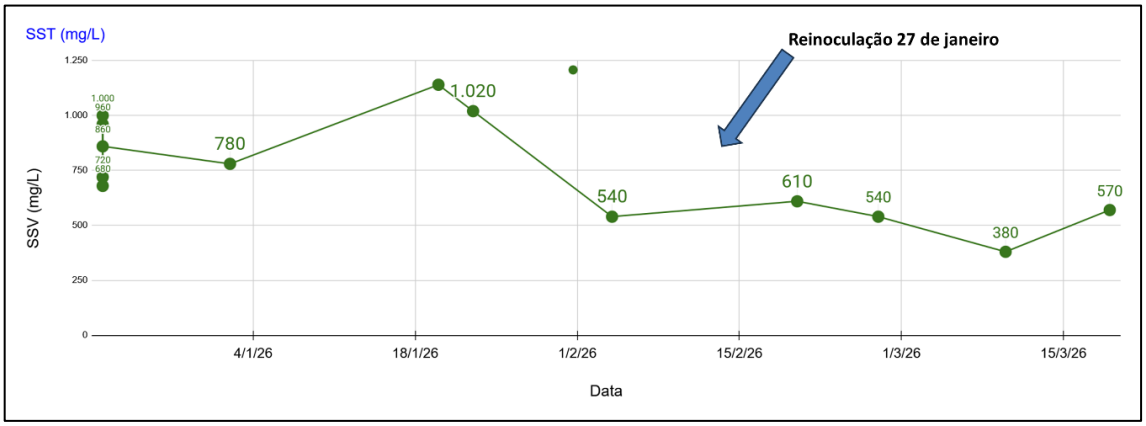


Figura 07 – Variação de SST ao longo do período. Fonte: Autor (2026)

O SSV (sólidos suspensos voláteis) manteve a média de 578,0 mg/L, valores de literatura para uma configuração semelhante, seria da ordem de 1500 mg/L. A média da relação SSV/SST do lodo da lagoa aerada, foi de: 0,77. A relação SSV/SST indica diretamente a quantidade de biomassa (bactérias) presente no tanque de aeração. Um valor de 0,77 (77%) quer dizer que 77% dos sólidos suspensos são voláteis (biológicos) e apenas 23% são inertes (matéria morta, areia etc.).

Isso indica:

a) Boa relação biomassa/inertes.
b) Lagoa bem aerada, com oxigênio dissolvido adequado.
c) Carga orgânica bem compatível com o volume e os sólidos presentes.
d) Não há excesso de sólidos mortos nem acúmulo de materiais não

Como foi assinalado nos dois gráficos anteriores, a lagoa recebeu novo lodo ativado proveniente de uma ETE industrial para melhorar a eficiência e a quantidade de lodo na lagoa.

Comentários finais

A evolução dos parâmetros físico-químicos demonstrou a formação de um ambiente estável, com destaque para a estabilização do pH e a manutenção de concentrações adequadas de oxigênio dissolvido, fundamentais para o desenvolvimento da atividade microbiológica aeróbia. A análise da fração sólida indicou predominância de biomassa ativa (SSV/SST ≈ 0,77), refletindo condições favoráveis de aeração e baixa interferência de sólidos inertes. Entretanto, as baixas concentrações de SSV, quando comparadas a valores de referência, associadas aos reduzidos valores de relação alimento/microrganismos (F/M), evidenciam um sistema operando sob limitação de substrato, condição que restringe o crescimento microbiano e favorece a respiração endógena.

Os ensaios respirométricos corroboraram esse diagnóstico ao indicar baixa atividade metabólica inicial, característica de biomassa em fase de aclimatação. A resposta positiva à suplementação com fontes externas de carbono, especialmente dextrose, reforça que a disponibilidade de substrato constitui o principal fator limitante do sistema na fase avaliada, além de indicar potencial de otimização operacional por meio de estratégias de enriquecimento de carbono.

Dessa forma, conclui-se que, embora o sistema apresente condições estruturais e operacionais adequadas, seu desempenho encontra-se condicionado à baixa carga orgânica aplicada. A otimização da relação F/M, por meio do aumento controlado da carga afluente ou da suplementação de carbono prontamente assimilável, associada ao monitoramento contínuo por ferramentas físico-químicas e respirométricas, é fundamental para a consolidação da biomassa, melhoria da sedimentabilidade do lodo e incremento da eficiência global do tratamento. A consolidação da biomassa e o ajuste da relação F/M serão determinantes para o alcance da estabilidade e eficiência desejadas no tratamento do efluente.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Empresa Recovery Ambiental pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23ª ed. Washington: American Public Health Association, 2017.

BARROS, A. R. M. Avaliação dos parâmetros cinéticos de biomassa gerada em sistemas de lodo ativado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2014.

CHEN, G.-H.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; EKAMA, G. A.; BRDJANOVIC, D. (Eds.). Tratamento Biológico de Esgoto: Princípios, Modelagem e Projeto. 2ª edição. Tradução e adaptação brasileira por MIKI, M. K. Londres: IWA Publishing, 2022. E-book. ISBN: 9781789063233.

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 2014.

SANTOS, A. B. Avaliação Técnica de Sistemas de Tratamento de Esgotos. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil / ETENE, 2007. ISBN: 978-85-87062-83-3.

SILVA FILHO, H. A. et al. Seleção de substratos padrões para ensaios respirométricos aeróbios com biomassa de sistemas de lodo ativado. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n. 1, p. 141–150, 2015.

PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO COMBINANDO PIRITA E OZONIZAÇÃO NA REMOÇÃO DE CORANTE VERMELHO

1Bianca Trindade Oldoni, 2Kauê Câmara Leal de Oliveira, 3Vitória Bôaventura Midon, 4Yago Vitório Colares Pinto, 5Eduardo Pavan Korf, 6Rogério Marcos Dallago, 7Gean Delise Leal Pasquali

[1] Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), e-mail: bianca.oldoni@estudante.uffs.edu.br; [2] Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), e-mail: kaue.oliveira@estudante.uffs.edu.br; [3] Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), e-mail: vitoria.midon@estudante.uffs.edu.br; [4] Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), e-mail: yago.pinto@estudante.uffs.edu.br; [6] Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS); e-mail: eduardo.korf@uffs.edu.br; [6] Universidade Regional e Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI), e-mail: dallago@uricer.edu.br; [7] Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS); e-mail:geandelise@uffs.edu.br

Palavras-chave: corante; pirita; ozonização.

Resumo

A presença de corantes têxteis em efluentes representa um grave problema ambiental, devido à sua alta estabilidade, toxicidade e baixa biodegradabilidade, dificultando assim sua remoção através de métodos convencionais. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de um processo oxidativo avançado (POA) combinando pirita (FeS_2) e ozonização na degradação de solução de corante vermelho. Os experimentos foram conduzidos em reator de fluxo contínuo ascendente com recirculação da amostra, sob três condições: a ozonização isolada, a pirita isolada e o sistema combinado (O_3 + pirita). Amostras foram coletadas ao longo de 300 minutos de reação, sendo analisados parâmetros como remoção de cor por espectrofotometria UV-Vis, pH, Carbono Orgânico Total (COT) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). Os resultados demonstraram que o sistema combinado apresentou maior eficiência na remoção de cor, com rápida descoloração e menores concentrações finais do corante se comparado aos sistemas isolados. A redução da DQO também foi acentuada no processo combinado, indicando possível degradação da matéria orgânica. Observou-se ainda redução do pH ao longo do tempo, especialmente nos sistemas contendo pirita, favorecendo a geração de espécies oxidantes reativas. Por outro lado, os resultados de COT variaram ao longo do tratamento, sugerindo a formação de compostos intermediários e evidenciando a predominância de oxidação parcial, sem completa mineralização. Assim, conclui-se que o processo combinado apresenta elevada eficiência na descoloração e na redução da carga orgânica, sendo uma alternativa sustentável e promissora para a purificação de águas industriais, porém requer otimização ou associação com etapas complementares para promover a mineralização completa dos compostos.

Introdução

A indústria têxtil é o segundo maior setor em consumo de água no mundo, sendo responsável por aproximadamente 20% do descarte global de efluentes líquidos que contém alta carga orgânica, toxicidade e coloração intensa (Mella et al., 2017). Os efluentes têxteis apresentam concentrações de corantes que variam entre 10 e 200 mg/L, podendo chegar a 250 mg/L em algumas correntes de descarte (Moussavi e Mahmoudi, 2009; Yaseen e Scholz, 2018; Rafaqat et al., 2022). Entre os mais críticos estão os corantes azo, que representam cerca de 70% da produção mundial e possuem estruturas moleculares complexas com ligações duplas nitrogênio-nitrogênio (–N=N–) altamente estáveis (Stoyanova et al., 2014; Labiadh et al., 2015).

Os corantes vermelhos se encontram dentro da classe de corantes azo, incluem alguns tipos como o Congo Red e o Acid Red 97, que são amplamente utilizados, mas sua descarga em corpos hídricos reduz a penetração de luz e a fotossíntese, além de apresentarem potenciais riscos carcinogênicos e mutagênicos para a vida aquática e a saúde humana (Chung, 2016; Lal Maurya et al., 2022; Sharma et al., 2023). Devido à sua alta estabilidade química e baixa biodegradabilidade, esses compostos são frequentemente resistentes aos métodos tradicionais de tratamento físico-químico e biológico (Li et al., 2025; Chokshi et al., 2025; Wei et al., 2026).

Neste cenário, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm se destacado como tecnologias eficazes para a degradação de poluentes recalcitrantes, pois promovem a geração de radicais hidroxila (•OH) e outras espécies reativas de oxigênio com alto potencial de oxidação (Ghernaout, 2013; Ozturk e Gülcan, 2023). Entre os diferentes métodos, a ozonização é amplamente explorada devido ao seu baixo custo, facilidade de instalação e eficácia na remoção de cor e odor (Malakootian e Honarmandrad, 2018; Chokshi et al., 2025). O ozônio (O_3) é um agente oxidante de elevado potencial de oxidação ($E° = 2,07$ V), amplamente empregado no tratamento de efluentes contendo compostos orgânicos recalcitrantes, como corantes têxteis (Bermúdez et al., 2021; Pandis et al., 2022). Sua ação oxidativa pode ocorrer por duas vias distintas. Na via direta, o O_3 reage com a molécula do poluente, atacando sítios específicos de alta densidade eletrônica, como ligações duplas e grupos aromáticos presentes na estrutura do corante. Na via indireta, ocorre a decomposição do ozônio em meio aquoso com geração de radicais hidroxila (•OH), espécie altamente reativa ($E° = 2,80$ V) e de caráter não seletivo, capaz de promover a degradação e eventual mineralização da matéria orgânica em CO_2, H_2O e íons inorgânicos (Freire et al., 2008; Lama et al., 2022). No entanto, a ozonização isolada pode ser limitada pela baixa solubilidade do ozônio na água e pela mineralização incompleta de certos subprodutos (Cui et al., 2023; Du et al., 2025). Para mitigar esses problemas, a ozonização catalítica heterogênea utiliza materiais sólidos para acelerar a decomposição do ozônio em radicais livres, aumentando a eficiência do sistema e permitindo a remoção rápida de contaminantes (Nawrocki e Kasprzyk-Hordern, 2010; Wei et al., 2026).

A utilização da pirita (FeS_2) como catalisador heterogêneo em POAs tem atraído atenção por ser um mineral de sulfeto de ferro abundante, de baixo custo e com elevada atividade catalítica superficial (Li et al., 2022; Tu et al., 2024). A pirita possui a capacidade única de liberar continuamente íons Fe^{2+} e promover a autorregulação do pH do meio, mantendo condições ácidas favoráveis para a reação sem a necessidade de adição externa de ácidos (Chen et al., 2021; Liang et al., 2025). Estudos indicam que a pirita pode ativar oxidantes para produzir radicais de maneira mais eficiente, reduzindo a possibilidade de sequestro de radicais e superando as limitações do reagente Fenton clássico, como a formação excessiva de lodo (Wei et al., 2023; Tu et al., 2024; Liang et al., 2025).

O objetivo deste trabalho foi investigar o processo oxidativo avançado combinando pirita residual e ozonização para o tratamento de solução de corante vermelho. Está pesquisa teve como foco a avaliação da eficiência da remoção de cor e carga orgânica, analisando a sinergia entre o catalisador e o ozônio para a quebra da estrutura cromófora do corante e sua possível mineralização.

Materiais e métodos

Foi utilizado o corante têxtil comercial Vermelho 09 - Guarany Tingecor. Para determinação do comprimento de onda de máxima absorbância (λmáx) foi realizada uma varredura espectral na faixa do visível por espectrofotometria UV-Vis, obtendo-se a absorção da solução de corante na concentração de 200 mg L^{-1}. O pico de máxima absorbância foi identificado em λmáx = 510 nm, comprimento de onda adotado em todas as análises subsequentes de remoção de cor.

A pirita utilizada como material reativo é proveniente de resíduos de mineração. Antes de sua utilização, o material passou por etapas de preparo, sendo inicialmente lavado com água destilada para remoção de impurezas superficiais e finos aderidos. Em seguida, a granulometria foi selecionada por peneiramento, retendo-se a fração entre 2 e 4 mm para aplicação no leito do reator, intervalo adotado visando equilibrar a área superficial disponível para as reações e a permeabilidade hidráulica do leito, favorecendo o fluxo ascendente do efluente.

Os corantes são frequentemente empregados em concentrações da ordem de 200 mg L^{-1} em estudos de tratamento (Moussavi e Mahmoudi, 2009; Yaseen e Scholz, 2018; Rafaqat et al., 2022). No entanto, neste trabalho, a concentração foi definida com base no teor de carbono orgânico, visando padronizar a carga orgânica do sistema. Dessa forma, utilizou-se uma solução contendo 200 mg L^{-1} de carbono, o que corresponde a aproximadamente 450 mg L^{-1} de corante, considerando sua composição química. Isso é reforçado pelo estudo de Chokshi et al. (2025), que também utilizou uma concentração compatível de corante, aproximadamente 500 mg L^{-1}, reforçando a coerência da condição experimental adotada. Essa abordagem permite uma comparação mais adequada entre diferentes compostos e processos, uma vez que o carbono orgânico está diretamente relacionado à carga poluente.

Assim, o efluente sintético foi preparado pela dissolução de corante têxtil vermelho comercial em água destilada, na concentração de 450 mg L^{-1}, sendo utilizado um volume de 1,5 L por ensaio. O pH inicial do efluente apresentou valor próximo a 6, caracterizando o meio como levemente ácido no início dos experimentos.

O tratamento foi conduzido em reator de fluxo contínuo ascendente, operado por bomba submersa, no qual o efluente percola o leito reativo no sentido ascendente, garantindo contato homogêneo entre a solução e os materiais reativos. O sistema operou em regime de recirculação, com vazões distintas conforme cada condição experimental. O reator foi preenchido com 1 kg de pirita (FeS_2) com granulometria entre 2 e 4 mm, posicionada na base do leito reativo. Nos ensaios com ozonização, o ozônio foi introduzido no interior do reator por meio de mangueira difusora acoplada a um ozonizador com capacidade de produção de 600 mg h^{-1}. A interação entre o ozônio e a pirita em meio aquoso favorece a geração de espécies oxidantes altamente reativas, em especial radicais hidroxila (•OH), caracterizando um processo oxidativo avançado (POA) do tipo O_3 + pirita.

Foram avaliadas três condições de tratamento, operadas de forma independente: 1) processo somente de ozonização sem presença de pirita; 2) processo somente com a presença da pirita; 3) processo combinando simultaneamente a pirita com a ozonização.

Para cada condição experimental, alíquotas de 50 mL foram coletadas diretamente do efluente do reator nos tempos t_0 = 0 (amostra inicial, antes do tratamento), t_1 = 5 min, t_2 = 15 min, t_3 = 30 min, t_4 = 60 min, t_5 = 120 min, t_6 = 180 min, t_7 = 240 min e t_8 = 300 min, sendo as amostras imediatamente encaminhadas para análise (Chen et al., 2021; Mulai et al., 2025)

A eficiência de cada condição foi avaliada por meio de parâmetros físico-químicos. O pH foi monitorado em todos os tempos de coleta por meio de pHmetro digital previamente calibrado com soluções tampão padrão. A remoção de cor foi determinada por espectrofotometria UV-Vis em λmáx = 510 nm, com eficiência calculada a partir da concentração inicial e as absorbâncias obtidas. O Carbono Orgânico Total (COT) foi determinado em analisador específico para avaliar o grau de mineralização da matéria orgânica. A Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi determinada pelo método colorimétrico de refluxo fechado, conforme metodologia padrão descrita no Standard Methods 5220 D (APHA, AWWA, WEF, 2017), com resultados expressos em mg O_2 L^{-1}.

Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta a evolução visual da descoloração do efluente ao longo do tempo para os diferentes processos avaliados. Observa-se que o sistema combinado (pirita + ozônio) promoveu a remoção mais rápida da coloração, evidenciada pela perda progressiva da intensidade do vermelho já nos primeiros minutos de reação. Em contraste, os sistemas isolados (ozônio ou pirita) apresentaram descoloração mais lenta e menos destacada, indicando menor eficiência na degradação do grupo cromóforo do corante.



Figura 1: Descoloração da solução de corante vermelho 09 em função do tempo de reação, para os processos: somente com ozônio (A), somente com pirita (B) e combinando pirita com ozônio (C).
Fonte: os autores (2026).

Esse comportamento sugere um efeito sinérgico no processo combinado, no qual a pirita atua como catalisador na decomposição do ozônio, favorecendo a geração de espécies altamente reativas, como radicais hidroxila (•OH), responsáveis pela oxidação não seletiva dos compostos orgânicos (Chen et al., 2021; Tu et al., 2024; Wei et al., 2026).

Na condição de pirita isolada, o efluente percola exclusivamente o leito de pirita sem introdução de ozônio, com vazão de 60,6 L h^{-1}. No ozônio isolado, o efluente é submetido apenas à ozonização sem presença de pirita no leito, com vazão de 36,7 L h^{-1}. Na condição pirita + ozônio (POA), há combinação simultânea dos dois no reator, com vazão de 57,3 L h^{-1}. As diferentes vazões observadas entre os sistemas refletem a resistência hidráulica imposta por cada configuração do reator. A drástica queda da vazão com o ozônio isolado pode ser explicada devido à resistência imposta pelas bolhas de gás no fluxo de líquido, enquanto no sistema POA (ozônio + pirita), a presença da pirita mitigou parte dessa resistência ao fragmentar e dispersar o gás (Wei et al., 2026).

A Figura 2 mostra a remoção de cor em função do tempo. O sistema de ozonização isolado apresentou redução gradual da concentração, atingindo valores finais em torno de ~66 mg L^{-1}, indicando eficiência moderada. Já o sistema com pirita isolada promoveu menor remoção, mantendo um comportamento menos estável ao longo do tempo, chegando a um valor final de ~199 mg L-1. Por outro lado, o processo combinado apresentou a maior eficiência, com rápida queda da concentração já nos primeiros 15 minutos (~132 mg L^{-1}) e atingindo valores próximos de 49 mg L^{-1} ao final de 300 minutos.

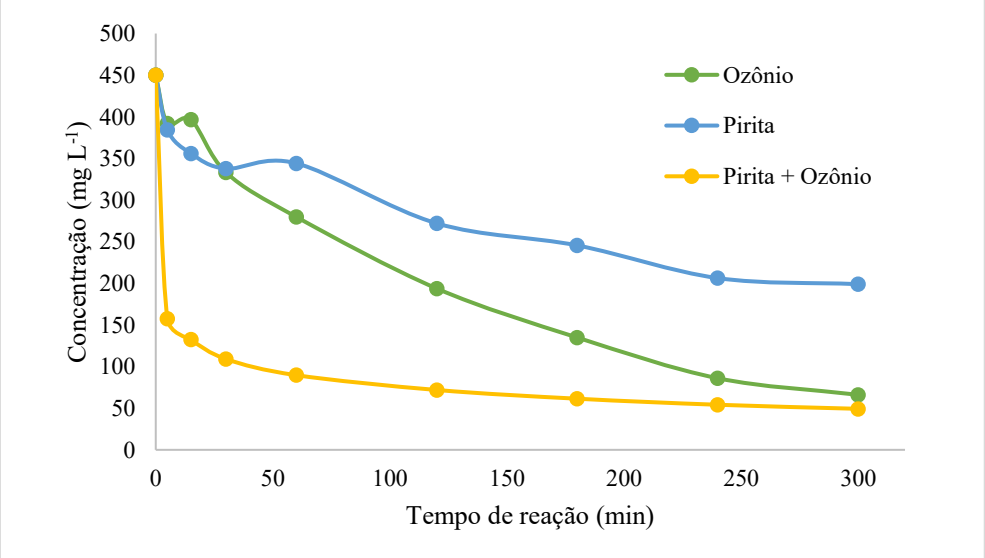


Figura 2: Remoção de cor expressa em concentração por tempo nos três processos.
Fonte: os autores (2026).

Esse resultado reforça que o sistema combinado (pirita + ozônio) intensifica a degradação do corante, provavelmente devido à maior produção de radicais oxidantes e à regeneração contínua de Fe^{2+} na superfície da pirita, o que mantém o sistema cataliticamente ativo (Chen et al., 2021; Tu et al., 2024).

A variação do pH ao longo do tempo observada na Figura 3, evidencia uma tendência de acidificação em todos os sistemas, sendo maior nos processos envolvendo pirita. O pH inicial próximo da neutralidade (~6) reduziu para valores em torno de 3,0 no sistema com pirita e ainda mais baixos no sistema combinado (~2,6). Esse fato pode ser confirmado por Benjelloun et al. (2023), que testaram o pH de corantes azo em processo de ozonização, obtendo uma queda de 7,5 para 4,4.

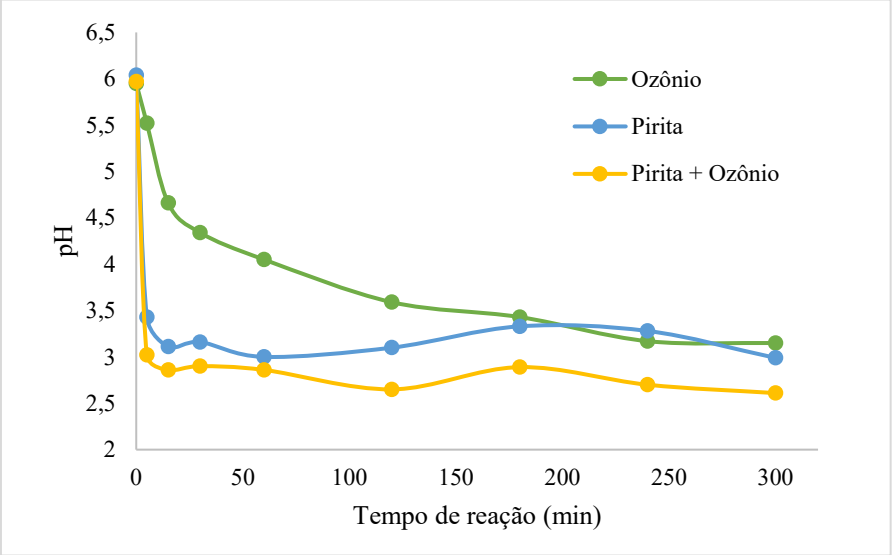


Figura 03: Comportamento do pH em função do tempo nos três processos.
Fonte: os autores (2026).

A acidificação observada está associada à oxidação do sulfeto presente na pirita, com formação de espécies como ácido sulfúrico (Chen et al., 2021; Tu et al., 2024; Li et al., 2025). A pirita desempenha um papel único na autorregulação do pH do sistema, onde a manutenção de pH ácido favorece a estabilidade do Fe^{2+} e a geração de radicais hidroxila, contribuindo diretamente para a eficiência dos processos oxidativos avançados (Liang et al., 2025).

A Figura 4 traz os resultados de Carbono Orgânico Total (COT), o que permite avaliar o grau de mineralização da matéria orgânica. Observou-se que a ozonização isolada promoveu o aumento gradual do COT, atingindo cerca de 18,85 mg L^{-1} ao final do experimento, ou seja, embora haja degradação do corante, ocorre a formação de subprodutos orgânicos intermediários. A pirita isolada apresentou pequena redução, com valores finais foram próximos do inicial, de 14 mg L^{-1} para 12,3 mg L^{-1}, indicando que, embora haja degradação parcial, a eficiência da mineralização é limitada. As variações observadas no COT como o aumento durante a ozonização e processo combinado (pirita + ozônio), pode ocorrer devido a formação de compostos intermediários de menor peso molecular e maior solubilidade (aminas aromáticas, ácidos carboxílicos, aldeído etc.), e caso o método de análise não diferencie esses novos compostos da estrutura original do corante, o valor total de COT pode parecer maior ou não diminuir imediatamente (Kefine e Mamba, 2020), explicando assim estas diferenças.

Em contraste, o sistema combinado demonstrou um aumento nos primeiros minutos e após 60 min uma redução mais expressiva, porém manteve valores finais acima do inicial, de 12,9 mg L^{-1} para 16,5 mg L^{-1}. Esse comportamento pode ser atribuído à rápida degradação do corante em compostos orgânicos de menor massa molar e maior solubilidade, os quais contribuem para o aumento do COT (Liang et al., 2025).

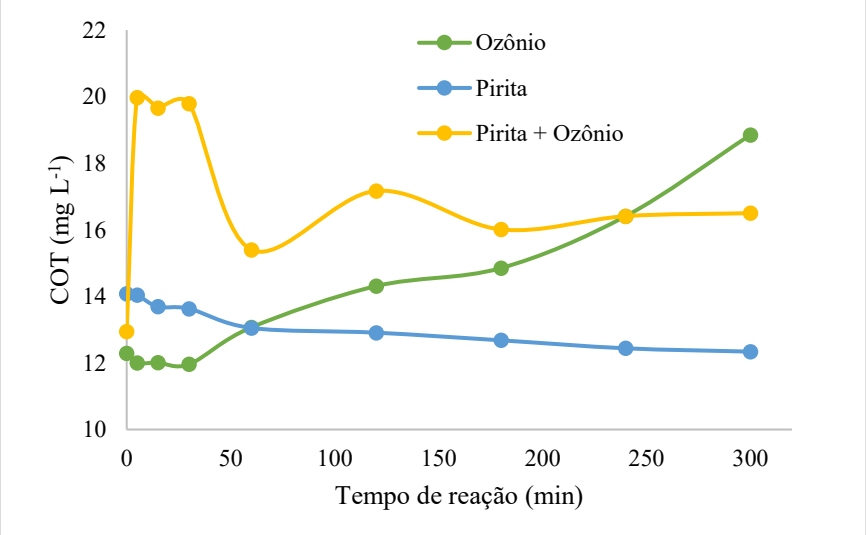


Figura 4: Quantidade de Carbono Orgânico Total (COT) nos três processos em função do tempo.
Fonte: os autores (2026).

Esses resultados indicam que o processo combinado é altamente eficiente na quebra da estrutura cromófora (descoloração), porém a mineralização completa dos intermediários formados não é alcançada nas condições operacionais avaliadas (Labiadh et al., 2015; Cui et al., 2023). Tal comportamento é comum em processos de ozonização, nos quais a oxidação parcial leva à formação de ácidos orgânicos e outros compostos estáveis, que requerem tempos de reação mais prolongados ou condições mais severas para completa mineralização (Wei et al., 2026).

Os resultados de Demanda Química de Oxigênio (DQO), apresentados na Figura 5, mostraram que o sistema combinado apresentou a maior redução da carga orgânica, com queda acentuada ao longo do tempo e valores inferiores aos dos sistemas isolados.

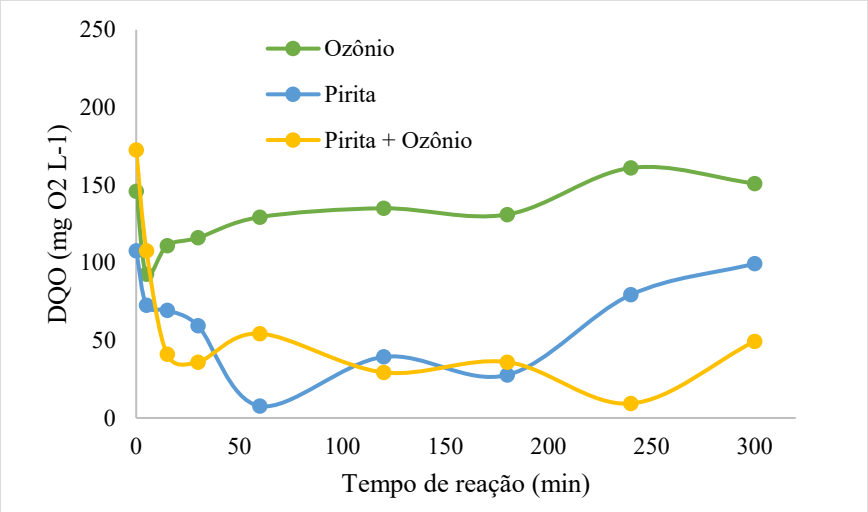


Figura 5: Quantidade de demanda química de oxigênio (DQO) nos três processos em função do tempo. Fonte: os autores (2026).

A ozonização isolada mostrou comportamento menos eficiente, com oscilações nos valores de DQO, possivelmente associadas à formação de intermediários parcialmente oxidados (Labiadh et al., 2015; Cui et al., 2023). Já a pirita isolada apresentou redução inicial, mas com variações ao longo do tempo, indicando limitações na degradação completa da matéria orgânica (Chen et al., 2021; Mulai et al., 2025). Mulai et al. (2025) realizaram um processo Fenton com o uso de pirita em corante e obtiveram remoções de 96 e 93,4 % de DQO em um tempo de reação de 300 min. Chokshi et al. (2025) reportaram 88% de remoção de DQO em sistema de remoção de corante por ozonização catalítica.

De forma geral, os resultados indicam que o processo combinado de ozonização com pirita apresenta desempenho superior em todos os parâmetros avaliados, evidenciando um efeito sinérgico entre os mecanismos de oxidação. Esse efeito está associado à ativação catalítica do ozônio pela pirita, promovendo maior geração de espécies reativas e maior eficiência na degradação e mineralização de compostos recalcitrantes (Chen et al., 2021; Cui et al., 2023; Tu et al., 2024; Wei et al., 2026).

Considerações Finais

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o processo oxidativo avançado combinado de pirita e ozonização apresenta elevada eficiência na remoção de corante vermelho 09, destacando-se em relação aos sistemas isolados. O sistema O_3 + pirita promoveu rápida descoloração e maior redução da DQO, evidenciando um efeito sinérgico associado à ativação catalítica do ozônio pela pirita e à consequente geração de espécies altamente reativas.

A presença da pirita contribuiu também para a acidificação do meio, criando condições favoráveis à formação de radicais hidroxila e à manutenção da atividade catalítica do sistema. No entanto, os resultados de COT indicaram aumento ao longo do processo, evidenciando que a degradação do corante ocorre predominantemente por oxidação parcial, com formação de intermediários orgânicos mais simples e maior solubilidade, sem completa mineralização.

Dessa forma, conclui-se que, embora o processo combinado seja altamente eficiente na remoção da cor e na redução da carga orgânica, ele apresenta limitações quanto à mineralização completa dos compostos. Esses resultados indicam a necessidade de otimização das condições operacionais, como tempo de reação e dosagem de oxidante, ou ainda a integração com tratamentos complementares, visando a completa remoção da matéria orgânica e maior eficiência global do sistema.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) de Erechim/RS, Brasil, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017. 5220 - Chemical Oxygen Demand (COD).

BENJELLOUN, M. et al. Synergistic effect of coupling ozonation/adsorption system for toxic dye efficient removal: chemometric optimization by Box–Behnken response surface methodology. **Desalination and Water Treatment**, v. 306, p. 220–235, set. 2023. DOI: 10.5004/dwt.2023.29821

BERMÚDEZ, L. A. et al. Effectiveness of advanced oxidation processes in wastewater treatment: state of the art. **Water**, v. 13, n. 15, p. 2094, jul. 2021. https://doi.org/10.3390/w13152094

CHEN, Q. et al. Long term catalytic activity of pyrite in Heterogeneous Fenton-like oxidation for the tertiary treatment of dyeing wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105730, 26 maio 2021. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105730

CHOKSHI, N. P. et al. Optimization of dye degradation via catalytic ozonation: A response surface perspective. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 102, n. 12, p. 102264, 11 nov. 2025. https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.102264

CHUNG, K.-T. Azo dyes and human health: A review. **Journal of Environmental Science and Health: Part C**, v. 34, n. 4, p. 233–261, 16 set. 2016. https://doi.org/10.1080/10590501.2016.1236602

CUI, T. et al. Reverse Osmosis coupling Multi-Catalytic Ozonation (RO-MCO) in treating printing and dyeing wastewater and membrane concentrate: Removal performance and mechanism. **Water Resources and Industry**, v. 30, p. 100217, dez. 2023. https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100217

DU, P. et al. CoAl-LDO ozonation catalysts for efficient methyl orange removal from printing and dyeing wastewater: The roles of precipitants and synthesis strategies. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 726, p. 138094, dez. 2025. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138094

FREIRE, R. S. et al. Descoloração e degradação do azo corante Vermelho GRLX-220 por ozonização. **Química Nova**, 2008. https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000800004

GHERNAOUT, D. Advanced oxidation phenomena in electrocoagulation process: a myth or a reality? **Desalination and Water Treatment**, v. 51, n. 40-42, p. 7536–7554, dez. 2013. https://doi.org/10.1080/19443994.2013.792520

LABIADH, L. et al. Complete removal of AHPS synthetic dye from water using new electro-fenton oxidation catalyzed by natural pyrite as heterogeneous catalyst. **Journal of Hazardous Materials**, v. 297, p. 34–41, out. 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.04.062

LAL MAURYA, K. et al. Biodegradation of Congo red dye using polyurethane foam-based biocarrier combined with activated carbon and sodium alginate: Batch and continuous study. **Bioresource Technology**, v. 351, p. 126999, 12 mar. 2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.126999

LAMA, G. et al. Heterogeneous advanced oxidation processes: current approaches for wastewater treatment. **Catalysts**, v. 12, n. 3, p. 344, mar. 2022. DOI:10.3390/catal12030344

LIANG, Y. et al. Degradation of printing and dyeing wastewater pollutant reactive black 5 via pyrite activated persulfate: Efficacy and application impact assessment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 70, p. 107082, fev. 2025. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107082

LI, C. et al. Performance and mechanism of rhodamine B degradation by natural pyrite-activated peroxymonosulfate. Journal of Alloys and Compounds, v. 1037, p. 182536, ago. 2025. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182536

LI, Q. et al. Interaction of pyrite with zerovalent iron with superior reductive ability via Fe(II) regeneration. **Environmental science: Nano**, v. 9, n. 8, p. 2713–2725, 1 jan. 2022. https://doi.org/10.1039/D2EN00349J

KEFENI, K, K; MAMBA, B. B. Photocatalytic application of spinel ferrite nanoparticles and nanocomposites in wastewater treatment: Review, Sustainable Materials and Technologies, v. 23, 2020. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00140.

MALAKOOTIAN, M.; HONARMANDRAD, Z. Investigating the use of ozonation process with calcium peroxide for the

removal of reactive blue 19 dye from textile wastewater. **Desalination And Water Treatment**, v. 118, p. 336–341, 2018. DOI: 10.5004/dwt.2018.22647

MELLA, B. et al. Utilization of tannery solid waste as an alternative biosorbent for acid dyes in wastewater treatment. **Journal of Molecular Liquids**, v. 242, p. 137–145, set. 2017. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.06.131

MOUSSAVI, G.; MAHMOUDI, M. Removal of azo and anthraquinone reactive dyes from industrial wastewaters using MgO nanoparticles. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, n. 2-3, p. 806–812, set. 2009. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.097

MULAI, T. et al. COD removal of Brilliant Orange R using ferrite and pyrite based Fenton and photo-Fenton processes. **Journal of Water Process Engineering**, v. 72, p. 107445, abr. 2025. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107445

NAWROCKI, J.; KASPRZYK-HORDERN, B. The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 99, n. 1-2, p. 27–42, ago. 2010. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.06.033

OZTURK, D.; GÜLCAN, M. Synthesis, characterization, and in-situ H2O2 generation activity of activated Carbon/Goethite/Fe3O4/ZnO for heterogeneous electro-Fenton degradation of organics from woolen textile wastewater. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 122, p. 251–263, jun. 2023. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.02.026

PANDIS, P. K. et al. Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: a mini review. **ChemEngineering**, v. 6, n. 1, p. 8, jan. 2022. https://doi.org/10.3390/chemengineering6010008

RAFAQAT, S. et al. Recent progress in treatment of dyes wastewater using microbial-electro-Fenton technology. **RSC Advances**, v. 12, n. 27, p. 17104–17137, 2022. https://doi.org/10.1039/d2ra01831d

SHARMA, B. et al. Eco-friendly detoxification of hazardous Congo red dye using novel fungal strain Trametes flavida WTFP2: Deduced enzymatic biomineralization process through combinatorial in-silico and in-vitro studies. **Journal of hazardous materials**, v. 455, p. 131503–131503, 1 ago. 2023. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131503

STOYANOVA, M. et al. Catalytic performance of supported nanosized cobalt and iron–cobalt mixed oxides on MgO in oxidative degradation of Acid Orange 7 azo dye with peroxymonosulfate. **Applied Catalysis A: General**, v. 476, p. 121–132, abr. 2014. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.02.024

TU, Z. et al. Application of pyrite to water pollutant removal: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 68, p. 106375, dez. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106375

WEI, J. et al. Factors influencing the ozone catalytic oxidation of dye wastewater by composite component-supported zeolite. **Surfaces and Interfaces**, v. 87, p. 108937, abr. 2026. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2026.108937

WEI, J. et al. Synergistic effect between pyrite and Fe-based metallic glass for the removal of azo dyes in wastewater. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 666, p. 131227, jun. 2023. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131227

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, 27 nov. 2018. https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA TEWETLAND COMO SOLUÇÃO COLETIVA DE SANEAMENTO

1 André de Araújo Meira, 2 Elisângela Maria Rodrigues Rocha, 3 Leonardo Vieira Soares
1 Universidade Federal da Paraíba (UFPB), andre.meira99@gmail.com:; 2 Universidade Federal da Paraíba (UFPB), elis@ct.ufpb.br:; 3 Universidade Federal da Paraíba (UFPB), leonardo.soares@academico.ufpb.br:

Palavras-chave: Orçamento; Saneamento-ambiental; Viabilidade.

Resumo

A deficiência na cobertura dos serviços de saneamento básico no Brasil, associada aos impactos ambientais decorrentes do manejo inadequado de efluentes, evidencia a necessidade de soluções sustentáveis e descentralizadas. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise orçamentária do sistema TEWetland, tecnologia baseada na natureza desenvolvida e patenteada pelo Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal da Paraíba, como alternativa coletiva de saneamento ambiental. A metodologia adotada baseou-se na modelagem de seis cenários hipotéticos, variando o número de residências atendidas (1 a 400 unidades), a partir do dimensionamento das estruturas e elaboração de planilhas orçamentárias utilizando dados do SINAPI (Paraíba, agosto de 2024). Os resultados indicaram comportamento aproximadamente linear dos custos com o aumento da escala, com valores totais variando de R$ 11.622,51 a R$ 1.729.872,26 para sistemas construídos em alvenaria. O custo por habitante apresentou tendência decrescente, variando de R$ 2.905,63/hab para sistemas individuais até R$ 1.081,17/hab em sistemas coletivos. A utilização de materiais reutilizáveis, como pneus, possibilitou redução de até 30% nos custos totais. Apesar do elevado custo inicial, o sistema apresenta benefícios ambientais e socioeconômicos relevantes, como reutilização de água e produção de alimentos. Conclui-se que o TEWetland possui potencial como solução sustentável, embora ainda necessite de otimizações para viabilidade em larga escala.

Abstract

The lack of adequate sanitation coverage in Brazil, combined with environmental impacts caused by improper wastewater management, highlights the need for sustainable and decentralized solutions. In this context, this study aims to perform a cost analysis of the TEWetland system, a nature-based technology developed by the Federal University of Paraíba, as a collective environmental sanitation solution. The methodology was based on six hypothetical scenarios, varying the number of households served (1 to 400 units), through system sizing and cost estimation using SINAPI data (Paraíba, August 2024). Results showed an approximately linear cost increase with system scale, with total costs ranging from R$ 11,622.51 to R$ 1,729,872.26 for masonry-based systems. The cost per inhabitant showed a decreasing trend, from R$ 2,905.63/inhabitant in individual systems to R$ 1,081.17/inhabitant in larger-scale applications. The use of recycled materials, such as tires, reduced total costs by up to 30%. Despite high initial costs, the system provides environmental and socioeconomic benefits, including water reuse and food production. The study concludes that TEWetland is a promising sustainable alternative, although further optimization is required for large-scale feasibility.

Introdução

A saúde pública é influenciada por diversos fatores determinantes, como alimentação, moradia, saneamento básico, meio ambiente, renda, educação e acesso a serviços essenciais, os quais, em grande parte, dependem da efetivação de políticas públicas. Nesse contexto, a Lei nº 11.445/2007 define saneamento básico como o conjunto de serviços relacionados ao abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem urbana (Brasil, 2007).

O saneamento constitui um dos pilares fundamentais para a promoção da saúde e do desenvolvimento sustentável. No entanto, apesar dos avanços observados nas últimas décadas, o Brasil ainda enfrenta desafios significativos quanto à universalização desses serviços. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística indicam que, em 2020, aproximadamente 35% da população não possuía acesso adequado ao esgotamento sanitário, além de persistirem desigualdades regionais marcantes, especialmente entre áreas urbanas e rurais (IBGE, 2020). Em escala global, esse cenário também se apresenta como um desafio relevante, com bilhões de pessoas ainda sem acesso a serviços seguros de saneamento, reforçando a urgência de soluções sustentáveis (WHO, 2021).

A deficiência na cobertura dos serviços tem impulsionado a adoção de soluções alternativas de esgotamento, muitas vezes inadequadas, que podem resultar em impactos ambientais negativos, como a contaminação do solo e dos recursos hídricos, além de riscos à saúde da população. Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de adoção de práticas sustentáveis aliadas ao desenvolvimento tecnológico, visando à melhoria da qualidade de vida e à preservação ambiental. Essa abordagem está diretamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 6, que propõe garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos (UNITED NATIONS, 2015), além de dialogar com a necessidade de gestão integrada dos recursos hídricos em escala global (FAO, 2022; ANA, 2019; SNIS, 2021).

Nesse contexto, destaca-se o sistema TEWetland, desenvolvido pelo Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal da Paraíba, que integra o Tanque de Evapotranspiração e os Wetlands Construídos em uma solução baseada na natureza. Sistemas desse tipo têm sido amplamente estudados internacionalmente como alternativas eficientes e sustentáveis para o

tratamento de efluentes, apresentando boa capacidade de remoção de poluentes com baixo custo operacional (Kadlec e Wallace, 2008; Crispim et al., 2020).

Embora essa tecnologia tenha demonstrado eficiência em aplicações de pequeno e médio porte, sua viabilidade em escala ampliada ainda demanda investigação. Estudos recentes apontam o potencial de sistemas descentralizados e baseados na natureza como alternativas promissoras para regiões com baixa cobertura de saneamento, embora desafios relacionados à escala e aos custos ainda persistam (Sezerino et al., 2015; Tonetti et al., 2018). Assim, torna-se necessário avaliar seu desempenho em cenários hipotéticos, a fim de subsidiar análises mais robustas sobre sua aplicação como solução coletiva de saneamento.

Material e Métodos

Metodologia

A pesquisa desenvolvida foi estruturada com base na classificação proposta por Vergara (2009), considerando-se os critérios quanto aos fins e quanto aos meios de investigação. Sob a perspectiva dos fins, o estudo caracteriza-se como exploratório, descritivo, explicativo, metodológico e aplicado. A natureza exploratória decorre da ainda limitada sistematização de conhecimentos acerca da viabilidade econômica do sistema TEWetland. O caráter descritivo está associado à apresentação das características da tecnologia e à análise das relações entre os parâmetros adotados. A abordagem explicativa fundamenta-se na justificativa dos critérios utilizados no dimensionamento e na composição dos custos, os quais influenciam diretamente os resultados obtidos. O aspecto metodológico refere-se à estruturação de um procedimento sistemático para elaboração do orçamento, enquanto o caráter aplicado está relacionado à possibilidade de replicação da metodologia em diferentes cenários, mediante as devidas adaptações.

Quanto aos meios, a pesquisa classifica-se como bibliográfica, experimental e estudo de caso. A abordagem bibliográfica baseou-se em normas técnicas, legislações, artigos científicos e outras fontes especializadas. O caráter experimental decorre da manipulação de parâmetros e critérios previamente definidos, permitindo a análise de diferentes configurações do sistema. Por fim, o estudo de caso foi desenvolvido a partir da definição de seis cenários hipotéticos, utilizados para avaliar o comportamento dos custos em função da escala do sistema. A partir dessa estrutura, foram definidas as etapas metodológicas necessárias para o alcance dos objetivos propostos.

Dimensionamento TEVAP

O dimensionamento do Tanque de Evapotranspiração (TEVAP) foi realizado com base em critérios simplificados amplamente adotados na literatura, considerando-se uma área superficial de 2 m² por habitante e profundidade fixa de 1,5 m. A partir dessas diretrizes, foram avaliadas diferentes configurações geométricas, visando identificar alternativas compatíveis com a viabilidade construtiva e econômica do sistema.

Inicialmente, considerou-se a configuração unifamiliar, correspondente à proposta original da tecnologia, na qual a largura do tanque foi fixada em 2 m, variando-se apenas o comprimento em função do número de usuários. Em seguida, analisou-se uma configuração otimizada do ponto de vista geométrico, baseada na minimização do perímetro para uma área fixa, resultando em uma geometria quadrada. Por fim, adotou-se como solução de projeto a configuração mais compatível com a realidade de implantação, definida a partir da proporção entre as dimensões do terreno disponível.

Devido à limitação prática associada a grandes comprimentos de tanque, optou-se pela adoção de módulos estruturais, com largura padronizada de 2 m, dispostos em paralelo. Essa abordagem permite maior flexibilidade construtiva, embora implique na necessidade de ramificações nas tubulações hidrossanitárias. Considerando a escala dos sistemas analisados, adotou-se a alvenaria como material para a câmara anaeróbia, em substituição ao uso de pneus reutilizáveis.

O volume necessário para o funcionamento da câmara anaeróbia foi determinado com base em equações consagradas para dimensionamento de tanques sépticos, conforme recomendações normativas vigentes, NBR 17.076 (ABNT,2024), resultando na equação 1.

$$V = 1000 + N\,(C.Td + K.Lf) \qquad (01)$$

Em que:
V = Volume útil total (L);
N = Número de pessoas ou unidades de contribuição;
C = Contribuição de despejos, em L/pessoa x dia ou em L/unidade x dia (NBR 17.076);
Lf = Contribuição de lodo fresco, em L/pessoa x dia (NBR 17.076);
Td = Período de detenção, em dias (NBR 17.076);
K = Taxa de acumulação total de lodo, em dias (NBR 17.076).

A partir do volume obtido e das dimensões adotadas para os módulos, foi possível determinar a altura da estrutura, ajustando-se os valores para condições construtivas adequadas.

$$h = \frac{V}{n\,.0{,}5.C} \qquad (02)$$

Em que:
h = altura da câmara anaeróbia (m);
V = volume útil total (m³);
n = número de módulos (adimensional);
0,5 = distância fixada entre as paredes (m);
C = comprimento do TEVAP (m).

Dimensionamento Wetland

O dimensionamento do Wetland Construído (WC) apresenta maior complexidade em relação ao TEVAP, uma vez que, em condições ideais, requer análises físico-químicas detalhadas do efluente a ser tratado. No entanto, considerando o caráter aplicado do presente estudo e a necessidade de uma abordagem mais simplificada, optou-se pelo dimensionamento por assimilação, tomando como referência sistemas já implantados e estudados pelo Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal da Paraíba e pesquisados por Silva (2024).

A partir de um sistema de referência com dimensões conhecidas e vazão estabelecida (Silva, 2024), foi possível estabelecer uma relação aproximada entre a área superficial necessária e o número de residências atendidas. Essa relação foi adotada como base para a estimativa das dimensões dos sistemas analisados nos diferentes cenários.

Com o volume de efluente estimado para cada situação e fixando-se a profundidade em 1,5 m, determinou-se a área superficial necessária para o funcionamento do sistema. De forma semelhante ao TEVAP, optou-se pela divisão em módulos, visando melhor aproveitamento do espaço disponível e maior viabilidade construtiva (Meira, 2024).

Essa abordagem simplificada permitiu a obtenção de dimensões coerentes com a realidade prática, mantendo a consistência metodológica necessária para a análise comparativa dos custos entre os diferentes cenários.

$$V = \frac{N.C.30}{1000} \qquad (03)$$

$$V_{nec.} = \frac{V.10}{112} \qquad (04)$$

Em que:
V = volume mensal produzido de efluente;
N = número de habitantes;
C = contribuição de esgoto por habitante;
10 = volume do WC de referência;
112 = volume mensal produzido de referência;
Vnec = volume necessário para o WC.

Etapas e Custos

Os sistemas TEVAP e Wetland Construído (WC) apresentam características construtivas semelhantes, compartilhando, portanto, grande parte das etapas necessárias à sua execução. A implantação dessas estruturas segue uma sequência lógica de serviços, compreendendo etapas preliminares, fundação, contenção (aplicável apenas ao TEVAP), pavimentação, execução de alvenarias, revestimento de paredes, instalação de sistemas hidráulicos e, por fim, preenchimentos.

Após o dimensionamento das unidades e o levantamento dos quantitativos dos serviços envolvidos, procedeu-se à etapa de orçamentação, que consistiu na obtenção de composições de preços unitários adequadas à realidade do estudo. Para tanto, foi adotado o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), disponibilizado pela Caixa Econômica Federal, em virtude de sua maior aderência às condições regionais quando comparado a outras bases de dados, como o TCPO, que utiliza valores médios nacionais.

O SINAPI apresenta atualizações mensais para todos os estados brasileiros, garantindo maior precisão e atualidade dos custos considerados. Neste trabalho, foram utilizados os dados referentes ao mês de agosto de 2024, para o estado da Paraíba. A análise orçamentária baseou-se em duas modalidades de composições disponibilizadas pelo sistema: a versão sintética, que apresenta de forma resumida a atividade, unidade e custo unitário, e a versão analítica, que detalha os insumos, equipamentos e mão de obra envolvidos em cada serviço, permitindo maior rigor na estimativa dos custos.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos evidenciaram que o custo total de implantação do sistema TEWetland apresenta crescimento aproximadamente linear com o aumento do número de residências atendidas. Para sistemas executados com alvenaria, os custos variaram de R$ 11.622,51 para uma residência até R$ 1.729.872,26 para 400 residências.

O custo por habitante apresentou comportamento inverso, com tendência de redução à medida que aumenta a escala do sistema, variando de R$ 2.905,63/hab em sistemas individuais para R$ 1.081,17/hab em sistemas coletivos. Esse comportamento evidencia ganhos de escala, embora ainda insuficientes para tornar o sistema competitivo em relação a soluções convencionais amplamente difundidas.

A escolha dos materiais construtivos mostrou-se um fator determinante no custo final. A substituição da alvenaria por materiais reutilizáveis, como pneus, possibilitou redução de até 30% no custo total (Figura 1 e Tabela 1), demonstrando a importância da adoção de estratégias de reaproveitamento de materiais na viabilidade econômica da tecnologia.

Entretanto, para sistemas de maior porte, a disponibilidade de materiais reutilizáveis pode representar uma limitação prática. Além disso, incertezas relacionadas ao dimensionamento do Wetland Construído e às características do solo podem influenciar significativamente os resultados obtidos.

Apesar do custo elevado, o sistema TEWetland apresenta benefícios relevantes que não são diretamente quantificados na análise econômica, como a reutilização de água, a produção de alimentos e a redução de impactos ambientais. Esses aspectos agregam valor à tecnologia e podem justificar sua aplicação em contextos específicos, especialmente em comunidades com baixa cobertura de saneamento.

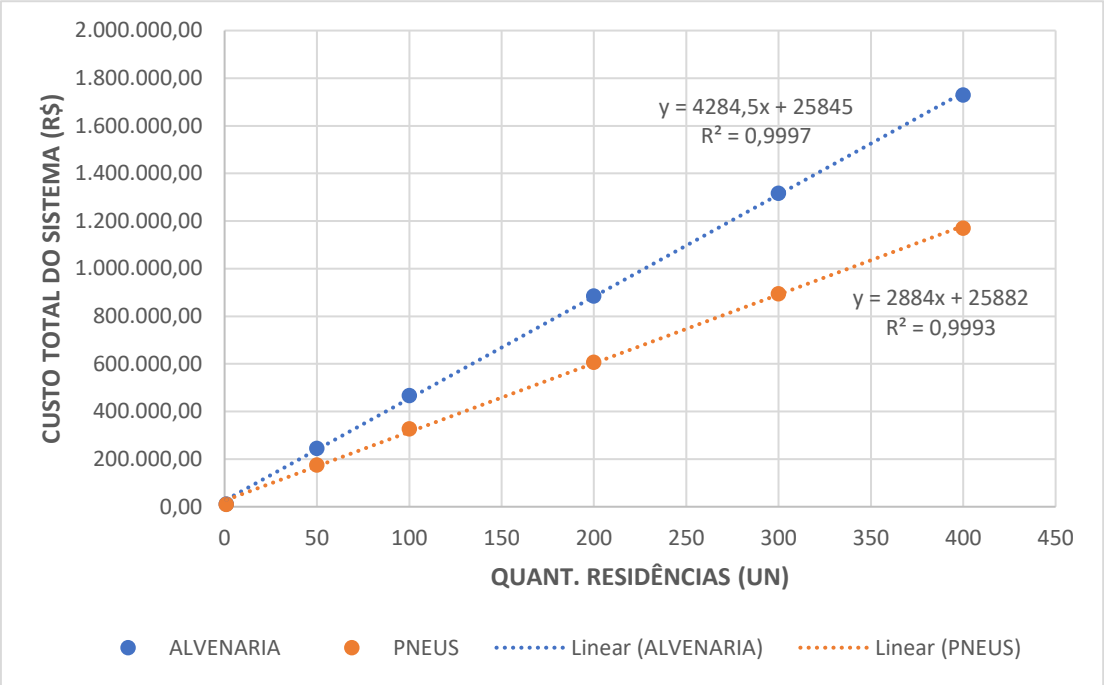


Figura 01: Crescimento de custos em função da quantidade de residências (valores referentes ao mês de agosto de 2024 das planilhas SINAPI)
Fonte: Meira (2024).

QUADRO RESUMO	Preço total em reais					
	1 residência	50 residências	100 residências	200 residências	300 residências	400 residências
TEVAP (ALVENARIA)	9.742,21	222.108,46	423.488,05	808.458,86	1.205.181,93	1.583.283,26
WC	1.880,30	24.100,88	44.614,75	76.881,50	111.735,25	146.589,00
CONJUNTO (ALVENARIA)	11.622,51	246.209,34	468.102,80	885.340,36	1.316.917,18	1.729.872,26
COMPARATIVO (%)	1,31	27,81	52,87	100,00	148,75	195,39
PREÇO POR HAB.	2905,63	1231,04	1170,26	1106,68	1097,43	1081,17
TEVAP (PNEUS)	7806,51	152136,46	283544,05	530320,16	783250,77	1023507,26
CONJUNTO (PNEUS)	9686,8075	176237,335	328158,8	607201,66	894986,02	1170096,26
COMPARATIVO (%)	1,60	29,02	54,04	100,00	147,40	192,70
PREÇO POR HAB.	2421,70	881,19	820,40	759,00	745,82	731,31

Tabela 01: Preço de construção, por cenário
Fonte: Meira (2024).

O valor elevado é bem importante e serve para comparação com os valores médios por habitante gastos com saneamento, cabendo ressaltar que os valores do saneamento convencional são consideravelmente mais diluídos pela sua grande extensão e que os valores para implementação individual do sistema fossa e sumidouro são igualmente custosos, podendo chegar a cerca de R$4500,00 por residência, de acordo com pesquisas de mercado.

A Tabela 02 apresenta um ranking de valor investido por habitante em saneamento em algumas cidades brasileiras.

Colocação	Município	UF	Investimentos Totais por Habitante
1	Praia Grande	SP	R$ 693,01
1	Santo André	SP	R$ 628,07
1	Cuiabá	MT	R$ 472,42
1	Aparecida de Goiânia	GO	R$ 463,28
1	Piracicaba	SP	R$ 328,56
1	Montes Claros	MG	R$ 278,35
1	Itaquaquecetuba	SP	R$ 267,05
1	Limeira	SP	R$ 265,99
1	São Bernardo do Campo	SP	R$ 265,93
1	Guarujá	SP	R$ 239,36

Colocação	Município	UF	Investimentos Totais por Habitante
91	Betim	MG	R$ 51,84
92	Contagem	MG	R$ 49,72
93	São Luís	MA	R$ 45,83
94	Juazeiro do Norte	CE	R$ 44,86
95	Macapá	AP	R$ 41,48
96	Porto Velho	RO	R$ 37,47
97	Santarém	PA	R$ 34,30
98	Rio Branco	AC	R$ 30,02
99	São Gonçalo	RJ	R$ 29,44
100	Várzea Grande	MT	R$ 25,91

Tabela 02: Valor investido, por habitante, em saneamento
Fonte: Instituto Trata Brasil *apud* Brasil (2021).

Considerações Finais

A análise desenvolvida permitiu avaliar a viabilidade econômica do sistema TEWetland como solução coletiva de saneamento ambiental, evidenciando tanto suas limitações quanto seu potencial.

Os resultados indicam que, embora o sistema apresente custos de implantação elevados, especialmente quando executado com materiais convencionais, ele possui características que o tornam promissor do ponto de vista ambiental e social. A integração entre tratamento de efluentes, reutilização de recursos e produção de alimentos representa um diferencial significativo em relação às tecnologias tradicionais.

A viabilidade do sistema está diretamente relacionada à otimização dos processos construtivos, ao aprimoramento dos métodos de dimensionamento e à ampliação do uso de materiais reutilizáveis. Além disso, políticas públicas de incentivo e investimentos em pesquisa podem contribuir para tornar a tecnologia mais acessível.

Dessa forma, conclui-se que o sistema TEWetland representa uma alternativa inovadora e sustentável, ainda em estágio de desenvolvimento, com potencial para contribuir significativamente para a universalização do saneamento, especialmente em regiões com limitações de infraestrutura.

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão a Deus, pela vida, saúde e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Agradecem à Universidade Federal da Paraíba (UFPB) pelo suporte acadêmico, estrutural e científico fornecido ao longo da pesquisa, especialmente no contexto da área de saneamento, cuja relevância é fundamental para a promoção da saúde pública e da sustentabilidade ambiental.

Manifestam especial aos professores envolvidos no desenvolvimento do estudo pelas valiosas contribuições, orientação técnicas, incentivo contínuo e compartilhamento de conhecimentos essenciais para a construção deste estudo.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17076: Sistemas de tratamento de esgoto sanitário — Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *O saneamento no Brasil*. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://www.ana.gov.br. Acesso em: 15 set. 2024.

BRASIL. *Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007*. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Disponível em: https://legislacao.presidencia.gov.br. Acesso em: 01 out. 2024.

CRISPIM, M. C.; FREITAS, J. K. S.; SILVA, G. R.; SOUZA, M. M. S.; MELO, G. M.; VASCONCELOS, P. H. N.; TAVARES, V. N. Propostas de baixo custo para mitigação dos impactos ambientais e despoluição em rios urbanos. In: PAULA, D. P. et al. (Org.). *Diálogos em torno da linha de costa: o oceano que nos une*. Rio de Janeiro: UERJ, 2020. p. 101–119.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – systems at breaking point*. Rome: FAO, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2020*. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Ranking do Saneamento 2024. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/. Acesso em: 3 outubro 2024.
KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. *Treatment wetlands*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

MEIRA, André. ANÁLISE ORÇAMENTÁRIA DO SISTEMA TEWETLAND COMO SOLUÇÃO COLETIVA DENTRO DO SANEAMENTO AMBIENTAL. 2024. 137 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024.

SEZERINO, P. H.; ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. Wetlands construídos aplicados ao tratamento de esgotos sanitários: princípios e aplicações. *Revista DAE*, São Paulo, v. 63, n. 198, p. 24–35, 2015.

SILVA, G.R. Tratamento ecológico de esgoto doméstico: TEWetland um sistema inovador com benefícios sociais e ambientais, com produção de água para reuso. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal da Paraíba. 94 p. 2024.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). *Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2021*. Brasília: Ministério das Cidades, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/cidades. Acesso em: 02 jun. 2024.

TONETTI, A. L.; CORAUCCI FILHO, B.; BERTONCINI, E. I. Tratamento de esgoto por sistemas descentralizados: tecnologias e aplicações. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 273–282, 2018.

UNITED NATIONS. *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. New York: United Nations, 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2020: five years into the SDGs*. Geneva: WHO, 2021.

SOBRENOME, Nome. Título do trabalho: subtítulo (se houver). Ano. Número de folhas. Tipo de trabalho (Curso) – Instituição, Local, ano.

ESTUDO CINÉTICO E DE EQUILÍBRIO DA ADSORÇÃO DE BENZENO EM HIDROCHAR DE LODO DE ESGOTO E BAGAÇO DE MALTE

1 Thayná Pereira Ferreira, 2 Marco Antonio Silva, 3 João Paulo Fernando Mileski, 4 Cíntia Navarini, 5 Davi Zacarias Souza, 6 Fernanda Batista de Souza

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: thaynapefe@gmail.com; 2 Instituto Água e Terra marcoasilva@iat.pr.gov.br; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, joaomileski@utfpr.edu.br; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, cintianavarini@alunos.utfpr.edu.br; 5 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: daviz@utfpr.edu.br; 6 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: fernandasouza@utfpr.edu.br

Palavras-chave: adsorção; hidrocarboneto; hidrocarvão.

Resumo

A contaminação de águas subterrâneas por hidrocarbonetos, especialmente o benzeno, constitui um problema ambiental e de saúde pública relevante, em razão de sua elevada toxicidade e persistência. Nesse contexto, o presente estudo avaliou a eficiência do hidrochar produzido a partir da carbonização hidrotérmica do lodo de esgoto (LE) e do bagaço de malte (BM) na remoção de benzeno em soluções aquosas. O material foi obtido em reator hidrotermal a 180 °C, com tempo de residência de 4 horas, seguido de ativação química com ácido fosfórico (85%) em mufla a 500 °C por 1 h, com taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1}. A quantificação do benzeno foi realizada por cromatografia gasosa com detector de ionização por chama (DIC), empregando a técnica de *headspace*. Os ensaios experimentais compreenderam estudos cinéticos nos tempos de 5, 30, 60, 180 e 720 minutos, à temperatura de 25 °C, com aplicação dos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, bem como estudos de equilíbrio de adsorção conduzidos por 12 h a 25 °C, utilizando as isotermas de Langmuir e de Freundlich. Os resultados evidenciaram eficiência na remoção do benzeno, atingindo aproximadamente 99% nos primeiros cinco minutos, o que indica cinética de adsorção rápida. Ambos os modelos cinéticos apresentaram excelente ajuste aos dados experimentais (R^2 = 0,999), com leve superioridade do modelo de pseudo-segunda ordem, o que sugere predominância de interações químicas. No equilíbrio, o modelo de Langmuir apresentou melhor ajuste, indicando adsorção em monocamada e elevada capacidade adsortiva. Os resultados indicam que o material desenvolvido apresenta elevado potencial para aplicação no tratamento de águas contaminadas, configurando-se como uma alternativa sustentável, eficiente e de baixo custo para remoção de benzeno.

Introdução

O Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos evidencia que as águas subterrâneas na América Latina sofrem contaminação frequente por poluentes, entre os quais os hidrocarbonetos derivados do petróleo e de combustíveis fósseis se destacam por sua persistência (UNESCO, 2022; UNESCO, 2024). Esses compostos podem infiltrar-se no solo, alcançar aquíferos e causar impactos negativos tanto à saúde humana quanto aos ecossistemas aquáticos, ampliando os riscos ambientais e exigindo maior controle e monitoramento (De Lima et al., 2025; Konur, 2021).

Os hidrocarbonetos formam misturas complexas de carbono e hidrogênio, com destaque para os aromáticos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), altamente tóxicos e capazes de contaminar ar, solo e água. O benzeno, incolor e volátil, presente no petróleo e em seus derivados, pode causar mutações genéticas, alterações cromossômicas e câncer, sendo a leucemia mieloide aguda a de maior incidência (Tunsaringkarn, 2012; Zhang et al., 2026). Ele provoca intoxicação benzênica, afeta medula óssea e células progenitoras e produz efeitos imunológicos, neurológicos e reprodutivos, estando classificado como cancerígeno do Grupo 1 pela Agência Internacional de Pesquisa sobre Câncer (IARC, 2018).

A Tabela 01 apresenta os limites máximos de exposição ao benzeno, segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021 e a Resolução CONAMA nº 430/2011, utilizados como referência em estudos de remoção de contaminantes em águas e em efluentes industriais. A presença desse hidrocarboneto em solos e águas subterrâneas exige monitoramento contínuo e estratégias de remediação eficazes. Métodos tradicionais enfrentam limitações, como a coleta inadequada de amostras, a análise incompleta de compostos voláteis e o uso de técnicas desatualizadas, o que dificulta a identificação precisa dos poluentes (Riyis, 2019; Riyis et al., 2019).

A adsorção tem-se destacado como estratégia promissora para a remoção de contaminantes, especialmente em efluentes industriais. Nesse processo, moléculas de líquidos ou gases (adsorbato) aderem à superfície de sólidos porosos (adsorventes), podendo formar uma única camada (monocamada) ou múltiplas camadas (multicamadas), o que contribui para a separação de componentes indesejados. Na fisissorção, as forças de Van der Waals favorecem a formação de multicamadas e permitem um processo reversível, enquanto a quimissorção ocorre de forma específica, geralmente em monocamada, e apresenta caráter irreversível (Anastopoulos & Kyzas, 2015; Sasabuchi, 2023).

Parâmetro	Padrão de potabilidade - Portaria GM/MS nº 888/2021 (µg L)	Padrão de lançamento de efluente - CONAMA nº 430/2011 (µg L)
Benzeno	5	1200

Tabela 01 - Padrão de potabilidade e padrão de lançamento de efluentes para o benzeno. Fonte: Brasil (2021); Brasil (2011)

Resíduos agroindustriais, como lodo de esgoto e bagaço de malte, oferecem uma oportunidade sustentável para a produção de hidrochar (HC), permitindo o reaproveitamento de biomateriais e a remoção de benzeno. O lodo de esgoto, rico em matéria orgânica e nutrientes, pode conter patógenos e metais pesados, mas, quando tratado, é utilizado na agricultura ou como fonte de compostos húmicos, além de possibilitar a produção de HC eficientes na adsorção de hidrocarbonetos (Kirschhöfer et al., 2015; Yu et al., 2020).

O bagaço de malte, principal subproduto da produção de cerveja, gera cerca de 2,8 milhões de toneladas anuais no Brasil, com composição que inclui celulose, hemicelulose, lignina, proteínas e minerais (Pffer, 2024; Sganzerla et al., 2021). Sua disponibilidade e a possibilidade de carbonização hidrotérmica sem secagem prévia tornam-no adequado para produção de HC, reduzindo custos e reaproveitando o resíduo (Silva et al., 2019).

A carbonização hidrotérmica converte biomassas em hidrochar, biogás e água por hidrólise, desidratação e descarboxilação, em reatores selados, a temperaturas entre 140 e 350 °C e sob pressão autógena. A umidade da matéria-prima favorece a reação exotérmica, aumentando a eficiência na produção do hidrochar (Azzaz et al., 2020; Tasca et al., 2022).

Yu et al. (2020) realizaram a carbonização hidrotérmica à base de sacarose, por meio da ativação com KOH, para adsorver componentes voláteis, sendo o tolueno uma destas substâncias a serem adsorvidas. O trabalho apresentou uma capacidade de adsorção de 93,4% do tolueno, comprovando a eficácia da adsorção. Kirschhöfer et al. (2015) usaram hidrochar derivado de lodo de esgoto para adsorver compostos orgânicos (carbamazepina, diclofenaco, atrazina, sulfametoxazol e bezafibrato) de águas residuais de uma indústria. Obteve remoção de 50% de sulfametoxazol, diclofenaco e bezafibrato; já a carbamazepina foi eliminada em 70% e a atrazina em 80%. Após os experimentos anteriores, foi realizada uma segunda etapa com pré-tratamento de redução de fósforo, o que permitiu eliminar 80% da carbamazepina e do diclofenaco. A atrazina, o sulfametoxazol e o bezafibrato foram removidos em mais de 90%. Assim, concluiu-se a alta capacidade de adsorção de compostos orgânicos por meio da carbonização hidrotérmica de lodo de esgoto.

Este estudo avaliou a eficiência do hidrochar de lodo de esgoto e de bagaço de malte na remoção do benzeno, analisando a cinética de adsorção a partir dos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem e a capacidade de adsorção no equilíbrio, com os modelos de Langmuir e Freundlich.

Material e Métodos

Síntese e ativação do hidrocarvão

O lodo de esgoto foi coletado em novembro de 2022 na Sanepar – ETE Marrecas, enquanto o bagaço de malte foi fornecido por uma cervejaria artesanal, ambas localizadas em Francisco Beltrão, Paraná. As matérias-primas foram congeladas e armazenadas em freezer na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Francisco Beltrão.

A síntese do hidrocarvão ocorreu por carbonização hidrotérmica, adaptada de Tran et al. (2020) e de Navarini (2024). Foram utilizados 0,27 g de sólido (50% LE e 50% BM) por mL de água em um reator autoclave de aço inox com copo de Teflon de 100 mL. O reator, contendo a mistura de sólidos e água, foi inicialmente colocado em estufa fria e, em seguida, aquecido a 180 °C, mantendo essa temperatura por 4 horas. Após o período de reação, o reator foi resfriado até a temperatura ambiente antes da retirada do produto.

O sólido resultante foi separado por filtração a vácuo e submetido à ativação química conforme Chatir et al. (2022). O material foi lavado, seco em estufa com circulação de ar e misturado com solução de ácido fosfórico a 85% na proporção de 1 g para 10 mL, mantendo-se sob agitação à temperatura ambiente por 8 horas. Em seguida, foi levado à estufa a 110 °C até a secagem completa e, em seguida, ativado em mufla a 500 °C por 1 hora, com aquecimento de 5 °C min^{-1}. Após a ativação, o hidrochar foi lavado com água destilada até atingir pH neutro e, em seguida, seco novamente a 110 °C por 3 horas.

Preparo das soluções e quantificação do benzeno por CG-DIC

As soluções de benzeno foram preparadas por diluição do composto puro em água destilada. O benzeno utilizado apresentava grau de pureza analítico (≥ 99,0%), sendo fornecido pela Neon Comercial Ltda., com baixo teor de água (≤ 0,1%) e densidade entre 0,8640 e 0,8700 g mL^{-1} a 20 °C, compatível com aplicações laboratoriais usuais. As análises foram realizadas em um cromatógrafo a gás Shimadzu GC-2010A Plus, equipado com detector de ionização por chama (DIC) e injetor split/splitless, no Laboratório LabAna da UTFPR – Campus Francisco Beltrão.

O programa de temperatura seguiu o protocolo adaptado de Fakhari et al. (2012), iniciando a 55 °C por 10 min, seguido de aquecimento a 120 °C a 15 °C min^{-1}, mantido por 1 min. A porta de injeção operou a 250 °C, com divisão 1:3, e o detector, a 300 °C, com fluxos de H_2 (40 mL min^{-1}), ar (450 mL min^{-1}) e N_2 (45 mL min^{-1}) como gás auxiliar. Nitrogênio de alta pureza foi utilizado como gás de arraste, e a técnica de headspace foi aplicada na preparação das amostras, com ajustes experimentais realizados no laboratório.

Para a quantificação, foi construída uma curva de calibração a partir de soluções padrão de BTEX em água ultrapura, com concentrações de 0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,50; 1,00 e 2,50 mg L^{-1}. A integração das áreas dos picos permitiu determinar as concentrações de benzeno nas amostras.

Cinética e equilíbrio de adsorção

A cinética de adsorção foi avaliada conforme a metodologia adaptada de Lima et al. (2018), nos tempos de 5, 30, 60, 180 e 720 minutos, à temperatura de 25 °C, com o objetivo de acompanhar a variação de q_t ao longo do tempo, correspondente à quantidade de benzeno adsorvida. Paralelamente, a concentração de benzeno remanescente na solução foi monitorada ao longo

do tempo. Para isso, 0,3 g de hidrocarvão foram adicionados a 30 mL de solução de benzeno a 30 mg L^{-1}, em tubos Falcon de 50 mL. As amostras permaneceram em incubadora shaker (Shaker Incubating 4600) a 150 rpm durante todo o experimento, em seguida, foram filtradas com membranas de ésteres de celulose (25 mm × 0,45 µm).

Para calcular o percentual de remoção, foi utilizada a Equação 01, na qual Ci é a concentração inicial (mg L^{-1}) e Cf a concentração final do adsorbato (mg L^{-1}).

$$\%Remoção = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (01)$$

A capacidade de adsorção foi determinada por balanço de massa por meio da Equação 02.

$$q_e = \frac{(C_i - C_f)V}{m} \quad (02)$$

Sendo qe a capacidade de adsorção no equilíbrio (mg g^{-1}), Ci é a concentração inicial do adsorvato (mg L^{-1}), Cf a concentração final do adsorvato (mg L^{-1}), V o volume da solução (L) e m a massa adsorvente (g).

Os modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem são aplicados para compreender a velocidade da adsorção. No modelo pseudo-primeira ordem (Lagergren, 1898), a taxa de adsorção depende de um único sítio ativo conforme a Equação 03, em que q_t e q_e (mg g^{-1}) é a quantidade de soluto adsorvida por grama de adsorvente no tempo t (min) e no equilíbrio, respectivamente e k_1 a constante cinética (min^{-1}).

$$q_t = q_e(1 - e^{k_1 t}) \quad (03)$$

No modelo pseudo-segunda ordem, a adsorção é química e envolve dois sítios ativos (Ho & Mckay, 1998), em que q_t e q_e (mg g^{-1}) é quantidade de soluto adsorvida por grama de adsorvente no tempo t (min) e no equilíbrio, respectivamente e k_2 a constante cinética de pseudo-segunda ordem (g mg^{-1} min^{-1}), conforme Equação 04

$$q_t = \frac{k_2\, q_e^2\, t}{1 + k_2\, q_e\, t} \quad (04)$$

Para o estudo do equilíbrio, também foi utilizada a metodologia adaptada de Lima et al. (2018), 0,3 g de hidrocarvão foram adicionados a 30 mL de soluções de benzeno, com concentrações variando de 5 a 100 mg L^{-1}, em tubos Falcon de 50 mL. As amostras permaneceram em agitador orbital a 150 rpm por 12 h à temperatura ambiente (25 °C) e, em seguida, foram filtradas com membranas de ésteres de celulose (25 mm × 0,45 µm). As concentrações finais foram determinadas conforme descrito no Preparo das soluções e quantificação dos hidrocarbonetos por CG-DIC, e os dados foram ajustados aos modelos de Langmuir e de Freundlich.

O modelo de Langmuir (1898) (Equação 05) sugere adsorção química, homogênea e monocomponente, com cada sítio ativo ligado a uma única molécula:

$$q_e = \frac{q_m\, K_L\, C_e}{1 + K_L\, C_e} \quad (05)$$

Em que q_e(mg g^{-1}) é a quantidade adsorvida no equilíbrio, que q_m(mg g^{-1}) é a capacidade máxima, K_L (L mg^{-1}) é a constante de afinidade e C_e (mg L^{-1}) a concentração no equilíbrio. A partir de K_L (L mg^{-1}) , calcula-se o fator de separação R_L conforme a Equação 06.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (06)$$

Valores de R_L indicam a favorabilidade da adsorção: $0<R_L<1$ favorável, $R_L=1$ linear, $R_L> 1$ desfavorável e $R_L= 1$ irreversível (Danat et al., 2026).

O modelo de Freundlich (1906) (Equação 07) sugere adsorção física em multicamadas, comum em superfícies heterogêneas:

$$q_e = K_f\, C_e^{1/n} \quad (07)$$

Em que K_f (mg g^{-1}) (L g^{-1}) ^{n} é a contante de Freundlich e n indica a intensidade ou favorabilidade da adsorção. Valores de n entre 1 e 10 sugerem um processo de adsorção favorável.

O ajuste não linear desses modelos aos dados experimentais foi realizado no software Scilab, versão 2024.1.0.

Resultados e Discussão

Conforme apresentado na Figura 01, o hidrocarvão adsorveu 2,908 mg g^{-1} nos primeiros 5 minutos de contato, atingindo rapidamente o equilíbrio, o que sugere a saturação precoce dos sítios ativos disponíveis para esse composto. Adicionalmente, a concentração de benzeno na solução, em 5 minutos chegou a 0,970 mg L^{-1} (Figura 2), apresenta redução ao longo do tempo, alcançando 0,261 mg L^{-1} ao final do experimento.

As Figura 01 e 02 mostram que, nos primeiros cinco minutos, o componente atingiu cerca de 99% de remoção, indicando uma cinética de adsorção rápida, característica desejável no tratamento de águas contaminadas por compostos orgânicos voláteis.

Resultados semelhantes foram relatados por Kieling (2016), que observou remoções de 87% do benzeno em 15 minutos, atingindo 96% após 240 minutos. De forma complementar, Berreza et al. (2017) relataram remoções de 75% do benzeno já nos primeiros cinco minutos de contato. Comparativamente, os resultados obtidos neste estudo, com remoções próximas de 99% em apenas cinco minutos, evidenciam um desempenho superior e uma cinética de adsorção mais eficiente, reforçando a afinidade dos compostos aromáticos pelo hidrocarvão avaliado.

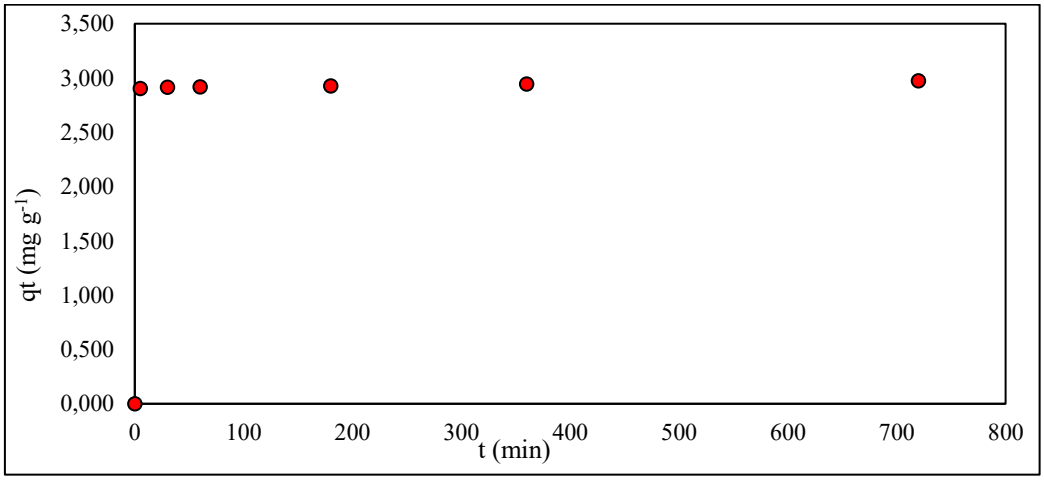


Figura 01 - Quantidade de benzeno adsorvida no sólido ao longo do tempo.
Fonte: Autoria própria (2025)

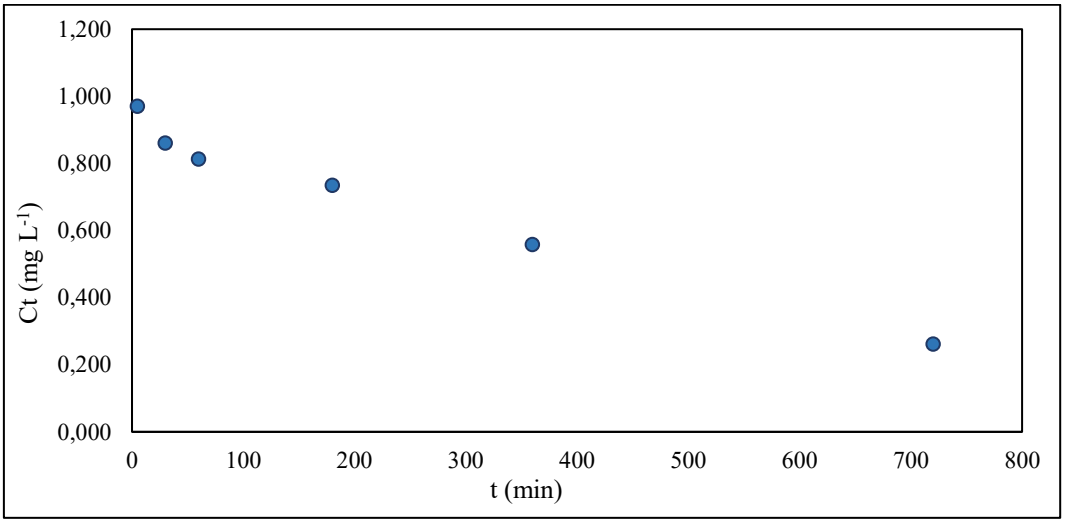


Figura 02 - Concentração de adsorbato ao longo do tempo.
Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 03 e a Tabela 02 apresentam os ajustes dos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PPO) e pseudo-segunda orden (PSO) aplicados aos dados experimentais de adsorção do benzeno.

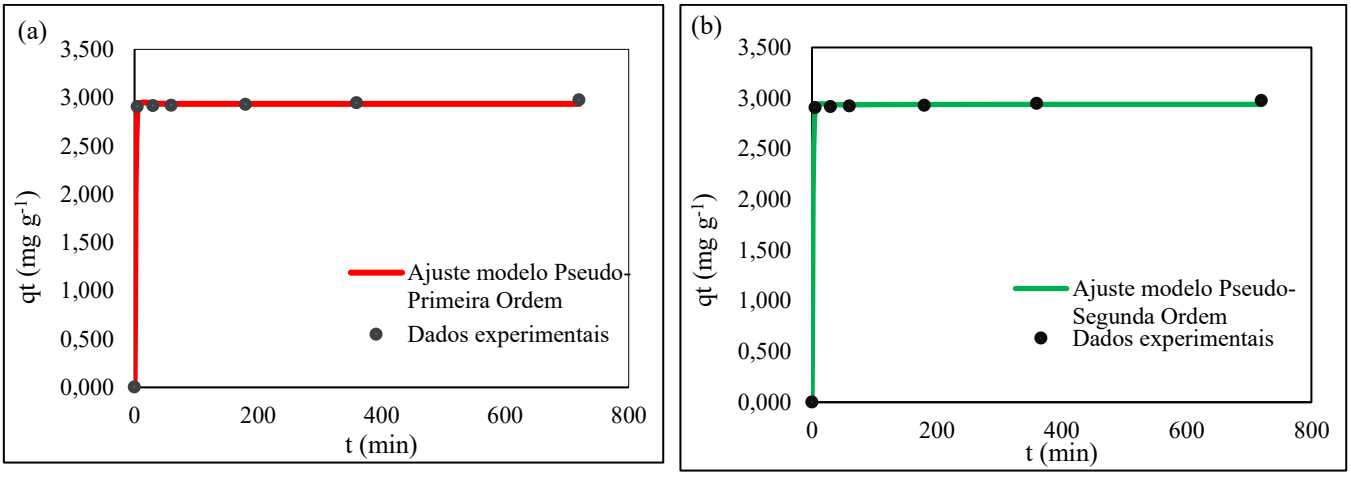


Figura 03- Dados experimentais e ajuste do modelo pseudo-primeira ordem (a) e dados experimentais e ajuste do modelo pseudo-segunda ordem (b).
Fonte: Autoria própria (2025)

Pseudo-primeira ordem				Pseudo-segunda ordem			
k_1(1 min^{-1})	q_e(mg g^{-1})	R^2	MSE	k_2(g mg^{-1} min^{-1})	q_e(mg g^{-1})	R^2	MSE
54,221	2,935	0,9996	0,0003	294,205	2,938	0,9997	0,0002

Tabela 02 - Ajuste de modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.
Fonte: Autoria própria (2025)

A análise dos dados cinéticos mostrou que tanto o modelo de pseudo-primeira ordem quanto o de pseudo-segunda ordem se ajustam satisfatoriamente aos resultados experimentais de adsorção de benzeno, apresentando coeficientes de determinação (R^2) próximos de 1 e erros quadráticos médios (MSE) próximos de 0, indicando mínima discrepância entre os valores observados e os previstos. O modelo de pseudo-segunda ordem apresentou um ajuste ligeiramente superior, sugerindo que a adsorção do benzeno envolve interações relativamente fortes com os sítios ativos do hidrocarvão. Segundo Ho e McKay (1998), este modelo indica que cada molécula do adsorbato ocupa dois sítios ativos, caracterizando a adsorção química. Esse comportamento é consistente com estudos anteriores, como os de Luz (2009) e Bezerra et al. (2021), que também observaram melhor ajuste do modelo de pseudo-segunda ordem em sistemas de adsorção de compostos aromáticos, associando-o à alta afinidade do adsorbato pelos sítios ativos do adsorbente.

As constantes de velocidade obtidas indicam que a adsorção do benzeno ocorre rapidamente nas fases iniciais do processo, evidenciando uma cinética eficiente, o que contribui para a alta remoção observada (≈99% nos primeiros 5 minutos) e reforça a eficácia do hidrocarvão como adsorvente.

Na Figura 04 e na Tabela 03 são apresentados a isoterma de adsorção e os parâmetros obtidos no ajuste dos modelos, respectivamente. O modelo de Langmuir (R^2= 0,949) apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, evidenciado por um coeficiente de determinação superior ao obtido com o modelo de Freundlich (R^2= 0,945). Esses resultados indicam que, segundo o modelo de Langmuir, que pressupõe adsorção em monocamada com sítios ativos homogêneos, o benzeno apresenta maior capacidade de ocupação da superfície adsorvente, ou seja, maior número de moléculas adsorvidas por unidade de massa do material.

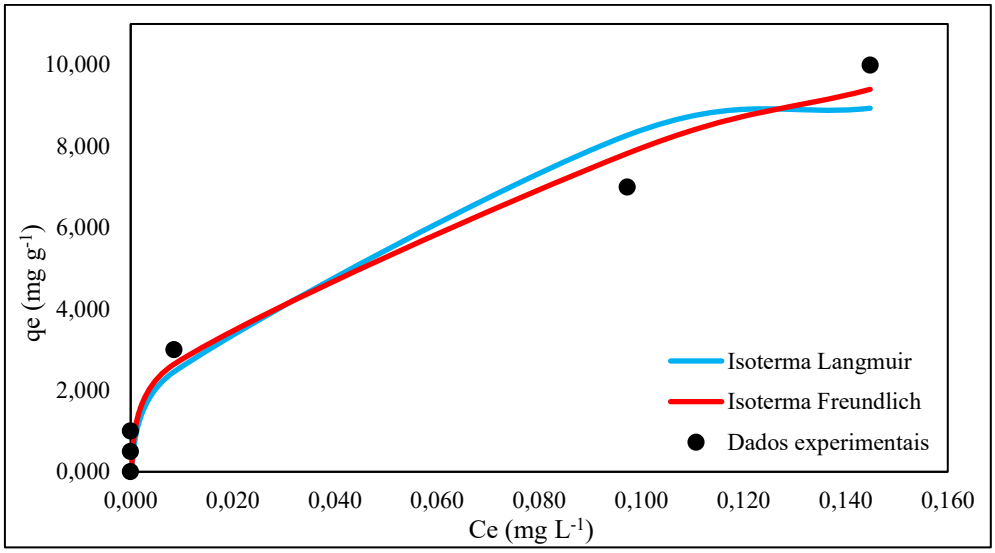


Figura 04 – Dados experimentais e ajustes das isotermas de Langmuir e Freundlich.
Fonte: Autoria própria (2025)

Modelos	Parâmetros		Coeficiente de determinação (R^2)
Langmuir	q_m (mg g^{-1})	10,686	0,949
	k_L (L mg^{-1})	35,136	
	R_L	0,0009	
Freundlich	n	0,456	0,945
	K_f (mg g^{-1})(L g^{-1})	22,67	

Tabela 03 – Parâmetros das isotermas de Langmuir e de Freundlich.
Fonte: Autoria própria (2025)

A aplicação da isoterma de Langmuir resultou em uma capacidade máxima de adsorção de 10,686 mg g^{-1}. No modelo de Freundlich, que descreve adsorção em superfícies heterogêneas com diferentes níveis de energia, o valor do coeficiente K_f foi de 22,67 mg g^{-1} L g^{-1}, representando a constante de adsorção, enquanto o expoente n, que indica a intensidade e favorabilidade do processo, foi inferior a 1, sugerindo que a adsorção do benzeno ocorre de forma favorável.

O estudo de Kieling (2016) sobre a adsorção de hidrocarbonetos aromáticos em cinza de casca de arroz (CCA) mostrou que, para o benzeno, o modelo de Langmuir apresentou o melhor ajuste (R^2 = 0,9505), indicando adsorção química. Por outro lado, Bezerra (2017), utilizando lodo de esgoto, obteve R^2= 0,9802 no modelo de Freundlich, evidenciando comportamento de fisiossorção. No presente estudo, o hidrochar produzido a partir de lodo de esgoto e bagaço de malte apresentou valores muito próximos de R^2, com diferença perceptível apenas a partir da terceira casa decimal, o que indica que cada matéria-prima influencia a interação química e física com o benzeno, reforçando a eficiência do material para a remoção desse composto.

Considerações Finais

O estudo evidenciou que a adsorção do benzeno foi rápida, com remoções próximas de 99% já nos primeiros cinco minutos de contato, atingindo concentrações finais baixas, o que indica forte afinidade entre o soluto e os sítios ativos do carvão.

A análise cinética mostrou que os modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem ajustaram-se bem aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,999, confirmando a eficiência do processo.

No equilíbrio, tanto o modelo de Langmuir quanto o de Freundlich foram aplicáveis, sendo o de Langmuir o que melhor descreveu a adsorção do benzeno, indicando um processo predominantemente químico, com formação de monocamada em sítios ativos homogêneos e interações mais fortes entre o adsorbato e o adsorvente.

Os resultados evidenciam que o hidrocarvão obtido a partir de lodo de esgoto e bagaço de malte apresenta elevado potencial como adsorvente para a remoção de benzeno em soluções aquosas, associando cinética de adsorção rápida a capacidade de equilíbrio adequada. Sua aplicação em sistemas de tratamento de água configura-se como uma alternativa eficiente, sustentável e de baixo custo para a remoção de contaminantes orgânicos voláteis, contribuindo para a mitigação de passivos ambientais em águas contaminadas.

Agradecimentos

Agradecemos ao laboratório multiusuário LabAna, da UTFPR, campus Francisco Beltrão, pelo suporte e pela contribuição para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Marco Antônio, por tornar possível a apresentação do presente trabalho.

Referências Bibliográficas

ANASTOPOULOS, I.; KYZAS, G. Z. Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. **Journal of Molecular Liquids**, v. 209, p. 77–86, 2015.

AZZAZ, A. A. et al. Hydrochars production, characterization and application for wastewater treatment: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 127, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109882.

BEZERRA, J. K. de A**. Remoção de benzeno e tolueno em solução aquosa por adsorção utilizando carvão ativado produzido a partir do lodo doméstico**. 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/23099. Acesso em: 20 mar. 2026.

BEZERRA, J. K. A. et al. Remoção de benzeno e tolueno em solução aquosa por adsorção usando carvão ativado produzido a partir do lodo de esgoto. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 6, p. 45297–45314, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n6-179.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 92, p. 89–96.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Norma de qualidade da água para consumo humano. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 07 mar. 2026.

CHATIR, E. M. et al. Production of activated carbon with tunable porosity and surface chemistry via chemical activation of hydrochar with phosphoric acid under oxidizing atmosphere. **Surfaces and Interfaces**, v. 30, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101849.

DANAT, B. T.; WUANA, R. A.; CHAHUL, H. F.; IORUNGWA, M. S.; et al. Review of adsorption isotherms models. **Applied Water Science**, v. 16, art. 72, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s13201-025-02682-0.

DE LIMA, S. A.; KOIDE, S.; TEZINI MINOTI, R. Protocolo de diagnóstico de áreas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo a partir de ações corretivas baseadas no risco. **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 51, 2025. Disponível em: https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/76945. Acesso em: 27 mar. 2026.

FAKHARI, A. R. A. et al. Simple and rapid method based on direct transfer of headspace vapor into the GC injector: application for determination of BTEX compounds in water and wastewater samples. **Analytical Methods**, 2012. Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/ay/c2ay05839a. Acesso em: 03 fev. 2026.

FREUNDLICH, H. M. F. Over the adsorption in solution. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 57, p. 385–471, 1906.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Sorption of dye from aqueous solution by peat. **Chemical Engineering Journal**, v. 70, n. 2, p. 115–124, jun. 1998.

KIRSCHHÖFER, F. et al. Tratamento de águas residuais – adsorção de micropoluentes orgânicos em carbono HTC ativado derivado de lodo de esgoto. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 3, p. 607–616, 15 fev. 2016. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2015.511.

KONUR, O. Biodiesel and petrodiesel fuels: science, technology, health, and the environment. **Boca Raton: CRC Press**, 2021. p. 3–36.

LAGERGREN, S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. **K. Sven. Vetenskapsakad. Handl**., v. 24, p. 1–39, 1898.

LIMA, H. H. C. et al. Hydrochars based on cigarette butts as a recycled material for the adsorption of pollutants. **Journal of Chemical Engineering**, v. 6, n. 6, p. 7054–7061, dez. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.012.

LUZ, A. D. **Aplicação de processos adsortivos na remoção de compostos BTX presentes em efluentes petroquímicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/92423/262204.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 01 mar. 2026.

NAVARINI, C. **Mitigação do herbicida metribuzin em meio aquoso por adsorção em hidrochar de lodo de esgoto e bagaço de malte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2024. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/35501. Acesso em: 02 dez. 2025.

PFFER, L. **Avaliação da utilização do bagaço de malte cervejeiro como carga em espuma de poliuretano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/11298. Acesso em: 30 mar. 2026.

RIYIS, M. T. **Varredura de compostos orgânicos voláteis** – VOCs. 2018. Disponível em: http://www.ecdambiental.com.br/2018/04/varredura-de-compostos-organicos.html

RIYIS, M. T. **Contribuição para investigação de áreas contaminadas com abordagem de alta resolução**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, 2019. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/191563

RIYIS, M. T. et al. A importância da amostragem de solo de perfil completo (ASPC) para a investigação de alta resolução em áreas contaminadas. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 4, 2019.

SASABUCHI, I. T. M. et al. Sustentabilidade no uso de fósforo: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil. **Química Nova**, 2023. DOI: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170967.

SGANZERLA, W. G. et al. A bibliometric analysis on potential uses of brewer's spent grains in a biorefinery for the circular economy transition of the beer industry. Biofuels, **Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 6, p. 1965–1988, 2021.

SILVA, B. C. D. et al. Biosorption of reactive yellow dye by malt bagasse. **Adsorption Science & Technology**, v. 37, n. 3–4, p. 236–259, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.1177/0263617418823995.

TASCA, A. L. et al. Hydrothermal carbonization of digested sewage sludge: The fate of heavy metals, PAHs, PCBs, dioxins and pesticides. **Chemosphere**, v. 307, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135997.

TRAN, T. H. et al. Adsorption isotherms and kinetic modeling of methylene blue dye onto a carbonaceous hydrochar adsorbent derived from coffee husk waste. **Science of the Total Environment**, v. 725, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138325.

UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos 2022: águas subterrâneas: tornar visível o invisível**. 2022. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721

UNESCO World Water Assessment Programme. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2024: **Água para a prosperidade e a paz; resumo executivo**. [S.l.]: UNESCO, 2024. 11 p. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948. Acesso em: 07 abr. 2026.

YU, X. et al. KOH-activated hydrochar with engineered porosity as sustainable adsorbent for volatile organic compounds. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 588, p. 124372, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124372.

ZHANG, Z. et al. Integrated thermal and biostimulant enhanced bioremediation of CAHs and BTEX co-contaminants in groundwater. **Water Research**, v. 297, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125751.

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE FRIGORÍFICO DE SUÍNOS

1 Eberton Marcelo Alves Lacerda, 2 Naiara Ângelo Gomes, 3 Thâmara Martins Ismael de Sousa

1 Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Pombal-PB. E-mail: ebertonalves123@gmail.com; 2 Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Pombal-PB. E-mail: naiaraangeloccta@gmail.com; 3 Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Pombal-PB. E-mail: thamara.martins@professor.ufcg.edu.br.

Palavras-chave: Efluentes industriais; Tratamento biológico; Lagoas de estabilização.

Resumo

O aumento das atividades industriais tem gerado grandes volumes de efluentes líquidos com potencial poluidor, especialmente em frigoríficos, devido à presença de matéria orgânica, óleos, graxas, sólidos suspensos e nutrientes como nitrogênio e fósforo. O lançamento inadequado desses efluentes pode comprometer a qualidade de corpos hídricos, causar eutrofização, impactar a fauna aquática e representar riscos à saúde humana. Diante disso, este estudo analisou o desempenho de um sistema de tratamento de efluentes de um frigorífico de suínos, monitorando mensalmente o efluente bruto e tratado ao longo de 19 meses. O sistema inclui etapas físico-químicas (peneiramento e flotador, com adição de cloreto férrico e polímero) e biológicas (lagoas anaeróbia, aeradas, facultativa e de polimento). Os resultados mostraram elevada eficiência, 97% na remoção de carga orgânica (DBO e DQO) e 95% em óleos e graxas, enquanto a redução de nutrientes apresentou limitações. O pH e a turbidez permaneceram dentro de faixas adequadas e garantiram a estabilidade do processo. O estudo evidencia que a combinação de tratamentos físico-químico e biológico proporciona remoção eficiente de poluentes e destaca a importância do monitoramento contínuo para otimizar o desempenho do sistema, assegurar a conformidade ambiental e promover a sustentabilidade das operações industriais. Apesar da elevada eficiência na remoção de DBO e DQO, observou-se limitação na redução de nutrientes, indicando a necessidade de processos complementares.

Introdução

O crescimento das atividades industriais nas últimas décadas tem intensificado a geração de efluentes líquidos com elevado potencial poluidor, representando um dos principais desafios para a gestão ambiental e a conservação dos recursos hídricos. Entre os diversos setores industriais, a indústria frigorífica se destaca pelo significativo volume de águas residuárias geradas e pela complexidade de sua composição, que inclui elevadas concentrações de matéria orgânica, sólidos suspensos, óleos, graxas e nutrientes, como nitrogênio e fósforo (VON SPERLING, 2017; METCALF & EDDY, 2016).

Os efluentes provenientes de frigoríficos de suínos apresentam características particularmente críticas, uma vez que são originados de diferentes etapas do processo produtivo, como abate, lavagem de carcaças, higienização de equipamentos e limpeza de instalações. Esses resíduos líquidos, quando não tratados adequadamente, podem provocar impactos ambientais severos, incluindo a redução do oxigênio dissolvido em corpos hídricos, a eutrofização e a degradação da qualidade da água, comprometendo ecossistemas aquáticos (CHERNICHARO, 2007; MULLER et al., 2021).

Diante desse cenário, o tratamento eficiente desses efluentes torna-se essencial não apenas para o atendimento à legislação ambiental, mas também para a promoção da sustentabilidade industrial. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece condições e padrões para o lançamento de efluentes, exigindo que as indústrias adotem sistemas capazes de reduzir significativamente a carga poluidora antes do descarte em corpos receptores (BRASIL, 2011).

Nesse contexto, sistemas que integram processos físico-químicos e biológicos têm sido amplamente utilizados no tratamento de efluentes industriais, destacando-se pela eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos. O tratamento físico-químico, especialmente por meio da flotação por ar dissolvido, atua na remoção inicial de óleos, graxas e partículas coloidais, reduzindo a carga afluente às unidades biológicas (GAUTO; ROSA, 2011; KICH; BÖCKEL, 2017). Por sua vez, o tratamento biológico, frequentemente realizado em lagoas de estabilização, promove a degradação da matéria orgânica por meio da atividade de microrganismos, sendo uma alternativa de baixo custo operacional e elevada robustez (VON SPERLING, 2017).

As lagoas de estabilização, compostas por unidades anaeróbias, aeradas, facultativas e de maturação, apresentam ampla aplicabilidade em regiões de clima tropical, como o Brasil, devido às condições favoráveis à atividade microbiológica. Esses sistemas são reconhecidos por sua elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e patógenos, embora apresentem limitações quanto à remoção de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo (JORDÃO; PESSÔA, 2021; VON SPERLING, 2017).

Apesar da ampla utilização desses sistemas, sua eficiência pode variar significativamente em função de fatores como carga orgânica afluente, tempo de detenção hidráulica e condições operacionais. Nesse sentido, o monitoramento contínuo de parâmetros físico-químicos torna-se uma ferramenta essencial para avaliar o desempenho das estações de tratamento, identificar falhas operacionais e subsidiar melhorias no processo (UN-WATER, 2024; SANTOS, 2007).

Adicionalmente, estudos baseados em séries temporais prolongadas são fundamentais para compreender a dinâmica dos processos de tratamento em condições reais de operação. No entanto, ainda há uma lacuna na literatura quanto a avaliações de

longo prazo em sistemas de tratamento de efluentes de frigoríficos, especialmente no que se refere à análise integrada de diferentes parâmetros de qualidade da água (ASSMENN, 2016; FEITOSA et al., 2020).

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de um sistema de tratamento de efluentes de um frigorífico de suínos, por meio do monitoramento de parâmetros físico-químicos do efluente bruto e tratado ao longo de 19 meses, analisando o desempenho do sistema em condições reais de operação e suas principais limitações.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido em um frigorífico industrial de suínos localizado no município de São Gabriel do Oeste-MS, situado na latitude 19°23'43" S e longitude 54°33'59" O. A unidade possuía, em 2024, capacidade de abate de 3.200 suínos por dia, aumentando para 3.800 abates diários em 2025. O frigorífico conta com uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), destinada ao tratamento das águas residuárias geradas em seus processos produtivos. A ETE integra etapas físico-químicas e biológicas, possibilitando que os efluentes lançados atendam aos padrões de qualidade exigidos para lançamento em corpo hídrico receptor, em conformidade com a legislação ambiental vigente e sua licença de operação.

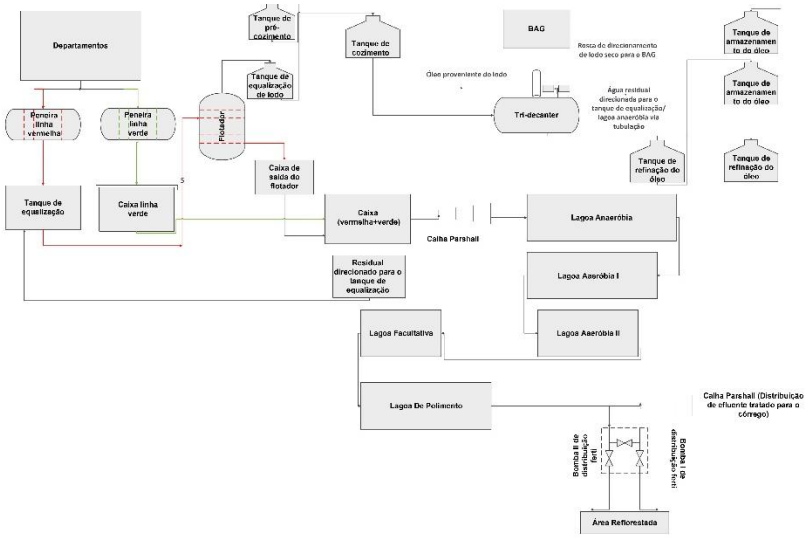


Figura 01: Fluxograma Estação de tratamento de efluentes
Fonte: Autoria Própria (2025)

O sistema de tratamento de efluentes é estruturado em duas linhas operacionais distintas, denominadas linha verde e linha vermelha, permitindo o tratamento segregado dos efluentes conforme suas características físico-químicas. A linha verde recebe efluentes de menor carga poluidora, provenientes principalmente de áreas administrativas e lavagem de veículos, enquanto a linha vermelha concentra os efluentes oriundos das etapas de abate e processamento, caracterizados por elevadas concentrações de matéria orgânica, óleos e graxas (METCALF & EDDY, 2016; VON SPERLING, 2017).

Na etapa preliminar, os efluentes passam por sistemas de peneiramento, responsáveis pela remoção de sólidos grosseiros, como fragmentos de tecidos, resíduos orgânicos e materiais particulados, reduzindo a carga sólida afluente às unidades subsequentes (CHERNICHARO, 2007). Em seguida, o efluente da linha vermelha é direcionado a um tanque de equalização, cuja função é promover a homogeneização da carga poluidora e a regularização da vazão, minimizando variações abruptas que poderiam comprometer o desempenho dos processos subsequentes (TCHOBANOGLOUS et al., 2014).

Posteriormente, o tratamento físico-químico é realizado por meio de flotação por ar dissolvido, com aplicação de coagulantes, como o sulfato ferroso, e polímeros. Esse processo promove a desestabilização de partículas coloidais e a formação de flocos, que são removidos por ascensão devido à incorporação de microbolhas de ar, sendo particularmente eficiente na remoção de óleos, graxas, proteínas e parte da matéria orgânica dissolvida (METCALF & EDDY, 2016; KICH; BÖCKEL, 2017).

Após essa etapa, o efluente é encaminhado ao tratamento biológico, composto por uma lagoa anaeróbia, duas lagoas aeradas, uma lagoa facultativa e uma lagoa de polimento, dispostas em série. A lagoa anaeróbia atua na degradação inicial da matéria orgânica sob condições anóxicas, promovendo a conversão de compostos complexos em substâncias mais simples (CHERNICHARO, 2007). As lagoas aeradas utilizam aeração artificial para fornecer oxigênio dissolvido, intensificando a atividade microbiológica aeróbia e acelerando a remoção da matéria orgânica (VON SPERLING, 2017).

Na sequência, a lagoa facultativa promove a estabilização da matéria orgânica remanescente por meio de processos biológicos combinados, envolvendo zonas aeróbias e anaeróbias. Por fim, a lagoa de polimento, também denominada lagoa de maturação, atua na etapa final do tratamento, com ênfase na remoção de microrganismos patogênicos e na melhoria da qualidade sanitária do efluente, favorecida pela ação da radiação solar, variações de pH e tempo de detenção hidráulica (VON SPERLING, 2017; JORDÃO; PESSÔA, 2021).

O monitoramento do sistema foi realizado por meio da coleta de amostras de efluente bruto (afluente) e efluente tratado (efluente final), em pontos previamente definidos ao longo do sistema. As coletas foram realizadas mensalmente, no período de

janeiro de 2024 a julho de 2025, totalizando 19 campanhas de amostragem. Para garantir a representatividade e confiabilidade dos dados, foram seguidos os procedimentos de coleta, preservação e transporte estabelecidos em normas técnicas, incluindo diretrizes da CETESB e da ABNT NBR 9898:2020.

As análises laboratoriais foram conduzidas por laboratório credenciado, utilizando metodologias padronizadas descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Os parâmetros avaliados incluíram turbidez, potencial hidrogeniônico (pH), temperatura, nitrogênio amoniacal, fósforo total, óleos e graxas, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5) e Demanda Química de Oxigênio (DQO).

A eficiência do sistema de tratamento foi determinada por meio da comparação entre as concentrações dos parâmetros no afluente e no efluente tratado, sendo expressa em termos percentuais de remoção. Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas, possibilitando a análise temporal das variações dos parâmetros ao longo do período de monitoramento.

Adicionalmente, foi realizada análise estatística por meio do coeficiente de correlação de Pearson, com o objetivo de identificar relações entre os parâmetros físico-químicos do efluente bruto e possíveis tendências associadas ao desempenho do sistema de tratamento, permitindo uma avaliação mais aprofundada da dinâmica operacional (TCHOBANOGLOUS et al., 2014).

Resultados e Discussão

Parâmetro	Afluente (Média)	Efluente (Média)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	726	10,35	98,6
DBO (mg/L)	2493	31,81	98,7
DQO (mg/L)	5000	96,93	98,1
Óleos e Graxas (mg/L)	578,34	18,98	96,7
N-Amônia (mg/L)	57,99	23,98	58,6
Fósforo Total (mg/L)	21,14	9,69	54,2

Tabela 01: Eficiência média do tratamento do efluente.
Fonte: Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados do monitoramento do efluente in natura evidenciaram características típicas de frigoríficos de suínos: turbidez inicial de 726 UNT, DBO média de 2.493 mg/L, DQO de 5.000 mg/L, óleos e graxas de 578,34 mg/L, nitrogênio amoniacal de 57,99 mg/L e fósforo total de 21,14 mg/L, com pH médio de 6,21.

Após o tratamento, a turbidez foi reduzida para 10,35 UNT, representando eficiência de 98,6%. O flotador demonstrou desempenho essencial, reduzindo os óleos e graxas para 18,98 mg/L (eficiência de 96,7%), dentro dos limites da Resolução CONAMA n° 430/2011. Resultados semelhantes foram reportados por Rodrigues (2016), que destacou a importância do flotador associado à dosagem de coagulantes para otimizar a remoção de óleos e graxas em efluentes de frigoríficos.

A DBO foi reduzida para 31,81 mg/L, com eficiência global de 98,7%. A DQO apresentou redução de 5.000 mg/L para 96,93 mg/L, com eficiência de 98,7%. Esses resultados superam os valores de 85 a 95% reportados por Von Sperling (2017) e Chernicharo (2007) para sistemas de lagoas bem dimensionados, e são superiores aos 93,57% observados por Assmenn (2016) em lagoas de suinocultura.

O monitoramento mensal do efluente tratado mostrou que a turbidez permaneceu abaixo do limite legal de 100 UNT (CECA/MS n° 36/2012) na maioria dos meses, com exceção de junho/2024 e julho/2025. O pH variou entre 4,86 e 7,05, mantendo-se predominantemente na faixa ideal para atividade microbiana (6,0-9,0), com episódio de acidificação em março/2024 (pH = 4,86), provavelmente relacionado a variações na composição do efluente (DROSTE, 2018). A temperatura oscilou entre 20,6 e 30,7 °C, dentro da faixa adequada para processos biológicos aeróbios e anaeróbios (MORETTI, 2024).

O nitrogênio amoniacal foi reduzido em aproximadamente 59%, de 57,99 mg/L para 23,98 mg/L. Os valores no efluente tratado mostraram significativa redução em 2025 (médias de 5 mg/L), com picos pontuais que indicam sobrecarga do sistema, possivelmente relacionada a variações na carga de entrada ou limitação da biomassa disponível (TCHOBANOGLOUS et al., 2014). O fósforo total apresentou queda de 54%, de 21,14 mg/L para 9,69 mg/L. Os valores no efluente tratado (9-13,22 mg/L) ainda superam os limites para prevenção de eutrofização, evidenciando a necessidade de tratamentos complementares como precipitação química, conforme recomendado por Droste (2018) e Rodrigues (2016).

A DBO do efluente tratado apresentou valores consistentes, com a maioria dos meses abaixo de 45 mg/L, enquanto a DQO reduziu de 180 mg/L (março/2024) para médias próximas a 60 mg/L em 2025, correspondendo a remoções superiores a 65%, compatíveis com desempenhos reportados em sistemas de lagoas (VON SPERLING, 2017). A exceção ocorreu em março/2024, quando a DQO ultrapassou o limite da legislação estadual.

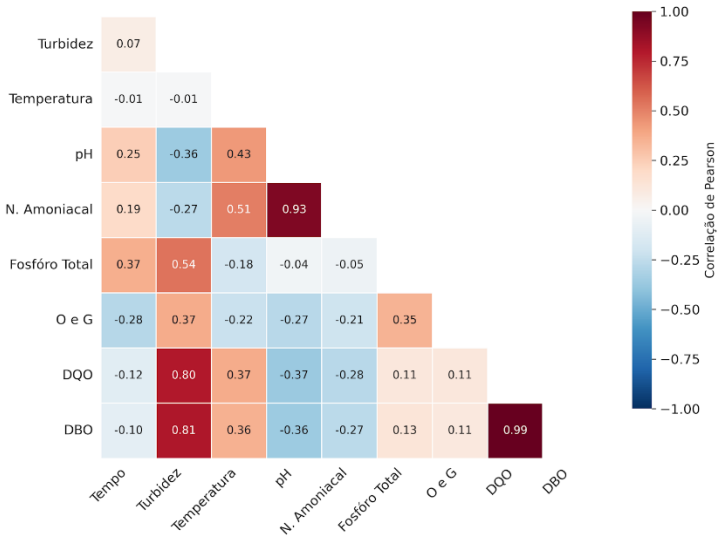


Figura 2: Matriz de correlação dos parâmetros dos efluentes
Fonte: Autoria própria (2025)

A análise de correlação de Pearson revelou associações significativas entre os parâmetros. A DBO apresentou forte correlação com a turbidez (r = 0,81) e principalmente com a DQO (r = 0,99), indicando que o aumento da carga orgânica está diretamente relacionado ao acréscimo da matéria oxidável. A DQO também mostrou forte correlação com a turbidez (r = 0,80), reforçando a influência dos sólidos suspensos na concentração de matéria orgânica. O pH apresentou forte correlação positiva com o nitrogênio amoniacal (r = 0,93), evidenciando que variações no equilíbrio ácido-básico afetam diretamente a forma nitrogenada no efluente.

De forma geral, os resultados demonstram que a ETE foi eficaz na remoção de carga orgânica (DBO e DQO), estabilização do pH e controle de óleos e graxas. Contudo, os parâmetros fósforo total e óleos e graxas apresentaram oscilações acentuadas em determinados períodos, reforçando a necessidade de ajustes operacionais e complementação tecnológica.

Considerações Finais

O sistema de tratamento de efluentes avaliado demonstrou elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos, evidenciada pelas expressivas taxas de remoção de DBO, DQO, turbidez e óleos e graxas ao longo de todo o período de monitoramento. Esses resultados indicam não apenas a efetividade das unidades individuais do sistema, mas também a sinergia entre as etapas físico-químicas e biológicas, que atuam de forma complementar na redução da carga poluidora. A elevada eficiência observada reforça a aplicabilidade desse tipo de sistema no tratamento de efluentes da indústria frigorífica, caracterizados por elevada variabilidade e complexidade, especialmente quando operados em condições reais e contínuas.

A estabilidade dos parâmetros operacionais, como pH e temperatura, desempenhou papel fundamental no desempenho global do sistema, uma vez que tais variáveis estão diretamente relacionadas à atividade metabólica dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica. A manutenção desses parâmetros dentro de faixas adequadas favoreceu a adaptação e o equilíbrio das comunidades microbianas, contribuindo para a eficiência dos processos biológicos e para a resiliência do sistema frente a possíveis variações na carga afluente. Nesse contexto, destaca-se também a importância da etapa físico-química, especialmente o processo de flotação, que se mostrou essencial na remoção inicial de compostos de maior complexidade, como óleos, graxas e partículas coloidais. Essa remoção preliminar reduz significativamente a carga aplicada às unidades biológicas, evitando sobrecargas e contribuindo para a estabilidade operacional do sistema como um todo.

Por outro lado, a remoção de nutrientes, particularmente nitrogênio e fósforo, apresentou eficiência moderada, evidenciando limitações inerentes aos sistemas convencionais de lagoas de estabilização. Esses resultados estão associados à ausência de condições ideais para processos específicos, como nitrificação, desnitrificação e remoção biológica avançada de fósforo, que requerem controle mais rigoroso de variáveis operacionais. A persistência desses nutrientes no efluente tratado representa um potencial risco ambiental, especialmente em relação à eutrofização de corpos hídricos receptores. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de implementação de tecnologias complementares, como precipitação química, sistemas de lodos ativados modificados ou processos terciários, sobretudo em cenários que exigem padrões mais restritivos de lançamento.

O monitoramento contínuo realizado ao longo de 19 meses mostrou-se uma ferramenta indispensável para a avaliação do desempenho do sistema, permitindo não apenas a verificação da eficiência de remoção dos parâmetros analisados, mas também a identificação de padrões temporais, tendências operacionais e possíveis pontos de melhoria. A análise de séries temporais prolongadas possibilita uma compreensão mais robusta da dinâmica do sistema, especialmente em relação à variabilidade sazonal e às flutuações inerentes à operação industrial. Além disso, o acompanhamento sistemático dos parâmetros físico-químicos contribui diretamente para a verificação da conformidade com a legislação ambiental vigente, servindo como base para a tomada de decisões técnicas e operacionais voltadas à otimização do tratamento.

Dessa forma, conclui-se que o sistema analisado apresenta elevada eficiência técnica e viabilidade ambiental para o tratamento de efluentes de frigoríficos, destacando-se como uma solução robusta e adequada para condições reais de operação. No entanto, as limitações observadas na remoção de nutrientes indicam a necessidade de aprimoramentos tecnológicos, especialmente no contexto de exigências ambientais mais rigorosas. Assim, futuras investigações podem explorar a integração de processos complementares e a otimização das condições operacionais, visando ampliar a eficiência global do sistema e reduzir ainda mais os impactos ambientais associados ao lançamento de efluentes tratados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar (CCTA) e ao frigorífico industrial que cedeu os dados e permitiu a realização do estudo. Agradecimentos especiais às Profas. Dras. Naiara Ângelo Gomes (orientadora) e Thâmara Martins Ismael de Sousa (coorientadora) pelo suporte e dedicação ao longo do trabalho.

Referências Bibliográficas

AHMED, M. B. et al. Impact of industrial effluents on the environment and human health: a critical review of treatment strategies and emerging technologies. Chemosphere, v. 303, p. 135223, 2022.

ASSMENN, R. P. Diagnóstico e prognóstico de um sistema de efluente de frigorífico de suínos para remoção de nitrogênio amoniacal. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

BRASIL. Resolução CONAMA n° 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística sem matemática para psicologia. Porto Alegre: Artmed, 2013.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2. ed. São Carlos: Rima Editora, 2005.

DROSTE, R. L. Theory and practice of water and wastewater treatment. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.

FEITOSA, F. S. et al. Caracterização de efluentes de frigoríficos e avaliação de sistemas de tratamento. Revista DAE, v. 68, n. 218, p. 69-83, 2020.

FERREIRA, I. T. C.; MARQUES, R. F. P. V.; RODRIGUES, L. S. Tratamento de efluentes industriais de uma fábrica Pet Food. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 17, n. 1, p. 608-625, 2024.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos e industriais. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2021.

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

MORETTI, A. Influência da temperatura nos processos de tratamento biológico de efluentes. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 2024.

RODRIGUES, M. F. Avaliação da eficiência de coagulantes e floculantes na remoção de fósforo em efluentes de frigorífico de suínos. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Pelotas, 2016.

SANT'ANNA JR., G. L. Tratamento Biológico de Efluentes: Fundamentos e Aplicações. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

TCHOBANOGLOUS, G. et al. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

UN-WATER. Progress on wastewater treatment: 2024 update. Genebra: United Nations, 2024.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

EFEITO DO PRECURSOR NAS PROPRIEDADES E ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA DO G-C_3N_4 NA DEGRADAÇÃO DE DIURON

1 Pâmela Herrera Dutra, 2Maria Eliana Camargo Ferreira, 3 Eduarda Gameleira Bernardino, 4 Rosângela Bergamasco, 5 Karina Querne de Carvalho, 6 Romel Dias Vanderlei, 7 Natalia Ueda Yamaguchi

1 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: pamela-hd@hotmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: camargo_ferreira@hotmail.com; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eduardagbernardino@gmail.com; 4 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: rbergamasco@uem.br; 5 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: kaquerne@professores.utfpr.edu.br; 6 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: rdvanderlei@uem.br; 7 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: nuyamaguchi@uem.br

Palavras-chave: Processos oxidativos avançados; Poluentes emergentes; Luz solar.

Resumo

A presença de poluentes recalcitrantes em corpos hídricos demanda tecnologias mais eficientes de tratamento, sendo a fotocatálise heterogênea uma alternativa promissora e ambientalmente sustentável. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência do precursor nas propriedades e na eficiência fotocatalítica do g-C_3N_4 na degradação do herbicida Diuron. O material foi sintetizado por polimerização térmica a partir de ureia e melamina, sendo realizados ensaios de cinética de adsorção e fotocatálise sob irradiação solar. O equilíbrio de adsorção foi atingido em 40 minutos, evidenciando a baixa capacidade adsortiva do g-C_3N_4. O material derivado da ureia apresentou melhor desempenho, com aproximadamente 45% de degradação, enquanto o obtido a partir da melamina atingiu cerca de 30%. A superioridade do g-C_3N_4/U foi atribuída à sua estrutura mesoporosa e maior área superficial. Ainda assim, a baixa adsorção do g-C_3N_4 limita sua eficiência, indicando a necessidade de estratégias como formação de heterojunções, incorporação de materiais adsorventes e uso de sequestradores de elétrons para aprimorar o desempenho fotocatalítico.

Introdução

A escassez de água doce e a crescente poluição dos recursos hídricos decorrentes de atividades antrópicas representam desafios globais urgentes para a sustentabilidade. Com a intensificação das atividades industriais e agrícolas, o escoamento de efluentes tem introduzido matrizes cada vez mais complexas no meio ambiente, dificultando a remoção completa de poluentes orgânicos por métodos convencionais de tratamento de água. Estima-se que uma parcela significativa dos pesticidas aplicados em áreas agrícolas não cumpra integralmente sua função biológica, alcançando águas superficiais e subterrâneas por processos de escoamento e infiltração, o que contribui para efeitos tóxicos de longo prazo (HAO; LUAN, 2024; QUINTERO-CASTAÑEDA et al., 2024).

Diante das limitações dos tratamentos tradicionais na remoção desses compostos recalcitrantes, torna-se necessário a adoção de tecnologias mais eficientes de descontaminação. Neste contexto, a fotocatálise heterogênea, classificada como um Processo Oxidativo Avançado (POA), destaca-se como uma tecnologia altamente promissora, limpa e eficaz para o tratamento de águas poluídas (AKGÜN; DÜKKANCI, 2023a; HAO; LUAN, 2024).

Esse processo baseia-se na utilização de materiais semicondutores que, ao serem excitados por fótons com energia igual ou superior ao seu *bandgap*, promovem a transição de elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando pares elétron-buraco (e^-/h^+). Esses portadores de carga fotogerados reagem com o oxigênio e a água presentes no meio, formando espécies reativas de oxigênio (EROs), como radicais hidroxila (·OH) e superóxido ($\cdot O_2^-$), capazes de oxidar poluentes orgânicos e convertê-los gradualmente em subprodutos inofensivos como CO_2 e H_2O (BHANDERI; LAKHANI; MODI, 2024).

Entre os contaminantes de grande preocupação encontra-se o Diuron (N-(3,4-diclorofenil) -N, N-dimetilureia), um herbicida do grupo das fenilureias amplamente utiizado na agricultura para o controle de ervas daninhas em culturas como cana-de-açúcar, café e algodão. Devido à sua elevada estabilidade química e persistência ambiental, sua meia-vida no solo pode ultrapassar 370 dias, o Diuron tende a se acumular no ambiente e a alcançar corpos hídricos com facilidade (CARRIER et al., 2009). Essa substância é classificada como prioritária pela Diretiva-Quadro da Água da União Europeia e considerada um provável carcinógeno humano pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (AKGÜN; DÜKKANCI, 2023a). Além do seu potencial genotóxico, o Diuron atua como desregulador endócrino e apresenta altíssima toxicidade para os ecossistemas aquáticos (QUINTERO-CASTAÑEDA et al., 2024).

Para otimizar a degradação de compostos como o Diuron, o nitreto de carbono grafítico (g-C_3N_4) tem se destacado como um fotocatalisador livre de metais, quimicamente estável e não tóxico (SHAO et al., 2019). Sua estrutura bidimensional, composta por carbono e nitrogênio, apresenta um *bandgap* na faixa de 2,7 a 2,8 eV, permitindo sua ativação sob radiação de luz visível ou energia solar (BHANDERI; LAKHANI; MODI, 2024).

A síntese do g-C_3N_4 é geralmente realizada por polimerização térmica de precursores ricos em carbono e nitrogênio, sendo a melamina e a ureia amplamente empregadas devido ao seu baixo custo e disponibilidade. A escolha do precursor exerce influência direta propriedades estruturais, ópticas e eletrônicas do material obtido, afetando sua estrutura porosa, área superficial, mobilidade de carga e as eficiências do seu *bandgap*, os quais são determinantes para o desempenho fotocatalítico (BANG TRUONG; CUONG NGUYEN; HUR, 2023; BHANDERI; LAKHANI; MODI, 2024).

Diante disso, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre g-C_3N_4 sintetizado utilizando melamina como precursor e o g-C_3N_4 sintetizado a partir da ureia. O estudo visa compreender como o precursor escolhido influencia as propriedades estruturais e óticas do semicondutor e investigar a eficiência de ambos os materiais na fotocatálise do herbicida Diuron sob condições controladas.

Materiais e Métodos

Os precursores utilizados na síntese do g-C_3N_4 foram ureia (carbamida, NH_2CONH_2, grau analítico – PA) e melamina ($C_3H_6N_6$, grau analítico – PA, pureza 98,5%), ambas utilizadas sem purificação adicional. Como poluente modelo, utilizou-se Diuron comercial (N-(3,4-diclorofenil) -N, N-dimetilureia), preparado em solução de água destilada em uma concentração inicial de 10 mg·L^{-1}.

O g-C_3N_4 foi sintetizado por polimerização térmica a partir de ureia e melamina. Inicialmente, foram pesados 10 g de cada precursor, os quais foram acondicionados separadamente em cadinhos de porcelana com tampa e submetidos a aquecimento em forno mufla (JUNG), com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} até 550 °C, por 2 h. Após o tratamento térmico, os materiais foram resfriados naturalmente até temperatura ambiente, macerados até obtenção de pó fino e armazenados em recipiente hermético, conforme Figura 01. Os materiais obtidos foram denominados g-C_3N_4/U e g-C_3N_4/M, conforme o precursor utilizado (FU et al., 2018; RODRÍGUEZ-PÉREZ, 2021).

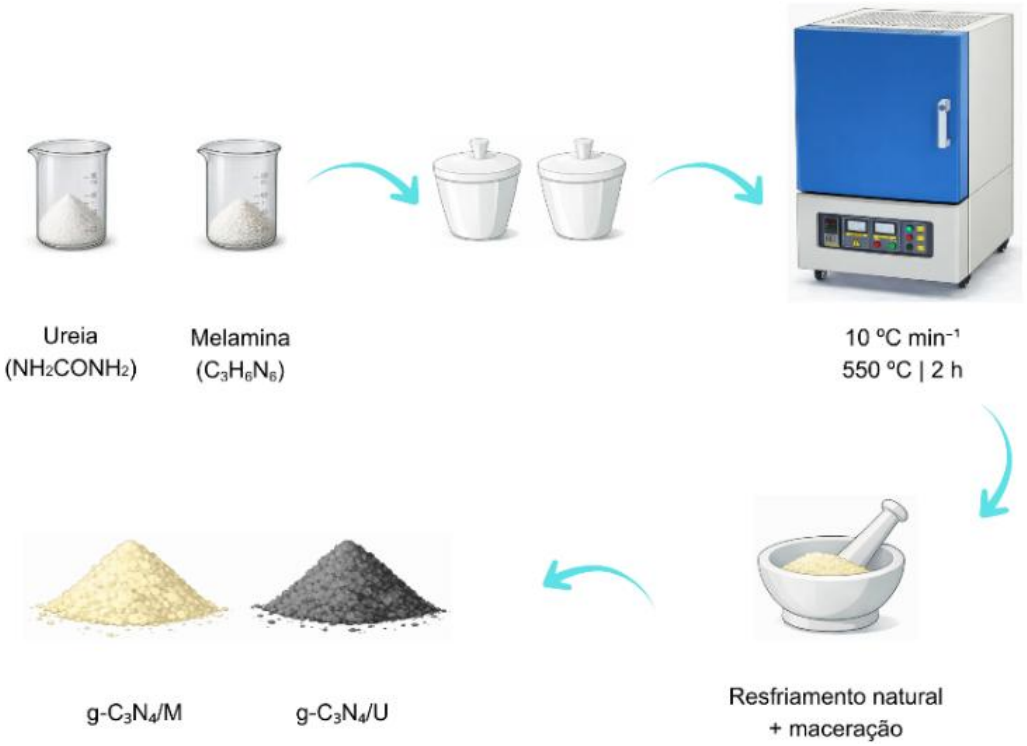


Figura 01: Metodologia da síntese do g-C_3N_4 por polimerização térmica a partir de ureia e melamina.
Fonte: Autores (2026)

Foi realizado um ensaio de cinética de adsorção com o objetivo de determinar o tempo necessário para o estabelecimento do equilíbrio entre o fotocatalisador e o poluente em solução. Para isso, a suspensão contendo o material e o Diuron foi mantida sob agitação no escuro, com monitoramento da concentração ao longo do tempo, até a estabilização dos valores, caracterizando o equilíbrio de adsorção. A partir desse ensaio preliminar, definiu-se o tempo de permanência no escuro adotado nos experimentos fotocatalíticos (FERREIRA et al., 2022).

Após a etapa preliminar de adsorção, foram realizados os ensaios fotocatalíticos para avaliar a eficiência dos materiais na degradação do Diuron em solução aquosa. Para isso, o fotocatalisador foi disperso em solução de Diuron com concentração inicial de 10 mg L^{-1}, utilizando-se concentração de 0,2 g L^{-1} de fotocatalisador, sob agitação constante (BERNARDINO et al., 2024). Previamente à irradiação, a suspensão foi mantida no escuro por 40 min, com o objetivo de atingir o equilíbrio de adsorção entre o poluente e o fotocatalisador.

Após esse período, a suspensão foi submetida à irradiação solar por 80 min, sendo os ensaios realizados entre 12:00 e 14:00, na cidade de Maringá (PR), onde a irradiação solar médio incidente foi de aproximadamente 980.100 lux, aferida por meio de um luxímetro digital (AKSO-AK305). Durante o ensaio, foram coletadas alíquotas a cada 20 minutos, para determinar a concentração residual de Diuron por espectrofotometria, utilizando um espectrofotômetro (HACH-D6000) com comprimento de onda ajustado para 210 nm, conforme Figura 02.

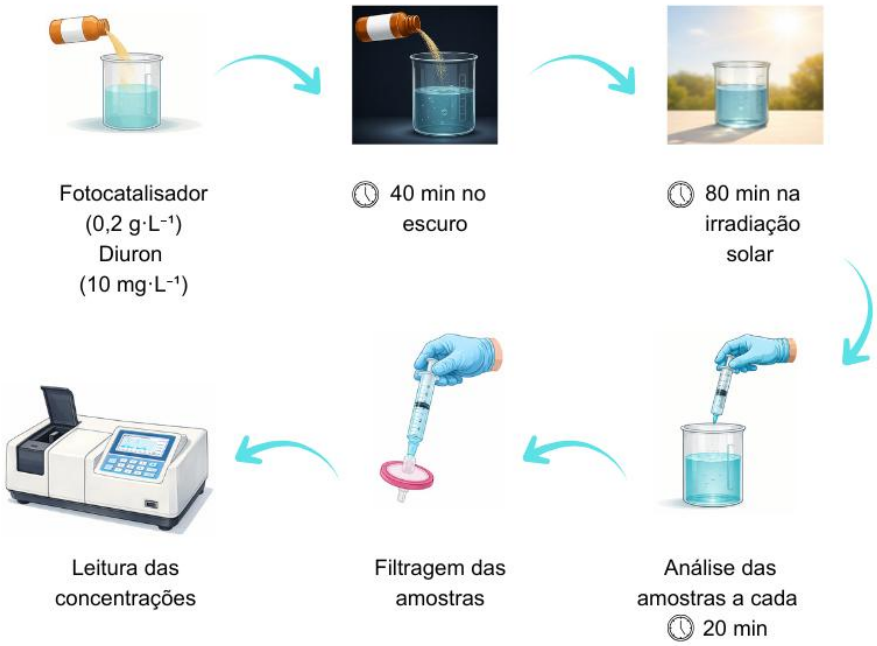


Figura 02: Metodologia do ensaio de eficiência fotocatalítica. Fonte: Autores (2026)

A eficiência de remoção de Diuron (%) foi calculada de acordo com a Equação (01).

$$Eficiência\ de\ remoção\ (\%) = \frac{(C0-Ct)}{C0} . 100 \qquad (01)$$

Onde: C0 representa a concentração inicial de Diuron e Ct corresponde à concentração de contaminante em determinado tempo.

Resultados e discussão

Com base no ensaio de cinética de adsorção, observou-se que o equilíbrio de adsorção foi atingido aproximadamente aos 40 min de reação, comportamento congruente com a literatura que demonstra que materiais à base de g-C_3N_4 geralmente atingem rapidamente o equilíbrio de adsorção (HAO; LUAN, 2024). Tal resultado está associado à sua baixa capacidade adsortiva, uma vez que a quantidade de moléculas efetivamente retidas na superfície é limitada, levando a uma rápida estabilização da concentração em solução (AKGÜN; DÜKKANCI, 2023b).

Mesmo após duas horas de adsorção, a eficiência de ambos semicondutores sintetizados não ultrapassou a 25%, ratificando a baixa capacidade adsortiva do g-C_3N_4 em sua forma *bulk* (“pura”), atribuída à sua baixa área superficial e porosidade, elevada condensação estrutural e morfologia lamelar pouco favorável ao aprisionamento físico de moléculas, além de sua natureza relativamente hidrofóbica, que limita a interação na interface sólido-líquido (WEN et al., 2017). Essas características restringem a quantidade de sítios ativos acessíveis e, consequentemente, a eficiência de adsorção do Diuron.

Quanto a eficiência fotocatalítica, observou-se desempenho superior do material sintetizado a partir da ureia (g-C_3N_4/U), que atingiu aproximadamente 45% de degradação do Diuron após 120 minutos de reação, enquanto o g-C_3N_4/M apresentou eficiência inferior, em torno de 30% no mesmo intervalo de tempo, conforme apresentado na Figura 03. Ainda que o g-C_3N_4/U tenha demonstrado melhor desempenho relativo, os níveis de degradação obtidos permanecem moderados, o que pode ser diretamente associado às limitações intrínsecas do material quanto à etapa inicial de adsorção, e também a quantidade reduzida de fotocatalisador utilizada (0,2 g L^{-1}).

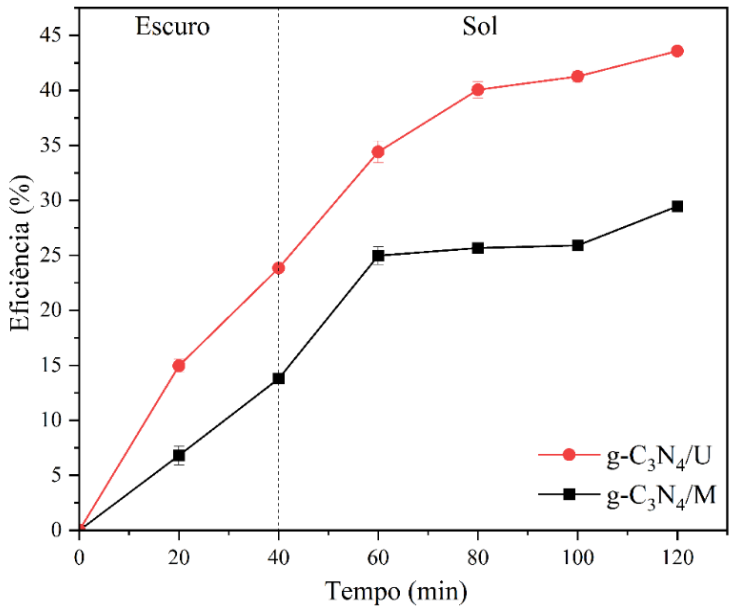


Figura 03: Eficiência fotocatalítica de g-C_3N_4 sintetizado a partir de ureia (g-C_3N_4/U) e melamina (g-C_3N_4/M) para remoção de Diuron. Fonte: Autores (2026)

Nesse contexto, as diferenças de desempenho entre os materiais podem estar relacionadas às modificações estruturais e químicas induzidas pelo precursor. Do ponto de vista físico, a decomposição térmica da ureia promove intensa liberação de gases, principalmente NH_3 e CO_2, que atuam como agentes formadores de poros, resultando em uma estrutura mesoporosa com maior área superficial, volume de poros e maior acessibilidade aos sítios ativos (RODRÍGUEZ-PÉREZ, 2021). Em contraste, o material derivado da melamina apresenta estrutura mais densa, com baixa porosidade e reduzida área superficial, limitando tanto a interação com o poluente quanto a difusão das moléculas até os sítios reacionais, conforme ilustrado na Figura 04. (FU et al., 2018; ONG et al., 2016).

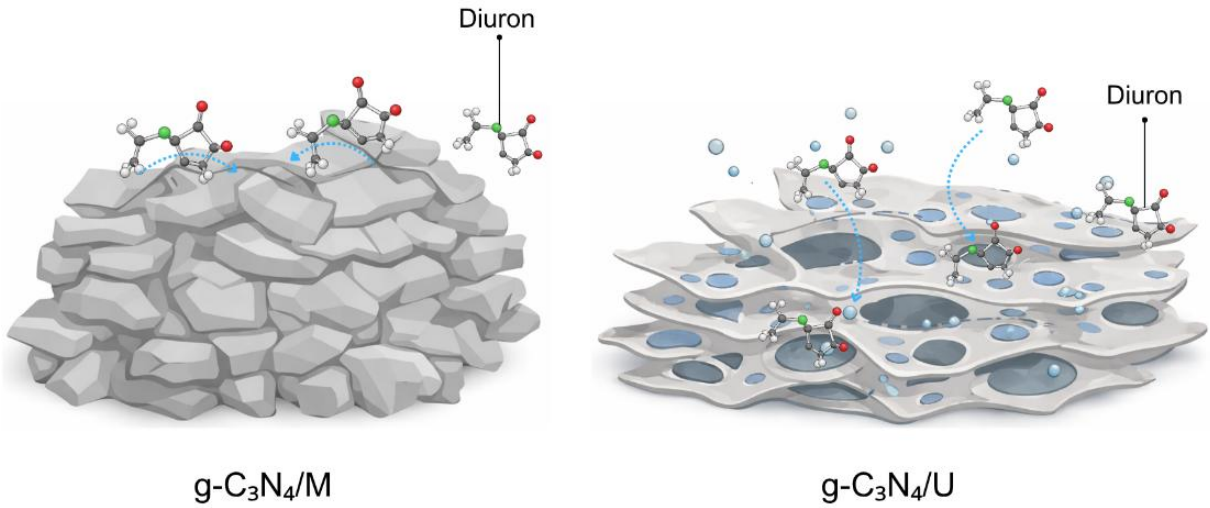


Figura 04: Representação esquemática das diferenças morfológicas entre o g-C_3N_4/M (estrutura densa) e o g-C_3N_4/U (estrutura mesoporosa), destacando o impacto na adsorção do Diuron. Fonte: Autores (2026)

Adicionalmente, a presença de grupos funcionais superficiais e uma carga eletrostática mais negativa favorecem interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas, aumentando a afinidade pelo poluente. Essa combinação de fatores físicos e químicos explica a maior capacidade de adsorção do g-C_3N_4/U e a rápida estabilização da cinética observada, especialmente pela facilitação do transporte de massa nos canais mesoporosos (WEN et al., 2017).

Sob o ponto de vista químico e interfacial, o g-C_3N_4 puro apresenta natureza relativamente hidrofóbica, o que desfavorece sua interação com o meio aquoso e dificulta o contato íntimo entre a superfície do fotocatalisador e as moléculas de Diuron em solução (BANG TRUONG; CUONG NGUYEN; HUR, 2023; LI et al., 2021). Essa limitação torna-se particularmente relevante porque o Diuron apresenta grupos funcionais polares em sua estrutura, o que lhe confere afinidade com o meio aquoso e exige uma interface sólido-líquido favorável para que a adsorção e a posterior reação fotocatalítica ocorram de maneira mais eficiente (CARRIER et al., 2009; FRANCO et al., 2025).

No caso do g-C_3N_4/U, a maior densidade de defeitos estruturais e de grupos funcionais superficiais, como espécies amino terminais ($-NH_x$), tende a atenuar parcialmente essa barreira interfacial, favorecendo interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas (WEN et al., 2017).

Além disso, a possível presença de intermediários estruturais mais reativos contribui para melhor absorção de radiação e maior eficiência na separação de cargas, reduzindo a recombinação dos pares elétron-buraco (e^-/h^+) e aumentando a geração de espécies reativas, como radicais $\cdot O_2^-$ e ·OH (RODRÍGUEZ-PÉREZ, 2021). Esses fatores atuam de forma sinérgica no aumento da eficiência fotocatalítica do g-C_3N_4/U, promovendo maior disponibilidade de sítios ativos, melhor transporte de massa e maior geração de espécies oxidantes (ONG et al., 2016).

Adicionalmente, a própria complexidade molecular do Diuron contribui para a resistência à degradação. Trata-se de um composto aromático clorado, com elevada estabilidade química e baixa reatividade, cuja degradação envolve múltiplas etapas, incluindo desalogenação, clivagem de cadeias laterais e hidroxilação do anel aromático (QUINTERO-CASTAÑEDA et al., 2024). Esses processos exigem sucessivos ataques por espécies reativas (HAO; LUAN, 2024), o que reforça a necessidade de sistemas fotocatalíticos com maior capacidade adsortiva e melhor eficiência na separação de cargas (AKGÜN; DÜKKANCI, 2023b).

Comentários finais

Este estudo avaliou a influência do precursor nas propriedades estruturais e no desempenho fotocatalítico do g-C_3N_4 na degradação do herbicida Diuron, evidenciando a relação direta entre características físico-químicas do material e sua eficiência no processo. Os resultados obtidos permitem destacar os seguintes pontos principais:

- O ensaio de cinética de adsorção indicou que o equilíbrio foi atingido aos 40 minutos, confirmando a rápida estabilização característica de materiais à base de g-C_3N_4, associada à sua baixa capacidade adsortiva;
- O g-C_3N_4/U apresentou desempenho superior, atingindo aproximadamente 45% de degradação do Diuron, em comparação a cerca de 30% para o g-C_3N_4/M, evidenciando a influência significativa do precursor;
- A superioridade do g-C_3N_4/U está associada à formação de uma estrutura mesoporosa, com maior área superficial e maior acessibilidade aos sítios ativos, além da presença de defeitos estruturais e grupos funcionais que favorecem interações intermoleculares e a EROs;
- A natureza relativamente hidrofóbica do g-C_3N_4 puro, aliada à afinidade do Diuron pelo meio aquoso, limita a interação na interface sólido-líquido, contribuindo para a baixa eficiência de adsorção observada. Nesse sentido, destaca-se que o g-C_3N_4 tende a apresentar melhor desempenho na degradação de compostos com maior caráter hidrofóbico, nos quais a interação com a superfície do catalisador é mais favorecida;
- A complexidade estrutural do Diuron, caracterizada por sua natureza aromática clorada e elevada estabilidade química, impõe maior resistência à degradação, exigindo múltiplas etapas oxidativas e elevada disponibilidade de EROs.

De forma geral, os resultados demonstram que, embora a modificação do precursor seja uma estratégia eficaz para melhorar as propriedades estruturais do g-C_3N_4, a baixa capacidade adsortiva do material ainda representa uma limitação significativa. Como perspectiva para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de heteroestruturas que incorporem materiais com elevada capacidade de adsorção, de modo a otimizar a interação sólido-líquido, bem como a utilização de componentes que atuem como sequestradores de elétrons, como o grafeno, promovendo a redução da recombinação dos pares elétron-buraco e, consequentemente, aumentando a eficiência fotocatalítica do sistema. Por fim, sugere-se também investigar a otimização de parâmetros operacionais, como aumento de tempo de reação e concentração de fotocatalisador.

Agradecimentos

Os autores agradecem e reconhecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências Bibliográficas

AKGÜN, Didem; DÜKKANCI, Meral. g-C3N4 supported Ag/AgCl@MIL-88A MOF based triple composites for highly efficient diuron photodegradation under visible LED light irradiation. Journal of Water Process Engineering, [S. l.], v. 51, p. 103469, 2023. a. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103469.

AKGÜN, Didem; DÜKKANCI, Meral. g-C3N4 supported Ag/AgCl@MIL-88A MOF based triple composites for highly efficient diuron photodegradation under visible LED light irradiation. Journal of Water Process Engineering, [S. l.], v. 51, p. 103469, 2023. b. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103469.

BANG TRUONG, Hai; CUONG NGUYEN, Xuan; HUR, Jin. Recent advances in g–C3N4–based photocatalysis for water treatment: Magnetic and floating photocatalysts, and applications of machine-learning techniques. Journal of Environmental Management, [S. l.], v. 345, p. 118895, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118895.

BERNARDINO, Eduarda Gameleira; FERREIRA, Maria Eliana Camargo; BERGAMASCO, Rosângela; YAMAGUCHI, Natália Ueda. Photocatalyst of manganese ferrite and reduced graphene oxide supported on activated carbon from cow bone for wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research, [S. l.], v. 31, n. 3, p. 4779–4796, 2024. DOI: 10.1007/s11356-023-31501-9.

BHANDERI, Dhavalkumar; LAKHANI, Pratikkumar; MODI, Chetan K. Graphitic carbon nitride (g-C3N4) as an emerging photocatalyst for sustainable environmental applications: a comprehensive review. RSC Sustainability, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 265–287, 2024. DOI: 10.1039/D3SU00382E.

CARRIER, Marion; GUILLARD, Chantal; BESSON, Michèle; BORDES, Claire; CHERMETTE, Henry. Photocatalytic Degradation of Diuron: Experimental Analyses and Simulation of HO° Radical Attacks by Density Functional Theory Calculations. The Journal of Physical Chemistry A, [S. l.], v. 113, n. 22, p. 6365–6374, 2009. DOI: 10.1021/jp810146v.

FERREIRA, Maria E.; SOLETTI, Lara D.; BERNARDINO, Eduarda G.; QUESADA, Heloise B.; GASPAROTTO, Francielli; BERGAMASCO, Rosângela; YAMAGUCHI, Natália U. Synergistic Mechanism of Photocatalysis and Photo-Fenton by Manganese Ferrite and Graphene Nanocomposite Supported on Wood Ash with Real Sunlight Irradiation. Catalysts, [S. l.], v. 12, n. 7, 2022. DOI: 10.3390/catal12070745.

FRANCO, Dison S. P. et al. Diuron Removal from Water by Adsorption: Fundamentals, Mechanism, Desorption, and Future Perspectives. Separation & Purification Reviews, [S. l.], v. 54, n. 4, p. 310–326, 2025. DOI: 10.1080/15422119.2024.2401848.

FU, Junwei; YU, Jiaguo; JIANG, Chuanjia; CHENG, Bei. g-C3N4-Based Heterostructured Photocatalysts. Advanced Energy Materials, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 1701503, 2018. DOI: 10.1002/aenm.201701503.

HAO, Liang; LUAN, Jingfei. The Fabrication and Property Characterization of a Ho2YSbO7/Bi2MoO6 Heterojunction Photocatalyst and the Application of the Photodegradation of Diuron under Visible Light Irradiation. International Journal of Molecular Sciences, [S. l.], v. 25, n. 8, p. 4418, 2024. DOI: 10.3390/ijms25084418.

LI, Kunwei; BAO, Liyan; CAO, Shuaisheng; XUE, Yunfeng; YAN, Shicheng; GAO, Honglin. Template-Assisted Surface Hydrophilicity of Graphitic Carbon Nitride for Enhanced Photocatalytic H2 Evolution. ACS Applied Energy Materials, [S. l.], v. 4, n. 11, p. 12965–12973, 2021. DOI: 10.1021/acsaem.1c02602.

ONG, Wee-Jun; TAN, Lling-Lling; NG, Yun Hau; YONG, Siek-Ting; CHAI, Siang-Piao. Graphitic Carbon Nitride (g-C3N4)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer To Achieving Sustainability? Chemical Reviews, [S. l.], v. 116, n. 12, p. 7159–7329, 2016. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00075.

QUINTERO-CASTAÑEDA, Cristian Yoel; TENDERO, Claire; TRIQUET, Thibaut; MORENO-TORRES, Oscar H.; SIERRA-CARRILLO, María Margarita; ANDRIANTSIFERANA, Caroline. A Review of Wastewater Pollution by Diuron: From Its Origin to Treatments for Safe Reuse. Water, [S. l.], v. 16, n. 23, 2024. DOI: 10.3390/w16233524. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/16/23/3524. Acesso em: 30 mar. 2026.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, Adriana Patricia. Síntese e caracterização de heteroestruturas de quitosana/ G-C3n4 para fotodegradação de micropoluentes. 2021. masterThesis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2021. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/30810. Acesso em: 9 abr. 2026.

SHAO, Zhuwang; ZHANG, Dafeng; LI, Hong; SU, Changhua; PU, Xipeng; GENG, Yanling. Fabrication of MIL-88A/g-C3N4 direct Z-scheme heterojunction with enhanced visible-light photocatalytic activity. Separation and Purification Technology, [S. l.], v. 220, p. 16–24, 2019. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.03.040.

WEN, Jiuqing; XIE, Jun; CHEN, Xiaobo; LI, Xin. A review on g-C3N4-based photocatalysts. Applied Surface Science, 2nd International Symposium on Energy and Environmental Photocatalytic Materials. [S. l.], v. 391, 2nd International Symposium on Energy and Environmental Photocatalytic Materials, p. 72–123, 2017. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.07.030.

AVANÇOS RECENTES E APLICAÇÕES DE MFCS NA GERAÇÃO DE BIOENERGIA EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

1 Sabrina Lika Oshima, 2 Kátia Valéria Marques Cardoso Prates, 3 Alexandre Sordi
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: sabrinalika@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: kprates@utfpr.edu.br; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: alexandresordi@professores.utfpr.edu.br.

Palavras-chave: células a combustível microbianas; bioenergia; tratamento de efluentes.

Resumo

A crescente pressão antrópica sobre os recursos hídricos somada à demanda global por matrizes energéticas de baixo carbono tem impulsionado o desenvolvimento de tecnológicas inovadoras capazes de integrar o tratamento de águas residuárias à recuperação de energia. Nesse contexto, as células a combustível microbianas (MFCs) destacam-se como uma plataforma de bioeletroquímica promissora, baseada na atuação de microrganismos exoeletrogênicos na conversão direta matéria orgânica de efluentes em eletricidade. Este estudo consiste em uma revisão sistemática e crítica da literatura científica internacional, com o objetivo de analisar a influência das diferentes configurações de MFCs sobre o desempenho eletroquímico e a eficiência de tratamento de efluentes. A revisão foi conduzida a partir de buscas estruturadas nas bases ScienceDirect, Scopus e Web of Science, abrangendo o período de 2019 a 2026, com critérios de inclusão baseados na disponibilidade de dados quantitativos de densidade de potência, eficiência coulômbica e remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO). A análise dos estudos selecionados foi organizada em eixos comparativos, considerando diferentes configurações reacionais (câmara única, dupla câmara e sistemas empilhados), além da avaliação das principais perdas energéticas e limitações operacionais. Os resultados evidenciam uma discrepância consistente entre o desempenho obtido em condições laboratoriais controladas e aquele observado em aplicações com efluentes reais. Sistemas operando com substratos sintéticos apresentaram densidades de potência de até 3000 mW/m² e eficiências coulômbicas superiores a 80%, enquanto sistemas com efluentes reais tipicamente apresentaram valores inferiores a 800 mW/m² e eficiências coulômbicas entre 15 e 45%. Apesar das elevadas taxas de remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) (frequentemente superior a 85%), a conversão energética permanece limitada, com menos de 10% do potencial energético sendo efetivamente recuperado. A análise crítica indica que as principais limitações estão associadas às perdas por ativação, sobretudo na reação de redução do oxigênio no cátodo, às perdas ôhmicas relacionadas aos materiais e à resistência interna do sistema, e às perdas por concentração em condições de maior densidade de corrente. Adicionalmente, fatores como o alto custo de componentes (membranas e catalisadores), a instabilidade de biofilmes eletroativos e a complexidade microbiológica de efluentes reais comprometem a viabilidade operacional e a escalabilidade da tecnologia. Em termos de configuração, sistemas de dupla câmara apresentam melhor controle e maior eficiência coulômbica, enquanto sistemas de câmara única e arranjos empilhados oferecem vantagens construtivas e maior potencial de aplicação em escala, ainda que com desempenho inferior. Conclui-se que, embora as MFCs apresentem elevado potencial no contexto da economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6 e 7), sua aplicação em larga escala depende da superação das limitações técnicas, econômicas e operacionais. Avanços futuros devem concentrar-se no desenvolvimento de materiais de baixo custo, na otimização de consórcio microbianos e na integradação com ferramentas de controle e otimização operacional.

Introdução

O crescimento populacional, a urbanização e a intensificação das atividades industriais têm ampliado a pressão sobre os ecossistemas aquáticos, elevando a demanda por água e saneamento e contribuindo para a degradação da qualidade hídrica (CUNHA; BORGES, 2015; UNESCO, 2023). Esse cenário está associado a mudanças no uso do solo e nos padrões de consumo, consolidando o saneamento como um desafio ambiental e operacional em escala global (BRITO, 2025). No Brasil, apesar da elevada disponibilidade hídrica, a distribuição desigual dos recursos e limitações na gestão favorecem situações de escassez, agravadas pela variabilidade climática e pelo uso ineficiente da água (ANA, 2026).

O acesso ao saneamento ainda apresenta lacunas relevantes, com aproximadamente 55% da população atendida por coleta de esgoto e menos de 50% do volume gerado sendo tratado (SINIS, 2023; ITB, 2024). As águas residuárias possuem composição complexa, contendo matéria orgânica, nutrientes, metais e micropoluentes emergentes, o que impõe desafios adicionais aos sistemas de tratamento (KUNWAR et al., 2024; WANG et al., 2024; BURT et al., 2025).

Os sistemas convencionais de tratamento, como lodos ativados e filtros biológicos, apresentam limitações na remoção de compostos orgânicos persistentes e emergentes, incluindo fármacos e produtos de uso doméstico e industrial, que frequentemente não são completamente degradados (MATESUN et al., 2024; BURT et al., 2025). A presença desses compostos em corpos hídricos está associada a impactos ambientais, como toxicidade para organismos aquáticos e alterações na qualidade da água, além de potenciais riscos à saúde pública, incluindo a disseminação de resistência antimicrobiana (BURT et al., 2025; ALMALKI et al., 2026).

Além das limitações na remoção de contaminantes, os processos convencionais apresentam elevada demanda energética. Em sistemas aeróbios, a aeração pode representar entre 50% e 90% do consumo total de energia das estações de tratamento de esgoto (DREWNOWSKI et al., 2019; ZAIRI; MEDDAH; SLIMANI, 2024). De forma integrada, o consumo

energético desses sistemas varia entre 0,112 e 0,808 kWh por metro cúbico tratado, contribuindo para custos operacionais elevados e emissões indiretas de gases de efeito estufa (LI; YU; RITTMANN, 2015 apud SORGATO et al., 2022). Em escala global, o setor de saneamento pode representar parcela significativa do consumo de eletricidade, reforçando a necessidade de soluções mais eficientes.

Diante desse contexto, intensifica-se a busca por tecnologias que integrem o tratamento de efluentes à recuperação de recursos, em consonância com os princípios da economia circular e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 6 e 7 (UNESCO, 2023; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2021). Entre essas alternativas, destacam-se as células a combustível microbianas (MFCs), que possibilitam a conversão da matéria orgânica em eletricidade por meio da atividade de microrganismos eletroativos, com potencial para reduzir a demanda energética associada aos processos convencionais (LOGAN et al., 2006; ALVAREZ-LEY et al., 2026).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de revisão sistemática da literatura, os avanços recentes nas MFCs, com ênfase na influência das diferentes configurações no desempenho eletroquímico e em sua aplicação no tratamento de efluentes.

Material e Métodos

O presente estudo configura-se como uma revisão sistemática e crítica da literatura científica internacional, estruturada metodologicamente com base em princípios consolidados para a condução de revisões sistemáticas na área das ciências ambientais e engenharia sanitária (Okoli; Schabram, 2010; Pagani; Kovaleski; Resende, 2022).

A pesquisa bibliográfica foi conduzida de forma abrangente nas principais bases de dados indexadas de literatura científica internacional, incluindo ScienceDirect (Elsevier), Scopus (Elsevier) e Web of Science (Clarivate Analytics), cobrindo o período de publicação de janeiro de 2019 a abril de 2026, com o objetivo de capturar os avanços mais recentes na área, mas sem excluir referências clássicas e fundacionais anteriores a esse período, quando pertinentes para a compreensão dos fundamentos. Foram incluídos na análise artigos originais de pesquisa (research articles), artigos de revisão bibliográfica (review articles) publicados em periódicos com corpo editorial e sistema de revisão por pares, bem como anais de conferências internacionais de relevância na área.

A estratégia de busca combinou, por meio de operadores booleanos AND e OR, os seguintes descritores e palavras-chave em língua inglesa: "microbial fuel cell", "MFC", "wastewater treatment", "bioenergy", "bioelectricity", "configuration", "single-chamber", "dual-chamber", "stacked MFC", "scale-up", "coulombic efficiency", "power density", "anode", "cathode", "proton exchange membrane".

O critério de inclusão foi a apresentação de dados quantitativos originais ou compilados de desempenho eletroquímico, especificamente densidade de potência (expressa em mW/m^2 de área de eletrodo ou W/m^3 de volume de reator), eficiência coulômbica (EC, em porcentagem) e eficiência de remoção de Demanda Química de Oxigênio (remoção de DQO, em porcentagem). Foram excluídos estudos puramente teóricos ou de modelagem sem validação experimental correspondente, bem como estudos em que os parâmetros não foram claramente reportados. Estudos conduzidos exclusivamente com substratos sintéticos de alta pureza, como glicose ou acetato, foram considerados apenas quando acompanhados de análises comparativas ou discussões sobre a aplicabilidade dos resultados em efluentes reais, de modo a reduzir a superestimação do desempenho da tecnologia.em condições práticas.

A análise crítica dos dados extraídos se concentrou em quatro eixos principais: (i) comparação quantitativa do desempenho entre diferentes configurações de MFCs (câmara única, dupla câmara, empilhadas em série/paralelo e sistemas híbridos acoplados); (ii) análise das perdas energéticas por ativação, ôhmicas e por concentração em função da configuração e do tipo de substrato; (iii) avaliação dos gargalos tecnológicos e científicos para a escalabilidade de MFCs, correlacionando dados de desempenho com desafios de implementação prática; e (iv) identificação de tendências emergentes e lacunas de pesquisa não preenchidas.

A discussão integrada dos resultados foi realizada sob a ótica conceitual da economia circular, dos princípios ESG e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 e 7 da ONU.

Resultados e Discussão

Os resultados da análise sistemática e crítica da literatura recente são apresentados e discutidos em seções temáticas interconectadas, iniciando pelos fundamentos operacionais e mecanismos de transferência de elétrons, evoluindo para uma análise comparativa detalhada do desempenho eletroquímico em diferentes configurações e para diferentes tipos de substrato/efluente, aprofundando-se na discussão das perdas energéticas, e, por fim, abordando de maneira crítica as barreiras existentes e as perspectivas futuras para a tecnologia.

Fundamentos operacionais e componentes das MFCs

O princípio de funcionamento de uma célula a combustível microbiana é fundamentado em duas meias-reações eletroquímicas acopladas que ocorrem simultaneamente em compartimentos fisicamente separados: (i) a reação de oxidação anaeróbia da matéria orgânica (o substrato combustível) no ânodo, catalisada por microrganismos exoeletrogênicos; e (ii) a reação de redução de um aceptor final de elétrons (tipicamente o oxigênio molecular do ar, por ser abundante e ter alto potencial redox) no cátodo (Logan et al., 2006; Karamzadeh et al., 2023).

Para que esse acoplamento eletroquímico ocorra de maneira eficiente e sustentada, uma MFC típica é composta por quatro elementos estruturais fundamentais: (a) o ânodo, eletrodo negativo localizado na câmara anaeróbia, onde se forma o biofilme

eletroativo; (b) o cátodo, eletrodo positivo localizado na câmara catódica (ou exposto diretamente ao ar em configurações simplificadas); (c) uma membrana de troca de prótons (PEM, do inglês *Proton Exchange Membrane*), que separa fisicamente as duas câmaras, permitindo a passagem seletiva de prótons (H^+) do ânodo para o cátodo enquanto impede a migração indesejada de oxigênio para o compartimento anódico; e (d) um circuito elétrico externo (fios condutores e uma resistência de carga) que conecta os dois eletrodos, fornecendo o caminho para o fluxo de elétrons (Alvarez-Ley et al., 2026; Logan et al., 2006). A Figura 01 apresenta um diagrama esquemático completo de uma MFC de dupla câmara com membrana de troca de prótons, ilustrando a disposição e a inter-relação desses componentes essenciais, bem como os fluxos de elétrons, prótons, substrato e aceptor final.

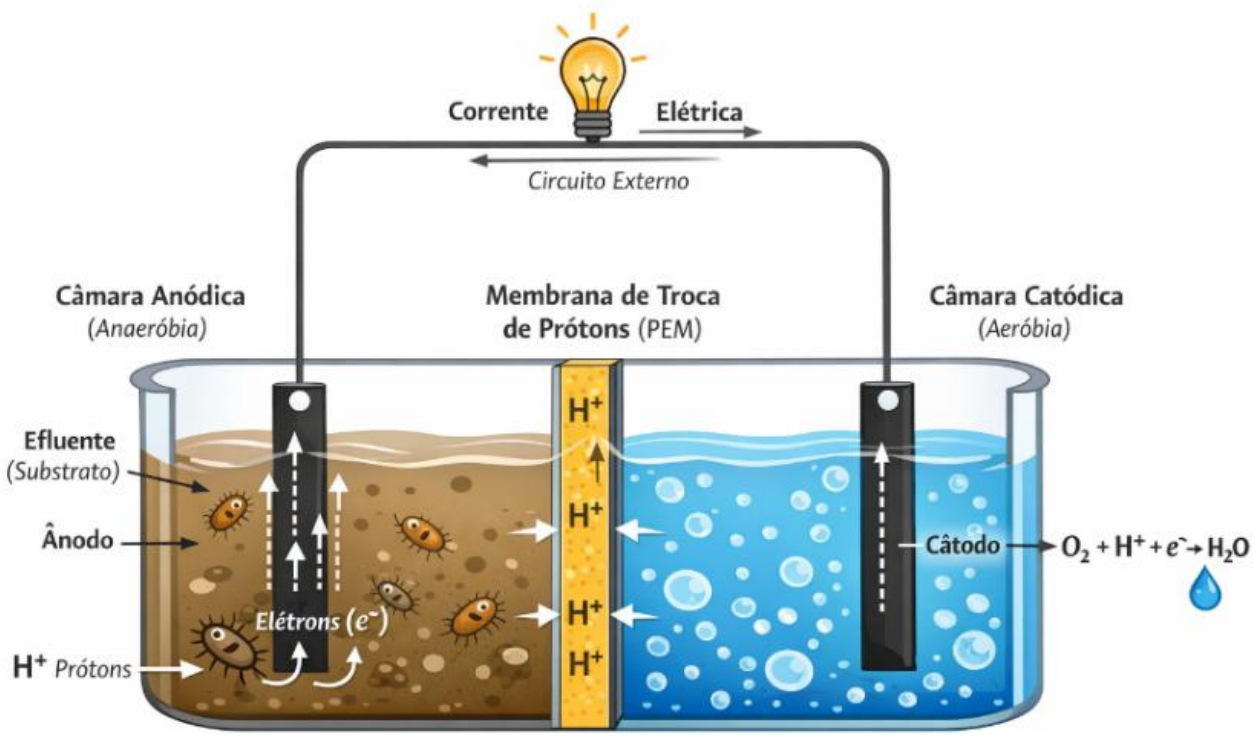


Figura 01: Diagrama esquemático de uma MFC de dupla câmara com membrana de troca de prótons (PEM), ilustrando o fluxo de elétrons no circuito externo, o fluxo de prótons através da membrana, a oxidação da matéria orgânica no ânodo e a redução do oxigênio no cátodo.
Fonte: Imagem gerada com "ChatGPT" a partir de descrição fornecida pela autora (2026), adaptado de Logan et al. (2006) e Alvarez -Ley et al. (2026).

Mecanismos de transferência de elétrons extracelular (EET)

A eficiência global de uma célula a combustível microbiana está intrinsecamente ligada à eficiência com que os microrganismos exoeletrogênicos conseguem transferir os elétrons gerados no metabolismo oxidativo intracelular (a partir da oxidação da matéria orgânica) para a superfície externa e sólida do eletrodo de carbono que serve como ânodo (Alvarez-Ley et al., 2026; Logan et al., 2006).

Esse processo é denominado como transferência de elétrons extracelular (EET, do inglês *Extracellular Electron Transfer*) e constitui o mecanismo bioeletroquímico fundamental sem o qual a geração de corrente elétrica em uma MFC seria inviável (Burton et al., 2025). A ausência, a baixa eficiência ou a interrupção dos mecanismos de EET representa um dos principais fatores limitantes para a obtenção de altas densidades de potência em sistemas bioeletroquímicos, particularmente quando se utilizam efluentes reais complexos (Santoro et al., 2017; Wang et al., 2022).

Os mecanismos de EET consolidados na literatura podem ser classificados em três categorias principais, que frequentemente coexistem em consórcios microbianos mistos: (i) transferência direta por contato físico célula-ânodo, mediada por proteínas condutoras como citocromos c de membrana externa; (ii) transferência indireta mediada por moléculas redox (lançadeiras eletrônicas ou *shuttles* redox) produzidas endogenamente pelas próprias bactérias ou adicionadas exogenamente; (iii) transferência via nanofios bacterianos condutores (pili ou outros filamentos extracelulares), que conectam fisicamente células distantes ao eletrodo e criam uma matriz condutiva no biofilme (Burton et al., 2025; Alvarez-Ley et al., 2026).

Análise comparativa crítica do desempenho: influência da configuração e do substrato

A Tabela 01 sintetiza a variabilidade do desempenho eletroquímico das MFCs, evidenciando sua dependência de dois fatores interdependentes: a configuração arquitetônica do reator e a natureza do substrato tratado. Observa-se que sistemas operando com substratos sintéticos de alta pureza tendem a apresentar valores superiores de densidade de potência e eficiência coulômbica, enquanto aplicações com efluentes reais apresentam desempenho reduzido, refletindo a maior complexidade do meio.

Tabela 01: Síntese comparativa do desempenho eletroquímico e de tratamento de diferentes configurações de células a combustível microbianas reportadas na literatura recente (2019-2026).

Configuração	Substrato/Efluente	Densidade de Potência (mW/m²)	Eficiência Coulômbica (EC, %)	Remoção de DQO (%)	Principais Observações
Dupla câmara (bancada)	Esgoto sanitário real	800 - 1500	50 - 65	88 - 94	Bom desempenho, mas EC limitada por efluente real (Li et al., 2024)
Câmara única (bancada/escala piloto)	Efluente de cervejaria	200 - 800	20 - 40	82 - 91	Simplicidade, menor custo, mas menor eficiência (Alvarez-Ley et al., 2026)
Câmara única (escala piloto)	Esgoto doméstico real	150 - 450	15 - 30	70 - 85	Aplicação mais realista, desafios de escala (Sorgato et al., 2022)
Empilhada (Stack, série/paralelo)	Água residuária sintética	8000 - 12000	35 - 55	75 - 90	Aumento de potência e tensão, desafios de equalização (Tan et al., 2021)

Fonte: Autoria própria (2026).

Pela análise das informações apresentadas na Tabela 01, os sistemas laboratoriais de bancada de pequena escala, operando com substratos sintéticos de fácil assimilação microbiana (como ácidos orgânicos de cadeia curta), atingem densidades de potência que podem ser até uma ordem de grandeza superiores (alcançando picos de até 3000 mW/m²) e eficiências coulômbicas significativamente mais elevadas (atingindo até 85%), quando comparados a sistemas de escala semelhante ou mesmo piloto que tratam efluentes reais de composição complexa (que tipicamente operam com densidades de potência na faixa de 150 a 800 mW/m² e eficiências coulômbicas significativamente mais baixas, entre 15% e 45%) (Karamzadeh et al., 2023; Li et al., 2024; Alvarez-Ley et al., 2026).

Essa discrepância no desempenho não é um mero artefato experimental, mas sim uma evidência dos desafios inerentes à aplicação prática da tecnologia. As causas múltiplas e interconectadas para essa perda de desempenho em condições reais incluem: (i) a elevada complexidade físico-química e microbiológica da matriz do efluente real, que contém não apenas matéria orgânica solúvel, mas também sólidos suspensos, coloides, óleos e graxas, compostos recalcitrantes de difícil degradação e potenciais substâncias tóxicas ou inibidoras do metabolismo bacteriano; (ii) a necessidade de hidrólise enzimática prévia de polímeros orgânicos complexos (como carboidratos complexos, proteínas e lipídios) por um consórcio microbiano diverso, que inclui bactérias fermentativas e hidrolíticas, mas que nem sempre é otimizado para uma alta eficiência de EET; (iii) a presença em efluentes reais de aceptores de elétrons concorrentes com o ânodo, notadamente oxigênio dissolvido residual (em efluentes que passaram por pré-tratamento aeróbio), nitrato (NO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}), que desviam elétrons do fluxo para o circuito externo para processos metabólicos alternativos (desnitrificação, sulfatoredução), reduzindo a eficiência coulômbica (Kunwar et al., 2024; Burton et al., 2025).

Perdas energéticas: barreiras fundamentais para a eficiência de conversão

A diferença entre a tensão teórica máxima (força eletromotriz, EMF) de uma MFC, calculada pela diferença entre o potencial redox do aceptor final e o doador de elétrons, e a tensão real de operação observada experimentalmente é atribuída a múltiplas fontes de perdas energéticas que ocorrem em diferentes componentes e etapas do sistema. A compreensão aprofundada dessas perdas é um requisito fundamental para o desenvolvimento de estratégias de engenharia visando a otimização do desempenho. Na Tabela 02 é apresentada uma classificação e descrição de maneira sistematizada das três principais categorias de perdas energéticas em MFCs.

Quadro 02: Classificação, descrição e causas fundamentais das perdas energéticas em células a combustível microbianas.

Tipo de Perda	Descrição Mecanicista	Domínio de Corrente	Principais Causas e Fatores de Influência
Perdas por Ativação	Associadas à energia livre de ativação necessária para superar a barreira energética das reações eletroquímicas de meia-célula.	Baixas densidades de corrente	Cinética lenta da reação de redução de oxigênio (ORR) no cátodo; Barreira para transferência de elétrons na interface eletrodo-biofilme.

Perdas Ôhmicas	Resultantes da resistência à passagem de íons (eletrólitos e membrana) e de elétrons (eletrodos, contatos, fiação).	Todas as densidades (aumento linear com I)	Resistividade dos materiais do ânodo e cátodo; Resistência da membrana (ex.: Nafion®); Condutividade iônica do anólito e católito.
Perdas por Concentração	Decorrentes de limitações no transporte de massa (difusão) de reagentes para os eletrodos.	Altas densidades de corrente	Esgotamento de substrato na região do biofilme; Limitação de oxigênio no cátodo; Acúmulo de produtos (prótons) no ânodo.

Fonte: Adaptado de Logan et al. (2006) e Karamzadeh et al. (2023).

A análise integrada dos dados da Tabela 01, combinada ao entendimento das perdas energéticas da Tabela 02, permite o direcionamento de futuras pesquisas: independentemente da configuração do reator (câmara única, dupla câmara ou empilhada) e da habilidade do consórcio microbiano em degradar a matéria orgânica, a eficiência de conversão energética - ou seja, a fração da energia química disponível no substrato (medida pela DQO removida) que é efetivamente convertida em eletricidade útil no circuito externo - permanece notoriamente baixa, tipicamente inferior a 10% e frequentemente abaixo de 5% em sistemas tratando efluentes reais (Li et al., 2024). A grande fração da energia química do substrato que não é convertida em eletricidade é dissipada predominantemente na forma de calor (inevitável devido à Segunda Lei da Termodinâmica) ou, mais significativamente, é desviada para rotas metabólicas alternativas que não contribuem para a geração de corrente elétrica. Entre essas rotas metabólicas concorrentes, destacam-se a metanogênese (produção de metano por arqueias metanogênicas, que não geram corrente), a redução de aceptores de elétrons alternativos como nitrato e sulfato (processos de desnitrificação e sulfatoredução) e a alocação de elétrons para a síntese de nova biomassa microbiana (crescimento celular) (Logan et al., 2006; Burton et al., 2025).

Configurações avançadas, sistemas acoplados e perspectivas de escalabilidade

Visando superar as limitações inerentes de potência e eficiência energética de células unitárias, configurações mais complexas e arranjos sistêmicos têm sido objeto pesquisa nos últimos anos. Na Figura 02 é apresentado um diagrama comparativo que sintetiza as principais arquiteturas de reatores e sistemas acoplados derivados da tecnologia MFC.

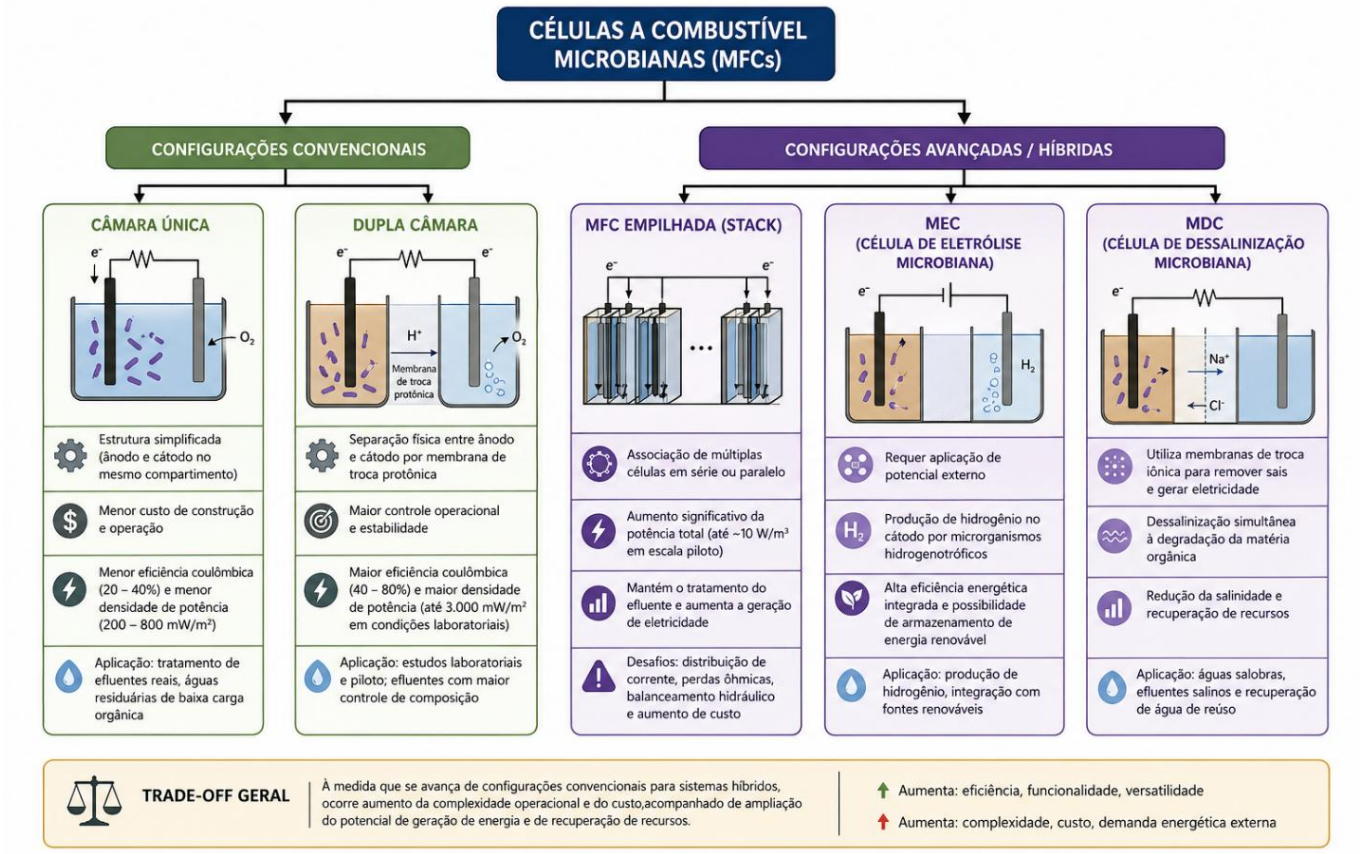


Figura 02: Diagrama comparativo das principais configurações de células a combustível microbianas (câmara única, dupla câmara) e sistemas híbridos derivados (células de eletrólise microbiana - MECs; células de dessalinização microbiana - MDCs; MFCs empilhadas).
Fonte: Imagem gerada com "ChatGPT" a partir de descrição informada pela autora (2026), baseado em Li et al. (2024) e Prado et al. (2021).

Os sistemas empilhados (ou *stacks* de MFCs), que consistem na conexão de múltiplas células unitárias em arranjos elétricos em série (para aumentar a tensão total) ou em paralelo (para aumentar a corrente total), apresentam-se atualmente como a rota de engenharia mais promissora e viável para aumentar a potência e a tensão do sistema a níveis que possam ser úteis para aplicações práticas, como o acionamento direto de pequenos dispositivos eletrônicos ou a alimentação de sistemas de monitoramento remoto (TAN et al., 2021; SANTORO et al., 2017). Entretanto, estudos como o realizado por Tan e colaboradores (2021) destacam que a escalabilidade por meio de *stacks* introduz uma nova camada de complexidade operacional e desafios de engenharia. Esses desafios incluem fenômenos como a dificuldade de equalização de tensão entre as diferentes células conectadas em série (especialmente quando expostas a condições hidráulicas e de substrato não perfeitamente uniformes), o risco significativo de inversão de polaridade em células individuais (que pode causar danos irreversíveis ao biofilme anódico) e o aumento das perdas ôhmicas totais do sistema devido à resistência adicional das conexões elétricas e à maior distância de transporte iônico (Tan et al., 2021; Li et al., 2024).

Para além da geração de eletricidade, tecnologias derivadas e acopladas às MFCs ampliam substancialmente o escopo de aplicação da bioeletroquímica. Destacam-se: (i) as células de eletrólise microbiana (MECs), que, ao contrário das MFCs, requerem um pequeno aporte externo de energia elétrica para que os microrganismos no ânodo produzam hidrogênio (H_2) a partir de matéria orgânica, em vez de eletricidade; (ii) as células de dessalinização microbiana (MDCs), uma arquitetura de três câmaras (ânodo, compartimento de dessalinização intermediário e cátodo) que permite a remoção simultânea de sais (dessalinização) de águas salobras ou salgadas, juntamente com o tratamento do efluente orgânico no ânodo e a geração de eletricidade (Prado et al., 2021; Li et al., 2024).

Desafios de escalabilidade, barreiras econômicas e perspectivas futuras

A transição da escala laboratorial (reatores de mililitros a poucos litros) para aplicações em escala real (com vazões de milhares de litros por dia) impõe desafios complexos, não lineares e ainda parcialmente não resolvidos. Entre eles, destaca-se o elevado custo de capital (CapEx), que atualmente limita a viabilidade das MFCs em larga escala. Esse custo está fortemente associado a materiais-chave, como a membrana de troca de prótons - especialmente o Nafion®, amplamente utilizado devido ao seu alto desempenho - e catalisadores catódicos à base de metais nobres, como a platina, que podem representar até 60% do custo total do sistema (Alvarez-Ley et al., 2026).

Diante disso, a busca por alternativas de menor custo tornou-se uma prioridade, incluindo o uso de membranas cerâmicas porosas, biocátodos (nos quais o biofilme atua como catalisador) e eletrodos produzidos a partir de biomassa residual. Paralelamente, a estabilidade operacional de longo prazo dos biofilmes eletroativos em sistemas contínuos — sujeitos a variações de carga orgânica e à presença de substâncias inibidoras típicas de efluentes reais — ainda representa uma incerteza relevante, sobretudo pela escassez de estudos em escala piloto com monitoramento prolongado (Wang et al., 2022; Sorgato et al., 2022).

Por outro lado, do ponto de vista da sustentabilidade ambiental e da economia circular, as MFCs alinham-se de maneira quase ideal à integração entre tratamento de efluentes e recuperação de energia. As tendências de pesquisa mais promissoras para a próxima década, com potencial para romper as barreiras atuais, incluem: (a) o desenvolvimento e validação em escala piloto de biocátodos robustos e de membranas cerâmicas de ultra-baixo custo; (b) a engenharia metabólica e a construção de consórcios microbianos sintéticos, combinando linhagens com alta capacidade hidrolítica e fermentativa com linhagens exoeletrogênicas de alta eficiência de EET; (c) a integração da tecnologia MFC com algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina para a otimização preditiva e em tempo real de parâmetros operacionais complexos (carga orgânica, vazão, temperatura, pH); (d) a expansão das aplicações para além do tratamento de efluentes, incluindo o uso de MFCs como biossensores autossustentáveis de baixo custo para monitoramento contínuo de toxicidade, DQO e outros parâmetros de qualidade da água em tempo real.

Considerações Finais

As células a combustível microbianas representam uma tecnologia de vanguarda no nexo crítico entre o tratamento sustentável de efluentes e a geração distribuída de bioenergia, oferecendo uma plataforma única e versátil para a recuperação de recursos dentro dos princípios estruturantes da economia circular. Esta revisão crítica da literatura evidenciou de maneira robusta que, embora o conhecimento sobre os mecanismos bioeletroquímicos e microbiológicos esteja bem estabelecido e em contínuo aprimoramento, o desempenho prático de sistemas reais (tratando efluentes complexos, em escalas maiores que a bancada) ainda é significativamente inferior ao potencial teórico máximo e aos resultados otimizados obtidos em laboratório com substratos sintéticos.

A análise comparativa sistemática demonstrou que a configuração do reator exerce uma influência direta, profunda e frequentemente complexa sobre o desempenho eletroquímico e a viabilidade econômica do sistema. Enquanto sistemas de dupla câmara com membranas de troca de prótons de alta qualidade proporcionam maior controle experimental e eficiência coulômbica em pesquisas de bancada, sendo ferramentas insubstituíveis para estudos mecanísticos, as configurações de câmara única (mais simples e de menor custo) e os sistemas empilhados (stacks) são arquiteturas mais promissoras, respectivamente, para aplicações de tratamento de menor custo e para a necessária escalabilidade em termos de potência e tensão de saída, embora ambas as arquiteturas apresentem desempenho eletroquímico (especialmente em termos de EC) reduzido quando comparadas às configurações de dupla câmara otimizadas.

A barreira técnica mais crítica e de mais difícil superação, identificada neste estudo, reside na persistentemente baixa eficiência de conversão energética (tipicamente inferior a 10%), com as perdas eletroquímicas por ativação (especialmente a

lenta cinética da ORR no cátodo), as perdas ôhmicas (devidas à resistência de materiais e eletrólitos) e as perdas metabólicas por competição (desvio de elétrons para processos como metanogênese) não tendo sido ainda superadas de maneira consistente e economicamente viável.

Para que as MFCs possam transitar definitivamente do *status* de tecnologia promissora em escala laboratorial para o de solução tecnológica consolidada e competitiva para o saneamento sustentável em escala real, esforços concentrados, multidisciplinares e de longo prazo em pesquisa, desenvolvimento e inovação são imperativos nas seguintes frentes prioritárias: (i) desenvolvimento, caracterização e validação em campo de materiais de eletrodo e membrana de ultra-baixo custo, como eletrodos de carbono derivados de resíduos agroindustriais e membranas cerâmicas de argila; (ii) engenharia de consórcios microbianos sintéticos, combinando alta eficiência de degradação de substratos complexos com alta capacidade de EET, e o desenvolvimento de estratégias de formação e estabilização de biofilmes eletroativos em condições de fluxo contínuo e carga variável; (iii) realização de estudos robustos de escalamento (scale-up) sistemáticos, incluindo análises técnico-econômicas e de ciclo de vida (ACV) detalhadas, em condições operacionais reais de estações de tratamento, para identificar pontos de otimização e nichos de aplicação mais promissores.

A superação bem-sucedida desses desafios interconectados posicionará as MFCs como uma tecnologia-chave para as futuras cidades e indústrias circulares, transformando de maneira decisiva o paradigma atual, no qual um efluente é visto como um passivo ambiental e um custo operacional, para um novo paradigma no qual o efluente é valorizado como um recurso hídrico e energético.

Agradecimentos

A autora expressa seus sinceros agradecimentos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Londrina, pelo suporte acadêmico, institucional e estrutural fornecido ao longo de toda a graduação e durante a elaboração deste trabalho. Um agradecimento especial é dirigido à orientadora Profa. Dra. Kátia Valéria Marques Cardoso Prates, ao coorientador Prof. Dr. Alexandre Sordi e membro da banca examinadora, Profa. Dra. Claudia Santos Fiuza Lima, pelas discussões técnicas e pelo incentivo à continuidade dos estudos em nível de pós-graduação (mestrado). Este trabalho foi realizado com o apoio moral e o ambiente acadêmico estimulante proporcionado pela UTFPR.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2025: relatório síntese. Brasília: ANA, 2026. P. 55 Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/113042 Acesso em: 14 abr. 2026.

ALMALKI, A. J. et al. Green synthesis of metal oxide nanoparticles using plant extracts for removal of berberine hydrochloride from wastewater: a comprehensive review. Journal of Qassim University Science, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 1-14, 2026. DOI: 10.25259/JQUS_39_2025. Disponível em: https://doi.org/10.25259/JQUS_39_2025

ALVAREZ-LEY, J. E. et al. Microbial fuel cells for power generation and wastewater treatment: a review of components, performance and sustainability. Biomass and Bioenergy, [s.l.], v. 212, p. 1-56, 2026. DOI: 10.1016/j.biombioe.2026.109341. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109341 Acesso em: 10 mar. 2026.

ATEUNKENG, J.; NOUM, F.; BITJOKA, L. Energy efficiency in wastewater treatment plants. Energy Reports, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112496 Acesso em: 28 abr. 2026.

BRITO, M. C. W. Crescimento populacional e pressão sobre recursos hídricos: uma análise global. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 30, e15, 2025.

BURT, R. et al. Emerging contaminants in wastewater: challenges and treatment technologies. *Environmental Research*, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w18070860 Acesso em: 29 abr. 2026.

BURTON, C. S. et al. Extracellular electron transfer mechanisms in electroactive biofilms. *Nature Reviews Microbiology*, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acsestwater.5c00865 Acesso em: 28 abr. 2026.

CUNHA, D.; BORGES, A. Recursos hídricos e urbanização. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

DREWNOWSKI, J. et al. Energy consumption in wastewater treatment plants. *Energy*, v. 181, p. 681–693, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124248. Acesso em: 25 abr. 2026.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards a circular economy. 2021. Disponível em: https://ellenmacarthurfoundation.org. Acesso em: 25 abr. 2026.

HASAN, M. et al. Substrate influence on microbial fuel cell performance. *Journal of Environmental Management*, 2023. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5610400/ Acesso em: 26 abr. 2026.

ITB – INSTITUTO TRATA BRASIL. Ranking do saneamento 2024. Disponível em: : https://tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento-2024/ Acesso em: 26 abr. 2026.

KARAMZADEH, A. et al. Performance optimization of microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-023-38215-5 Acesso em: 25 abr. 2026.

KUNWAR, P. et al. Wastewater characteristics and treatment technologies. *Water Research*, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-023-31696-x Acesso em: 27 abr. 2026.

LI, M. et al. Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. *Renewable Energy*, 2024. Disponível em: https://bioscipublisher.com/index.php/jeb/article/view/3844
Acesso em: 26 abr. 2026.

LOGAN, B. E. et al. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, v. 40, n. 17, p. 5181–5192, 2006. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16999087/ Acesso em: 25 abr. 2026.

MATESUN, R. et al. Removal of pharmaceuticals in wastewater treatment. *Chemosphere*, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116610. Acesso em: 28 abr. 2026.

PAGANI, R.; KOVALESKI, J.; RESENDE, L. Methodi Ordinatio: systematic review
method. *Scientometrics*, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x Acesso em: 25 abr. 2026.

PRADO, M. et al. Microbial electrochemical technologies: applications and perspectives. *Journal of Power Sources*, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.19177/rgsa.v10e32021377-396 Acesso em: 27 abr. 2026.

SANTORO, C. et al. Microbial fuel cells: from fundamentals to applications. *Journal of Power Sources*, v. 356, p. 225–244, 2017. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5465942/ Acesso em: 25 abr. 2026.

SINIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico 2023. Disponível em: https://www.snis.gov.br. Acesso em: 26 abr. 2026.

SORGATO, M. et al. Real wastewater treatment using microbial fuel cells. *Water Science and Technology*, 2022. Disponível em: https://congressoabes.com.br/32cbesa/anais/16/ Acesso em: 27 abr. 2026.

TAN, W. H. et al. Microbial fuel cell technology: scale-up challenges. *Processes*, v. 9, p. 985, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/pr9060985. Acesso em: 25 abr. 2026.

UNESCO. World Water Development Report 2023. Paris: UNESCO, 2023. Disponível em: https://www.unesco.org/reports/wwdr. Acesso em: 25 abr. 2026.

WANG, H. et al. Electroactive biofilms and microbial fuel cells. *Biotechnology Advances*, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2673-6284/11/4/44 Acesso em: 26 abr. 2026.

ZAIRI, M.; MEDDAH, B.; SLIMANI, A. Energy consumption in wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 2024. Disponível em: https://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=0042-84692502575Z Acesso em: 28 abr. 2026.

REUSO DE CARVÃO ATIVADO E ARGILA EMPREGADOS COMO ADSORVENTES NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CELULOSE KRAFT

1 Eduardo Alberto Lazo Hinojosa, 2 Vsévolod Mymrine, 3 Claudia Regina Xavier
1,2,3Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eduardohinojosa@alunos.utfpr.edu.br; seva6219@gmail.com; cxavierutfpr@gmail.com

Palavras-chave: Resistência de materiais; Pozolanas; Cerâmica.

Resumo

Para produção de celulose e de papel é usada grande quantidade de água, 60 m^3 de água por tonelada de celulose produzida, madeira e produtos químicos, sendo gerados efluentes nos diferentes processos produtivos da indústria. A matéria orgânica e a cor do efluente do processo *Kraft* se devem à presença de moléculas derivadas da lignina que são difíceis de serem removidas ou biodegradadas. Uma alternativa para a remoção destes compostos é o emprego de um processo de adsorção em carvão ativado, e argila, no qual certos componentes são transferidos a uma superfície porosa sólida. Essas partículas adsorvidas se mantém no leito até a saturação para posteriormente serem retiradas e regeneradas. As partículas com maior área superficial específica são os materiais com maior poder de adsorção. Com vistas à remediação desta matriz, o presente trabalho avaliou o potencial de reuso de carvão ativado de casca de coco e de argila montmorilonita, empregados como adsorventes no tratamento de efluente de indústria de celulose *Kraft*. A capacidade de adsorção de matéria orgânica e cor no carvão ativado e argila montmorilonita foram determinados pelo modelo matemático de Langmuir e Freundlich. Foi avaliada a possibilidade de aproveitamento dos adsorventes, após os processos de adsorção, na incorporação de cinzas de carvão como parte da composição de argamassas, com teores de 0,4%, 1,0% e 1,2%. As cinzas deste adsorvente foram misturadas com cimento Portland, areia e água, com tempos de cura de 7 e 28 dias, seguida de análise de resistência à compressão obtendo o melhor resultado usando 1,2% de cinzas de carvão após 28 dias de cura contendo 40,89MPa comparado com o material controle que foi de 37,61MPa. Para a reutilização da argila foram desenvolvidos materiais cerâmicos com 15% de argila do processo de adsorção, 25% de vidro moído e 60% de argila vermelha para a confecção de corpos de prova cerâmicos sinterizados a temperaturas de 1100ºC e 1150ºC, sendo posteriormente avaliados em testes de resistência mecânica, obtendo o melhor resultado com a temperatura de 1150ºC. Nestas condições, foi medida resistência de 21.06MPa comparado com a temperatura de 1100ºC que foi de 16,82Mpa. No caso das cerâmicas os valores de resistência diferem em menos de 5% entre as duas temperaturas utilizadas, mostrando ser um material promissor para fabricação de tijolos, telhas, pisos e azulejos. Assim conclui-se que a incorporação desses materiais adsorventes saturados é uma alternativa sustentável e promissora para o uso na construção civil. Com isso, se favorece a economia circular**,** promovendo a destinação adequada de resíduos industriais e reduzindo o impacto ambiental da indústria de celulose *Kraft*.

Introdução

A indústria de celulose sempre foi considerada umas das maiores consumidoras de água dentro de seus processos industrias, gerando efluente com alto teor de cor, compostos fenólicos derivados da lignina e matéria orgânica recalcitrante (MACHADO, 2022). Com a crescente produção e o uso de água para lavagem das fibras consumindo em média de 60 m^3 de água por tonelada de celulose produzida, são gerados volumes significativos de efluentes líquidos, sendo implementados novas metodologias para o tratamento destes efluentes (DETONI et al., 2021). As indústrias de celulose *Kraft* representam importante base para a economia devido à disponibilidade de recursos florestais ocupando o 4º lugar no ranking mundial de fabricantes em termos de volume de produção (ABTCP, 2024). A lavagem dentro do processo produtivo é a principal fonte de descarga de águas residuais em fábricas de celulose, com uma grande quantidade de substâncias que podem ser tóxicas e não biodegradáveis (FOTUNATTO, 2014). Esses compostos persistentes geralmente são procedentes da lignina gerando uma coloração marrom-escura no efluente a ser tratado biologicamente (BASTOS CRUZ, 2017). O método de adsorção usando a casca de coco, argila, casca de arroz, dentre outros estão sendo utilizados como alternativa para remover cor e carga orgânica em efluentes de alta complexidade (SILVA et al., 2021). Para entender o comportamento e o mecanismo de adsorção, existem diversos modelos com equações para descrever a cinética da adsorção pela construção de isotermas. Neste trabalho foram utilizadas as equações de Langmuir (Equação 01) e de Freundlich (Equação 02).

$$q_e = k_L Q_o C_e/(1+ k_L C_e) \quad (01)$$

$$q_e = k_f C_e^{1/n} \quad (02)$$

Em que:

q_e : quantidade do adsorbato que foi adsorvido no equilíbrio ($mg.g^{-1}$);
C_e : concentração do adsorbato no equilíbrio ($mg.L^{-1}$);
k_f : é a capacidade de adsorção, sendo $K_f=[(mg.L^{-1})(L.mg^{-1})^{1/n}]$ em que n é a constante de Freundlich;
Q_o : adsorção máxima ($mg.g^{-1}$);
k_L : constante de modelo ($L.mg^{-1}$) equivalente à constante de equilíbrio químico em cinética de reação.

O processo de adsorção é utilizado em vários processos industriais, devido ao elevado poder de remoção de componentes que se encontram presentes em fases líquidas. Para minimizar o impacto ambiental gerado pelas indústrias tem-se adotado o reaproveitamento de materiais (OLIVEIRA; SANTOS, 2021). Essa prática viabiliza a eliminação de descartes industriais e reforça o uso de novos materiais em setores como na construção civil, no reaproveitamento dos resíduos gerados na adsorção. No caso do carvão ativado como adsorvente, a base é na análise de resistência à compressão de argamassas com adição de cinzas de carvão como material pozolânico. A pozolana é um material natural ou artificial que contém sílica em forma reativa (WAN; CHEN, 2020). Na definição mais formal segundo a NBR 12653/1992 pozolanas, são materiais sílica e alumínio que possuem pouca atividade aglomerante, mas que, quando misturado com água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedade aglomerante apresentam um incremento acentuado de resistência (COIMBRA; LIBARDI; MORELLI; 2008). Outro material adsorvente utilizado é a argila montmorilonita que tem uma capacidade em adsorver e remover poluentes como matéria orgânica e cor devido à sua estrutura expansível e alta área superficial (UDDIN, 2017). De acordo com Souza et al., (2017) o reaproveitamento da argila saturada com resíduos industriais para a produção de cerâmicos, após a adsorção, pode ser incorporada em matrizes cerâmicas (cozimento), transformando o resíduo em produtos para a construção civil, como tijolos e telhas, com boas propriedades mecânicas. O reuso de adsorventes deve ser considerado para minimizar o impacto ambiental desses materiais usados no tratamento de matrizes líquidas (FIGUEIREDO et al., 2020). O uso de adsorventes alternativos é uma opção para tornar o custo menos elevado, além de reaproveitar materiais e resíduos da adsorção de múltiplos poluentes, que seriam descartados (KGOMO et al., 2022). O presente trabalho avaliou o potencial de reuso de cinzas de carvão ativado como material construtivo em argamassa e de argila montmorilonita como material cerâmico empregados como adsorventes no tratamento de efluente de indústria de celulose *Kraft*.

Material e Métodos

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado no Laboratório de Tratamento de Efluentes (LATAR), do Departamento de Química e Biologia – DABQi, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Sede Ecoville. Os materiais adsorventes que foram utilizados nos tratamentos para remoção de matéria orgânica e cor foram o carvão ativado da casca de coco em pó cedido pela empresa Carbomafra S.A. Curitiba-Paraná, e a argila montmorilonita em pó doada pela Professora Daniele Schnitzler da DAQBi-CT-UTFPR. As metodologias para análises dos parâmetros físico-químicos das amostras de efluente de celulose tratados biológicamente e dos adsorventes usados estão na Tabela 1

Tabela 1: Metodologia de análises físico-químicos, biológicos e mecânicos.

Parámetros	Método	Lugar de análisis
Armazenamento do efluente 4ºC	Nº 1060C do (APHA, 2005)	Laboratório (GTEF) -LAMAQ- DAQBI-CT- UTFPR
DQO	5220D (APHA, 2017)	Laboratório (GTEF) -LAMAQ- DAQBI-CT- UTFPR
$DBO_{5,20}$	521B (APHA, 2017)	Laboratório (GTEF) -LAMAQ- DAQBI-CT- UTFPR
Cor	2120C (APHA,2017).	Laboratório (GTEF) -LAMAQ- DAQBI-CT- UTFPR
pH	método potenciométrico	Laboratório (GTEF) -LAMAQ- DAQBI-CT- UTFPR
Compostos Lignínicos	ÇEÇEN et al. (2017)	Laboratório (GTEF) -LAMAQ- DAQBI-CT- UTFPR
Turbidez	2130B (APHA, 2017)	Laboratório (GTEF) -LAMAQ- DAQBI-CT- UTFPR
COT Carbono Orgânico Total	5310B (APHA, 2005)	Laboratório (GTEF) -LAMAQ- DAQBI-CT- UTFPR
Área superficial especifica (ASE)	Pontos-múltiplos Brunauer-Emmet – Teller (BET	Laboratório de Química de Materiais Avançados (LAQMA) UFPR
Densidade Aparente	ABNT NBR 12076(1991)	Laboratório de Saneamento Civil (DACOC) UTFPR
Teor de umidade	ASTM D 2867-04	Laboratório de Saneamento Civil (DACOC) UTFPR
Teor de material volátil	ASTM 5832-98 (2003)	Laboratório de Saneamento Civil (DACOC) UTFPR
Teor de cinzas	ASTM D 2866-94 (1999)	Laboratório de Saneamento Civil (DACOC) UTFPR
Corpos de prova	NBR 7215 2006 (ABNT, 2006)	Laboratório de Saneamento Civil (DACOC) UTFPR
Resistência de compressão axial	NBR 12770 1992 (ABNT, 1992)	Laboratório de Saneamento Civil (DACOC) UTFPR
Resistência à flexão	NBR 13818 1997 (ABNT, 1997)	Laboratório de Saneamento Civil (DACOC) UTFPR

Fonte: HINOJOSA; XAVIER (2016)

Os parâmetros foram escolhidos para representar a matéria orgânica e a cor do efluente *Kraft* (Hinojosa et al, 2014). Os demais resultados dos parâmetros físico-químicos como granulometria, número de iodo, teor de umidade e teor de cinza para o carvão foram fornecidos pela empresa Carbomafra S.A. A determinação do teor de cinzas do carvão ativado e da argila montmorilonita foi feita em triplicata segundo norma ASTM D 2866-94 (1999). Com o carvão usado no processo de adsorção foi realizada confecção dos corpos de prova cilíndricos de argamassa com tamanho 50mm x 100mm em quantidades de 0,4; 1,0 e 1,2

% de cinzas de carvão como material pozolânico, de acordo com a norma NBR 7215 2006 (ABNT, 2006). Posteriormente foi realizado o ensaio de resistência de compressão axial das amostras através do rompimento dos corpos de prova de acordo com a NBR 12770 1992 (ABNT, 1992), nos tempos de 7 e 28 dias. Para reutilização da argila montmorilonita usada no processo de adsorção foi preparada uma mistura contendo 20% desta argila, 20% de vidro e 60% de argila vermelha. Após a secagem, a mistura foi peneirada a 0,5 mm (32 *mesh*), colocada em moldes de aço para confecção dos corpos de prova cerâmico (16 mm x 50 mm.). Depois da prensagem uniaxial por 30s em 20 MPa foi feita a sinterização em forno a temperatura de 1100ºC ou a 1150ºC por 12 h. O equipamento usado para fazer as cerâmicas foi o Linn Elektro Therm com temperatura máxima de 1350ºC. Concluída a queima, os corpos de prova foram medidos para o cálculo do módulo de resistência à flexão (MRF) de acordo com procedimentos descritos na NBR 13818 1997 (ABNT, 1997). A Eq. 3 é a equação usada para o cálculo do módulo de resistência à flexão.

$$MRF = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} \qquad \text{Eq (03)}$$

Em que: MRF = Módulo de resistência à flexão (MPa); F = Força de ruptura (Kgf); L = Distância entre as barras de apoio (cm); b = Largura do corpo de prova (cm); h = Mínima espessura do corpo de prova (cm);

Resultados e discussões

Caracterização do efluente do processo *Kraft*

A caracterização do efluente do processo *Kraft* pré-tratado biologicamente utilizado nesta pesquisa. Na Tabela 2 estão os resultados dos parâmetros analisados referentes ao efluente do processo Kraft com intervalos de confiança de 95%.

Tabela 2: Caracterização do efluente *Kraft* tratado por processo biológico aeróbio.

Parâmetro	Unidade	N	Media	DP	Min	Máx
DQO	(mg L^{-1})	3	408,00	± 38,83	365,00	440,00
$DBO_{5,20}$	(mg L^{-1})	3	77,55	± 2,39	74,98	79,69
Cor	(mgPt L^{-1})	3	840,00	± 1,02	839,00	841,00
pH	-	3	7,51	± 0,52	6,90	7,70
Compostos Lignínicos	$UV_{280\ nm}$	3	2,85	± 0,045	2,81	2,90
Turbidez	(UNT)	3	320,00	± 2,00	318,00	322,00
COT	(mg L^{-1})	3	125,00	± 3,00	122,00	128,00

Fonte: HINOJOSA; XAVIER (2016)

Na Tabela 2 é possível observar que o efluente tratado biologicamente apresenta valor de pH da ordem de 7,51. Também é possível observar o valor de cor de 840,00 mgPt.L^{-1} superando o nível máximo permitido de 75 mgPt.L^{-1} de acordo com CONAMA Nº357-2005. O efluente empregado para o estudo apresentou relação DBO_5/DQO de 0,18, o que indica menor conteúdo biodegradável e que está de acordo com o pré-tratamento biológico. A relação $DBO_{5,20}$/DQO de efluente *Kraft* não tratado, geralmente varia de 0,3 a 0,5 (POKHER; VIRARAGHAVAN, 2004). Os valores do COT e compostos lignínicos estão de acordo com aqueles observados para efluentes de celulose *Kraft* de outras indústrias Santos et al. (2021); Moura et al. (2023).

Caracterização físico-químico dos adsorventes

Os resultados da caracterização físico-química do carvão e de argila são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização físico-químicas do carvão e da argila.

Propriedades físico-químicas	Carvão média	DP	Argila média	DP
Densidade aparente (g cm^{-3})	0,39	±0,02	0,51	±0,87
Teor de umidade (%)	8,94	±3,52	15,80	±3,87
Teor de material volátil (%)	0,21	±0,002	NA	NA
Teor de cinzas (%)	14,18	±0,054	NA	NA
Área superficial específica (m^2 g^{-1})	479,79		385,51	
Volume dos poros (cm^3 g^{-1})	0,989		0,987	
Tamanho dos poros (å)	1,778		4,109	
ph	9,68	±0,03	8,20	±0,01
Óxidos (%) sio	NA		32,98	
Óxidos (%) al_2o_3	NA		10,82	
Óxidos (%) fe_2o_3	NA		2,85	
Óxidos (%) cao	NA		5,79	
Óxidos (%) na_2o	NA		3,13	
Óxidos (%) mgo	NA		1,90	
Óxidos (%) p_2o_5	NA		<0,10	

NA= não analisado; DP = desvio padrão; n=3

Os dados apresentados na Tabela 3 revelam características fundamentais que explicam o alto desempenho dos materiais nos ensaios de adsorção e resistência mecânica. O potencial de adsorção (Área Superficial e Porosidade) A área superficial específica do carvão (479,79 $m^2.g^{-1}$) é um indicador direto de sua alta capacidade adsortiva. Conforme destacado por Wang e Chen (2020), superfícies acima de 400 m^2/g são ideais para a remoção de macromoléculas orgânicas, como as encontradas no efluente Kraft. O tamanho dos poros do carvão (1,778 Å) indica uma estrutura predominantemente microporosa, o que favorece a retenção de moléculas menores de carbono orgânico. A presença desses óxidos permite que o material reaja com o hidróxido de cálcio do cimento para formar novos compostos aglomerantes, explicando o ganho de resistência nas argamassas (ZHU, et al. 2021). Por outro, lado o pH alcalino do carvão (9,68) pode influenciar a carga superficial do adsorvente, facilitando a atração eletrostática de compostos orgânicos ácidos presentes no efluente *Kraft*. A densidade e umidade, a baixa densidade aparente do carvão (0,39 g.cm-³) aliada ao volume de poros (0,989 $cm^3.g^{-1}$) confirma a leveza e a alta porosidade do material. Isso é consistente com as características de carvões ativados produzidos a partir de biomassa, como a casca de coco. Já a argila, com área de 385,51 $m^2.g^{-1}$ e poros maiores (4,109 Å), atua de forma complementar, sendo mais eficiente na captura de complexos de cor e moléculas maiores (HOSSEINI; ROOSTA, 2021). A análise química da argila mostra uma predominância de sílica (SiO_2 - 32,98%) e alumina (Al_2O_3 - 10,82%) o que está de acordo com o apresentado por Yi et al. (2020). Na Tabela 4 é apresentado um resumo do desempenho do carvão ativado e argila montmorilonita como adsorventes no tratamento terciário do efluente *Kraft*.

Tabela 4 – Remoções de cor e matéria orgânica em carvão ativado e argila montmorilonita

Parâmetro	Remoção (%) – com carvão ativado	Remoção (%) – com argila
COT ($mg.L^{-1}$)	98,0 ± 0,4	55,0 ± 1,0
DQO ($mg.L^{-1}$)	83,0 ± 0,9	50,0 ± 1,2
$DBO_{5,20}$ ($mg.L^{-1}$)	94,0 ± 1,2	88,0 ± 0,9
Cor ($mgPt.L^{-1}$)	95,0 ± 0,8	48,0 ± 1,0

Nota: valores para temperatura de 40ºC; 1,5 g de adsorvente em pH 7
Fonte: (HINOJOSA; XAVIER, 2016)

Na Tabela 4, pode ser verificado o incremento na remoção dos parâmetros utilizando 1,5 g de carvão ativado, em pH 7 e a temperatura de 40 ºC, comparado com argila nas mesmas condições de operação, quanto a cor do efluente por presença da lignina, o carvão removeu 95% comparado com argila que removeu 48%. Estes resultados estão de acordo com observado por Chuan, Karl; Qinglin (2001), para carvão ativado tratando efluentes de celulose com remoções de cor de 85 e 95% respectivamente. É possível afirmar que o carvão removeu mais cor por ter maior superfície específica de poros que a argila, retendo melhor os compostos ligninicos formadores da cor. A remoção de COT com carvão ativado foi 43% superior à da argila removendo matéria orgânica e compostos químicos recalcitrantes; a diferença na remoção de DQO usando carvão ativado e a argila foi de 33%; para remoção da $DBO_{5,20}$ a diferença foi de 6% entre os materiais Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros de ajustes das isotermas de Freundlich e Lagmuir (HINOJOSA; XAVIER, 2016).

Tabela 5 Valores dos parâmetros de adsorção para COT e Cor em carvão ativado

	Freundlich				Langmuir			
Parâmetro	**pH**	**K_f**	**n**	**Coeficiente de regressão, R^2**	**pH**	**B $L.g^{-1}$**	**K_L**	**Coeficiente regressão, R^2**
COT	7	29,76±0,12	4,83±0,31	0,83	7	13,04±0,10	0,19±0,11	0,94
Cor	7	7,13±0,21	1,66±0,12	0,92	7	3,70±0,31	0,24±0,13	0,85

Legenda: K_f= capacidade de adsorção; n = adsorção favorável ou desfavorável; b = quantidade adsorvida; K_L = constante de equilíbrio.
Fonte: (HINOJOSA; XAVIER, 2016)

Na Tabela 5 se pode observar o melhor ajuste usando a equação de Langmuir, com coeficiente de regressão $R^2 = 0,94$ para remoção de COT, o valor de b apresentado no modelo de Langmuir que foi de 13,04 $L.g^{-1}$ de carvão. Isso significa que é possível tratar 13 L de efluente *Kraft* por grama de carvão removendo 98% do carbono orgânico total remanescente do tratamento biológico. O k_L do modelo de Langmuir indica a concentração máxima na fase adsorvente quando a superfície dos sítios ativos é saturada com adsorvato e nestas condições ele foi de 0,19 $L.g^{-1}$. Na mesma tabela, os valores n para Freundlich na remoção de COT indica uma adsorção favorável encontrando-se o valor de n no intervalo de 1 a 5,0 e o valor de $k_f = 29,76$ encontrando-se no intervalo de 25 a 49, característico de uma adsorção média. Na análise de remoção de cor com carvão o valor de b foi de 3,70 $L.g^{-1}$ indicando que é possível remover 95% da cor tratando aproximadamente 4 L de efluente por grama de carvão. O valor de k_f na remoção de cor foi de 7,13 estando no intervalo de 0 a 10 sendo a capacidade de adsorção considerada pequena. O valor de n indica uma adsorção favorável neste modelo. Segundo os valores de n e b calculados se verifica que o carvão ativado remove mais COT do que cor, o que está de acordo com o observado para os perfis de remoção (WANG; CHNE, 2020); DABROWSKI, 2021).

Reaproveitamento do carvão ativado

O potencial de reuso do carvão ativado empregado na adsorção de matéria orgânica e cor do efluente do processo *Kraft* foi investigado mediante a incorporação de suas cinzas geradas após adsorção em argamassas, avaliando-se sua função como material pozolânico. Por definição, materiais pozolânicos contêm sílica em forma reativa que contribui para o ganho de resistência mecânica. Os resultados da integridade estrutural foram obtidos via testes de compressão em corpos de prova. Na Figura 1 é apresentado um dos corpos de prova feitos com cinza de carvão.

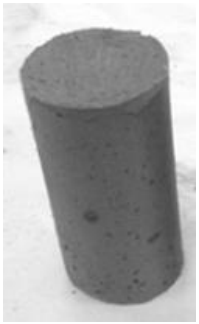


Figura 1: Aspecto do corpo de prova aos 28 dias de cura, tamanho 50 mm x 100 mm.
Fonte: E. L, Hinojosa (2014)

Na Figura 1 é possível observar uma das amostras secas feitas com as cinzas do carvão ativado no dia 28º dia de cura, preparada para o teste de rompimento. Os resultados da análise de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 6 onde são mostrados os valores médios de resistência e desvio padrão de cada amostra.

Tabela 6 –. Composições de cinzas de carvão controle e da adsorção e seu efeito na argamassa

Composições cinza de carvão controle (%)	Resistência (MPa) após 7 días	DP	28 días	DP	Composições cinza de carvão da adsorção (%)	Resistência (MPa) após 7 días	DP	28 días	DP
0%	22,19	1,34	34	0,5	0%	22,13	0,52	36,92	0,45
0,40%	23,34	0,91	36,22	0,65	0,40%	23,85	0,82	38,18	0,56
1,00%	25,89	0,89	36,23	0,43	1,00%	26,81	0,54	39,23	0,75
1,20%	26,67	0,46	37,61	0,6	1,20%	27,64	0,76	40,89	0,34

DP = Desvio padrão
Fonte: (HINOJOSA; XAVIER, 2016)

Na Tabela 6 é possível observar que as resistências em 7 dias de cura foram similares entre o carvão controle e o carvão da adsorção. Para os resultados de resistência a compressão aos 28 dias de cura segundo a norma ABNT NBR 13281 percebe-se que a resistência aumentou mostrando-se superior na amostra contendo o carvão da adsorção.

Reaproveitamento da argila montmorilonita

Para reutilização da argila montmorilonita obtida do processo de adsorção, passou pelo processo de queima com a duas temperaturas. O reuso da argila foi verificado através de ensaios de resistência mecânica para materiais cerâmicos contendo argila usada no tratamento terciário.

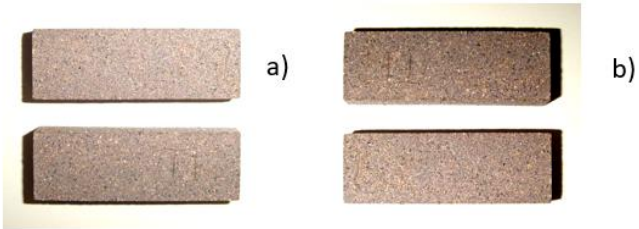


Figura 2: Amostras queimadas a: a) 1100ºC e b) 1150ºC de tamanho (16 mm x 50 mm)
Fonte: Fonte: (HINOJOSA; XAVIER, 2016)

Os resultados de Resistência a Flexão, estão contidos na Tabela 7 em dois diferentes regimes de queima a 1100ºC e 1150 ºC.

Tabela 7 – Médias dos valores de resistência a flexão

CP	Resistência a Flexão – MRF (MPa)			
N	1100°C	DP	1150ºC	DP
4	16,82	± 1,57	21,06	± 3,14

CP = corpo de prova; DP = desvio padrão; N= número de amostras

Fonte: (HINOJOSA; XAVIER, 2016)

Através da análise dos valores obtidos na Tabela 7 pode-se observar que a amostra que foi submetida a 1150 ºC apresentou maior valor de MRF (21,06 MPa), o que pode ser explicado, pelo aumento de temperatura que gera maior cristalização estrutural das moléculas formando um material mais resistente. Isso também foi verificado por Ribeiro (2008) que preparou materiais cerâmicos empregando temperatura de 1150ºC obtendo valores de MRF 20,27 MPa. Na Tabela 6 é possível notar que os valores de resistência diferem em menos de 5% entre as duas temperaturas utilizadas, mostrando ser um material promissor para fabricação de cerâmica vermelha tais como tijolos, telhas, pisos, azulejos, como plastificador e ligante de construção civil como foi verificado por Ribeiro (2008).

Considerações Finais

A capacidade máxima de adsorção de cor e COT em carvão ativado e argila foi determinada utilizando o modelo matemático da isoterma de Langmuir e Freundlich na forma linearizada, sendo o carvão melhor adsorvente para COT do que para cor segundo ajuste por Freundlich em monocamada. Os resultados obtidos demonstraram que o carvão ativado apresenta potencial, como material adsorvente, para ser utilizado na remoção de cor e matéria orgânica, podendo ser utilizado no tratamento terciário de efluente de processo *Kraft* tratado biologicamente. Os resultados do emprego da cinza de carvão ativado após processo de adsorção (com lignina) em argamassas de cimento Portland demonstraram uma alternativa técnica e ambientalmente viável. De acordo com as diretrizes da NBR 12653/1992, o material demonstrou comportamento compatível com o de uma pozolana artificial, reagindo favoravelmente com o hidróxido de cálcio durante o processo de cura. Os teores de adição de cinza de carvão de 1,2% apresentaram acréscimo de resistência em torno de 9% com 28 dias de cura obtendo 40,89 MPa de resistência em comparação com argamassa com cinza de carvão sem o processo de adsorção. Isso indica que existe uma interação química entre as partículas de cimento e as cinzas saturadas favorecendo a cristalização de forma mais eficiente, fechando o ciclo de vida do material e reduzindo o impacto ambiental do setor de celulose e papel. O material cerâmico obtido da argila gerado no processo de adsorção possui propriedades mecânicas de resistência à flexão variando de 16,82 MPa a temperatura de 1100ºC e 21,06 MPa para 1150ºC, as quais demonstram valores excelentes para a fabricação de tijolos maciços, telhas e revestimentos cerâmicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da indústria de celulose; CAPES pelo auxílio financeiro; ao Programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental PPGCTA, ao Laboratório multiuso da UFPR, ao Técnico Gustavo Macioski do Laboratório de Materiais de Construção da UTFPR; ao Técnico Walderson Klitzke do Laboratório de Cerâmica nas Usinas Piloto de Tecnologia Química da UFPR.

Referências Bibliográficas

ABTCP. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Disponível em: Acesso em: 18 abr. 2026.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12076:** Carvão ativado pulverizado - Determinação da massa especifica aparente. Código Secundário: MB 3413. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12770:** Solo coesivo – Determinação da Resistência à Compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653:** Materiais Puzolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215:** Cimento Portland: Determinação da Resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2006.

ASTM International Standards. C 125 – 03: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. **United States**. 2003

ASTM – D 2867 – 2004: Standard Test Method in Activated Carbon. **United States.** 2004.

APHA MERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewat er, 23 ed. Washington: **American Public Health Association**, 2017

AZEVEDO, A.F.F.C**. Betões com alto desempenho com incorporação de cinzas volantes. 2002. 456f.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola da engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal 2002.

BASTOS P.; CRUZ F. Controle ambiental em fábricas de papel e celulose, 2017. Disponível em: . Acesso em 18 abr. 2024.

CHUAN, X.; KARL, T.; QINGLIN, Z. Adsorption of organic pollutants from effluents of a Kraft pulp mill on activated carbon and polymer resin. **Advances in Environmental Research**. v. 3, p. 252-258, 2001.

COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R. Utilização de rejeitos de pilha zinco carvão em argamassas e concretos de cimento Portland. **Revista Cerâmica.** v. 50. n. 316. p. 300-308, 2004.

COLLATTO, D.; BERGMANN, C. P. Emprego de resíduo de celulose da indústria de papel como matéria-prima para fabricação de material cerâmico**. Cerâmica Industrial**, v. 14, n. 3, p. 30-35, 2000

DETONI, C.; SOUZA, J. B.; SOUZA, M. T. S. Gestão hídrica e reúso de efluentes na indústria de celulose e papel: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 15, p. 125-141, 2020

DABROWSKI, A**.** Adsorption from theory to practice**. Advances in Colloid and Interface Science, v**. 93, n. 1-3, p. 135-224, 2021

FIGUEIREDO, M. C. B. et al. Estratégias de Economia Circular na Indústria de Celulose: Valorização de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. e16124, 2020

FORTUNATTO, A. C. **Alternativas para o aproveitamento do licor negro da indústria de papel e celulose.** Monografia (Conclusão do Curso de Especialização em Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético do Instituto) -Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014

HINOJOSA, E. A. L. **Remoção de matéria orgânica e cor de efluente *Kraft* por adsorção usando carvão ativado e argila**. 87 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2014.

HINOJOSA, E. A. L.; XAVIER C**.** Remoção de matéria orgânica e cor de efluente kraft por adsorção usando carvão ativado e argila**. Hydro (São Paulo**), v. 1, p. 26-31, 2016.

HOSSEINI, S. S.; ROOSTA, M. Comparative study of modified clays and activated carbons for the removal of organic matter from industrial effluents. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 15, p. 19200-19215, 2021.

KGOMO, H.; DUBE, S.; NINDI, M. M. Evaluating the Performance of Ball-Milled Silk Fibroin Films for Simultaneous Adsorption of Eight Pharmaceuticals from Water**. International journal of environmental research and public health,** v. 19, n. 22, p. 14922, 2022. DOI: 10.3390/ijerph192214922. Disponível. Acesso em: 19 abr. 2026.

LI, J. et al**.** High-Surface-area activated carbons derived from biomass for efficient adsorption of organic pollutants. **Journal of Hazardous Materials,** v. 385, p. 121520, 2020.

MACHADO, E. P.; XAVIER; C. R.; AZEVEDO, J. C. R. Avanços na caracterização de compostos específicos encontrados no efluente de celulose kraft pós-tratamento em sistemas aerados. In: **SUSTENTARE: Workshop Internacional Sobre Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos (WIPIS)**, São Carlos, SP, 2022.

MOURA, F. P. et al. Tratamento avançado de efluentes de celulose: uma revisão sobre processos oxidativos e adsorção. **Química Nova**, v. 46, n. 4, p. 382-395, 2023.

OLIVEIRA, R. S.; SANTOS, J. P**.** Reaproveitamento de resíduos industriais em materiais cerâmicos: uma revisão sistemática**. Ambiente Construído,** Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 301-322, abr./jun. 2021.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of and paper Mill wastewater-a review. **Science of the Total Environment**, v. 333, p. 37-58, 2004.

RIBEIRO, R. A. U. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal – mecânicos**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

SANTOS, A. S. et al. Caracterização físico-química e toxicidade de efluentes de branqueamento de celulose *Kraft* submetidos a processos de adsorção. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 6, n. 2, p. 115-128, 2021.

SILVA, V. A. et al**.** Adsorção de poluentes orgânicos em efluentes industriais utilizando carvão ativado de resíduos agrícolas: Cinética e Isotermas. **Brazilian Journal of Development,** Curitiba, v. 7, n. 4, p. 34567-34589, 2021.

SIMPLÍCIO, A.; AZEVEDO J. C. R.; XAVIER C. **Tratabilidade aeróbica de produtos de degradação de lignina de efluentes de celulose *kraft* através da respirometria**. In: ABTCP-Zellcheming - 40º Congresso e exposição internacional de celulose e papel, São Paulo-SP. 2007.

SOUZA, M. T.; ALKAYAL, M. F.; AL-QASIMI, M. S.; RECH, G. L.; LOPES, A. N. M.; REZENDE, M. C**.** Clay-based ceramics as a sustainable alternative for industrial waste management: A review**. Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127763, 2021.

UDDIN, M. K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. **Chemical Engineering Journal,** v. 308, p. 438-462, 2017.

WANG, J.; CHEN, X. Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, and application**. Chemosphere**, v. 258, p. 127279, 2020.

YI, H. et al. Development of sustainable clay-based ceramics: Adsorption and immobilization of pollutants. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121815, 2020.

ZHU, J. et al. Pozzolanic activity of industrial waste ashes in cement-based materials: A comprehensive review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, p. 105387, 2021.

AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DE MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA RECONDICIONADAS POR TRATAMENTO QUÍMICO OXIDATIVO PARA OBTENÇÃO DE MEMBRANAS DE ULTRA E NANOFILTRAÇÃO

1 Márcia Verena Mota Simões Borges, 2 Andrea Limoeiro Carvalho, 3 Gemima Santos Arcanjo, 4 Elaine Christine de Magalhães Cabral-Albuquerque

1 Universidade Federal da Bahia, e-mail: marciaverenamsborges@outlook.com; 2 Universidade Federal da Bahia, e-mail: andreacarvalho@ufba.br; 3 Universidade Federal da Bahia, e-mail: gemima.arcanjo@ufba.br; 4 Universidade Federal da Bahia, e-mail: elainecmca@ufba.br.

Palavras-chave: Membranas, osmose reversa, tratamento oxidativo.

Resumo

A tecnologia de separação por membranas tem sido amplamente aplicada no tratamento de águas residuais industriais devido à sua relação custo-benefício, ao caráter ecologicamente favorável e à capacidade de recuperação de recursos. Entre os diferentes tipos, destacam-se as membranas de ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR), sendo esta última amplamente utilizada em aplicações industriais consolidadas. No entanto, membranas de poliamida utilizadas em OR apresentam limitações associadas ao *fouling* e à degradação ao longo do tempo, resultando em grande descarte de material. Como alternativa, a reciclagem por conversão química via tratamento oxidativo tem sido estudada para recondicionamento de membranas em fim de vida útil, promovendo a degradação controlada da camada seletiva e possibilitando sua conversão em membranas de UF ou NF. Neste estudo, avaliou-se o efeito de dois agentes oxidantes, hipoclorito de sódio (NaClO) e permanganato de potássio ($KMnO_4$), por meio de delineamento fatorial completo, considerando concentração e tempo de exposição, além de pH para $KMnO_4$, sobre a permeabilidade hidráulica das membranas. Os resultados indicaram que o tratamento com NaClO apresentou maiores valores de permeabilidade, com destaque para condições de baixa concentração e alto tempo de exposição, de intensidade de contato (≈180.000–500.000 ppm·h), nas quais se observou uma região de maior permeabilidade. O comportamento do processo mostrou-se não linear, sendo fortemente influenciado pela interação entre a concentração de agente oxidante e o tempo de contato, além do efeito inverso da concentração. Para o $KMnO_4$, a permeabilidade apresentou valores inferiores aos obtidos com NaClO, sendo fortemente dependente do pH do meio. Condições ácidas favoreceram maior eficiência do processo oxidativo, resultando em maiores permeabilidades, enquanto em pH próximo à neutralidade houve redução do desempenho. O pH foi identificado como o fator mais influente, com menor contribuição relativa da concentração e do tempo. Além disso, o tratamento com $KMnO_4$ promoveu uma oxidação mais moderada, sem a formação de uma região ótima tão definida quanto no NaClO. De modo geral, ambos os tratamentos apresentaram bons coeficientes de determinação (R^2), indicando confiabilidade nos resultados experimentais. As membranas tratadas com NaClO apresentaram permeabilidade predominantemente na faixa de UF, enquanto as tratadas com $KMnO_4$ apresentaram comportamento mais variável, situando-se entre UF e NF.

Introdução

A tecnologia de separação por membrana é uma tecnologia que tem sido extensivamente estudada e explorada devido à sua relação custo-benefício, ferramentas ecologicamente corretas e alta produtividade, não apenas para atingir os padrões de descarga de permeado, mas também para a recuperação de recursos valiosos. Os materiais das membranas são versáteis e podem ser classificados a partir de muitos aspectos do material da membrana, como por exemplo, por pressão, podendo ser classificadas como microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose reversa/inversa (OR), osmose direta (OD) e eletrodiálise (Liu *et al.*, 2019).

Membranas de UF são amplamente utilizadas em processos de tratamento de água devido à sua necessidade de baixa energia e pressão, possibilidade de operar à temperatura ambiente e ampla faixa de estabilidade química, filtrando espécies de 2 a 50 nm, suportando uma pressão de operação de 5 a 10 bar. As membranas NF, por sua vez, podem filtrar espécies na faixa de 0,001–0,01 μm, suportando uma pressão de operação de 10 a 20 bar, sendo um método econômico e eficaz para a purificação de alguns compostos, remoção da maioria dos vírus, moléculas orgânicas, íons bivalentes e uma variedade de sais, portanto é comumente usada para amornar água dura (Liu *et al.*, 2019).

A osmose OR tem muitas aplicações industriais consolidadas, como tratamento de água, de efluentes, para concentração, separação e recuperação de correntes. Devido à maturidade do processo para dessalinização, a OR implica em custos de investimentos inferiores comparados a outras tecnologias, bem como menor prazo para construção das instalações e um incremento da capacidade da unidade relativamente fácil, com confiabilidade e eficiência energética (Paula; Gomes; Amaral, 2017; Putri *et al.*, 2025).

O surgimento da nanotecnologia na ciência de materiais para membranas pode oferecer uma alternativa atraente aos materiais poliméricos, entre elas as poliamidas (PAS), as quais são geralmente fabricadas pela condensação de ácidos dicarboxílicos com poliaminas, incluindo poliaminas alifáticas e semi-aromáticas com grupos amino (Lee, Arnot e Mattia, 2011).

Membranas de PAS apresentam capacidades de adsorção muito altas para cargas fracas e são altamente hidrofílicas, mas a estrutura é limitada pela baixa porosidade e embora possam resistir à fadiga e à abrasão, são intolerantes em condições extremas de pH baixo e alto (Liu *et al.,* 2019).

Apesar das inúmeras vantagens da membrana filtração tangencial de poliamida, uma das suas limitações é a propensão à incrustação, também chamada de *fouling*, e consequente perda de rendimento. O *fouling* é o acúmulo indesejado de materiais (substâncias inorgânicas, orgânicas ou organismos vivos) na superfície das membranas. Devido à alta pressão aplicada os contaminantes são fortemente compactados contra a superfície da membrana, formando uma camada densa (Liu *et al*., 2019; Putri *et al*., 2025). Mas a exposição prolongada a agentes oxidantes, operação em alta pressão, dentre outros fatores também afetam a vida útil da membrana gerando uma quantidade alarmante de resíduo. Segundo Paula, Gomes e Amaral (2017), a massa de membranas anualmente dispostas no mundo chegou a 12.000 toneladas (equivalente a 27.000 m^3) em 2015, demostrando um eminente problema. Portanto, o recondicionamento de membranas de OR em fim de vida útil apresenta uma abordagem estratégica não apenas para reduzir o desperdício, mas também para estender a utilidade da membrana além de seu ciclo de vida primário.

Assim, foram explorados estudos estratégicos para o gerenciamento de membranas de OR em fim de vida útil. Para além dos tratamentos convencionais uma técnica muito estudada atualmente é a conversão química de membranas via tratamento oxidativo, pois devido à natureza da membrana de filtração tangencial usada nos processos de OR e à estrutura da camada de suporte, alguns estudos indicam que é possível converter a membrana de OR em uma membrana porosa, mediante a degradação da camada densa de poliamida. A conversão química via tratamento oxidativo, mantendo a integridade física do módulo espiral, é considerada um recondicionamento. A membrana convertida, resultante do ataque por agentes oxidantes fortes, apresenta desempenhos hidráulicos e de rejeição salina que são comparáveis às membranas de UF comercialmente disponíveis. As possíveis aplicações de membranas recondicionadas por conversão química, dependendo das suas características de desempenho e de propriedades físico-químicas, encontram-se dentro do contexto das membranas de baixa pressão (Paula; Gomes; Amaral, 2017; Putri et al., 2025).

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicação de dois tratamentos oxidativos controlados em membranas de osmose inversa (OR) em fim de vida útil, visando sua recuperação e revalorização. Para isso, foram utilizados como agentes oxidantes o hipoclorito de sódio (NaClO) e o permanganato de potássio ($KMnO_4$), com o intuito de promover a degradação controlada da camada ativa de poliamida e, consequentemente, possibilitar a conversão dessas membranas em membranas de ultrafiltração (UF) ou nanofiltração (NF). Os agentes oxidantes foram escolhidos devido à sua eficácia em degradar a camada ativa PA das membranas, por apresentarem maior permeabilidade e menores custos.

Material e Métodos

Foi realizado um delineamento fatorial completo para avaliar o efeito das variáveis concentração e tempo, tanto de hipoclorito quanto de permanganato, sobre a permeabilidade à água das membranas a recondicionadas. As membranas de OR em fim de vida útil foram imersas em soluções de agentes oxidantes, NaClO e $KMnO_4$ em diferentes concentrações, expostas em intervalos de tempos determinados. O pH foi monitorado no tratamento com $KMnO_4$, conforme apresentado na Tabela 01.

Variáveis Dependentes	NaClO			$KMnO_4$		
Codificação	-1	0	+1	-1	0	+1
Concentração (g/L)	20	60	100	0,5	1,0	1,5
Tempo (h) de exposição	2	6	10	48	228	408
pH	-	-	-	4	5,5	7

Tabela 01: Codificação e valores das variáveis dependentes do planejamento fatorial completo utilizado para sua influência na permeabilidade (variável independente) de membranas recondicionadas.
Fonte: Autoral (2026)

A permeabilidade a 25 °C das membranas foi determinada de acordo metodologia descrita por Paula, Gomes e Amaral (2017) em uma unidade de bancada, no Laboratório de Tratamento de Águas e Efluentes por Membranas (LabTrEM) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal da Bahia (UFBA), como esquematizado na Figura 01.

O ensaio de permeabilidade iniciou-se com a lavagem do sistema com água deionizada em seguida foi realizada a compactação das membranas também com água deionizada em recirculação por 30 min à pressão de 13 bar. Ao fim desse período, as aferições da pressão foram realizadas em triplicata, com intervalos de 3 minutos entre as medições, foi coletado o volume de permeado durante 1 minuto em cada aferição, nas pressões de 12, 10, 7, 4 e 2. No decorrer dos ensaios, a temperatura da solução de alimentação/concentrado variou, assim, a cada 10 coletas de permeado a água do sistema era trocada. A Equação 01 foi utilizada para calcular a vazão e a Equação 02 o fluxo de permeado, a média do valor dos fluxos para cada pressão foi obtida e montou-se uma curva da média dos fluxos em relação a pressão correspondente. Em seguida, obteve-se a permeabilidade da membrana, em $L/m^2 \cdot h \cdot bar$, a partir do coeficiente angular da regressão dos dados dos fluxos x pressão de operação.

$$V = \frac{v}{t} \qquad (01)$$

Onde: *V* é vazão (L/h), *v* o volume (L) e *t* o tempo (h).

$$FluxPerm = \frac{V}{A} \qquad (02)$$

Onde: *FluxPerm* é o fluxo do permeado (L/m²·h), *V* a vazão e *A* a área da membrana (m²).



Figura 01: Esquema da metodologia aplicada ao processo químico de recondicionamento de membranas de OR. Fonte: Autoral (2026)

Resultados e Discussão

Os resultados de permeabilidade hidráulica das membranas de OR recondicionadas após cada tratamento químico são mostrados na Tabela 02.

	Membrana	Tratamento	ppm·h	Permeabilidade (L/m²·h·bar)	R²
NaClO	1	20g/L por 2h	42.000	8,3	0,997
	2	20g/L por 10h	210.000	38,1	0,996
	3	100g/L por 2h	220.000	34,4	0,999
	4	100g/L por 10h	1.100.000	27,6	0,999
	5	60g/L por 6h	366.000	31,1	1,000
	6	60g/L por 6h	366.000	25,3	0,999
	7	60g/L por 6h	366.000	29,7	0,998
$KMnO_4$	8	0,5g/L por 48h com pH 3,95	24.000	28,5	0,998
	9	0,5g/L por 48h com pH 7,04	24.000	9,29	0,998
	10	0,5g/L por 408h com pH 4,05	204.000	20,7	0,996
	11	0,5g/L por 408h com pH 7,04	204.000	16,2	0,997
	12	1,5g/L por 48h com pH 3,94	72.000	26,4	0,994
	13	1,5g/L por 48h com pH 7,08	72.000	20,9	0,998
	14	1,5g/L por 408h com pH 4,01	612.000	25,8	0,994
	15	1,5g/L por 408h com pH 6,90	612.000	24,4	0,995
	16	1,0g/L por 228h com pH 5,53	228.000	22,4	0,997
	17	1,0g/L por 228h com pH 5,53	228.000	21,3	0,993
	18	1,0g/L por 228h com pH 5,53	228.000	15,9	0,997

Tabela 02: Permeabilidade hidráulica média e respectivo R² após diferentes condições de tratamento químico. Fonte: Autoral (2026)

Tratamento da membrana com hipoclorito de sódio (NaClO)

Nos tratamentos com NaClO, houve uma degradação da camada seletiva, mas não tão intensa, parcialmente porosa, apresentando faixa de permeabilidade similar à de membranas de UF, exceto para o primeiro tratamento, o qual apresentou uma permeabilidade similar à das membranas de NF (Tabela 02). Os valores de coeficiente de determinação (R²), variando entre

0,997 e 1,0, indicam excelente ajuste linear entre o fluxo de permeado e a pressão aplicada, evidenciando comportamento hidráulico ideal das membranas e alta confiabilidade dos valores de permeabilidade obtidos.

Os tratamentos dois e três apresentaram os maiores valores de permeabilidade, 38,1 e 34,4 L/m²·h·bar, respectivamente, ambos com intensidade de contato próximas, 210.000 e 220.000 ppm·h, respectivamente, indicando que essa intensidade de contato foi a que mais degradou a camada de poliamida, sendo favorável para obtenção de membranas de UF. O tratamento um de intensidade de contanto de 42.000 ppm·h, alcançou uma permeabilidade de 8,3 L/m²·h·bar, valor baixo no geral, mas próximo tanto em permeabilidade quanto em intensidade de contato ao valor encontrado por Paula, Gomes e Amaral (2017), que em sua pesquisa desenvolveram uma série de experimentos alternando as variáveis, no qual o tratamento de NaClO 55 g/L, pH 11, por imersão em 0,58 h, de 31.900 ppm·h, obteve uma permeabilidade de 5,3 L/m²·h·bar.

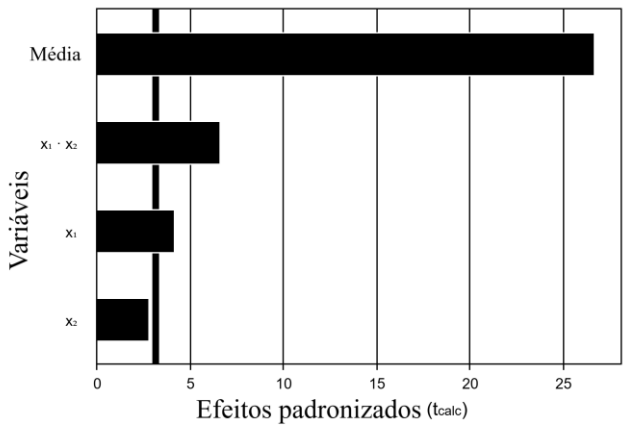
A Tabela 03 apresenta a tabela de análise de variância (ANOVA) do tratamento dos dados do recondicionamento com NaClO.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	528,0	3	176,0	23,3	0,01404
Resíduos	22,7	3	7,6		
Falta de ajuste	4,4	1	4,4	0,5	0,56039
Erro puro	18,3	2	9,2		
Total	550,7	6			
R^2	95,88%				

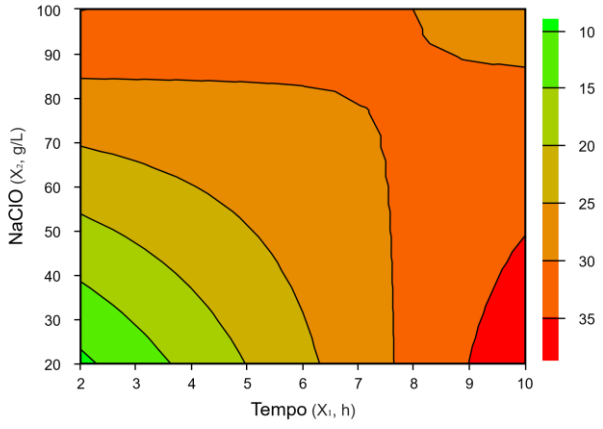
Tabela 03: Análise de variância ANOVA dos dados de recondicionamento com NaClO e respectivo R².
Fonte: Autoral (2026)

Além disso, a análise de variância (ANOVA) indica que o modelo de regressão obtido para o tratamento com NaClO é estatisticamente significativo, apresentando valor de p = 0,014 (< 0,05), o que confirma que as variáveis estudadas influenciam de forma relevante a permeabilidade. O alto coeficiente de determinação (R^2 = 95,88%) demonstra que o modelo explica a maior parte da variação dos dados experimentais. Além disso, a falta de ajuste não foi significativa (p = 0,560 > 0,05), indicando que o modelo se ajusta adequadamente aos dados, sem evidência de erro sistemático. Assim, o modelo pode ser considerado confiável para descrever o comportamento da resposta dentro da faixa experimental estudada.

A Figura 02 apresenta o gráfico de Pareto e as curvas de nível de superfície de resposta (RSM) da permeabilidade da membrana em função da concentração de NaClO e do tempo de exposição. Observando-se o gráfico de Pareto (Figura 02a), no qual verifica-se que o efeito da interação entre o tempo de exposição e concentração do oxidante foi significativo (p<0,05), indicando sua maior influência no tratamento oxidativo. Esse resultado está em concordância com a análise da curva de nível, na qual a variação dessas variáveis promove mudanças significativas na permeabilidade, evidenciando que combinações distintas de concentração e tempo podem resultar em respostas diferentes. Além da interação, observa-se também a influência do tempo, indicando que um maior tempo de exposição do agente oxidante leva a um aumento na permeabilidade.



(a)



(b)

Figura 02: Gráfico de Pareto (a) e curvas de nível da superfície de resposta (b) do tratamento oxidativo com NaClO.
Fonte: Autoral (2026)

Observa-se, ao analisar as curvas de nível (Figura 02b), uma região de maior oxidação localizada em valores de maior tempo de exposição, afetada pela interação com a concentração, sendo o maior desempenho com maior tempo e menor concentração. Nos níveis mais baixos de concentração e tempo, a permeabilidade é reduzida, o que pode ser associado à remoção

incompleta de incrustações e à baixa eficiência da ação oxidativa sobre a camada seletiva. À medida que se aumenta a intensidade do tratamento, há um aumento na permeabilidade, evidenciando a efetividade do NaClO no recondicionamento da membrana, pela abertura parcial da estrutura porosa.

Entretanto, o gráfico evidencia que o aumento contínuo da concentração não resulta em ganhos proporcionais de permeabilidade. Em regiões de maior intensidade de tratamento (tons alaranjados a vermelhos), observa-se uma tendência de estabilização ou até redução da permeabilidade em função do aumento da concentração. Esse comportamento reforça a natureza não linear do processo, pois a concentração se mostrou ser uma variável que ao passar de determinado tempo de exposição afeta a permeabilidade negativamente, no sentido de não favorecer mais o processo oxidativo. Dessa forma, a curva de nível confirma a existência de uma região de maior eficiência oxidativa, localizada aproximadamente na faixa de intensidade de contato entre 180.000 e 500.000 ppm·h.

Analisando de maneira conjunta a curva de nível e o gráfico de Pareto confirma que o tratamento com NaClO apresenta comportamento não linear e dependente das condições operacionais, concentração e tempo de exposição. Essa combinação de resultados reforça que o aumento da intensidade de contato (ppm·h) não garante, por si só, maior eficiência do processo, uma vez que fatores cinéticos e estruturais, associados à concentração e ao tempo de exposição, desempenham papel determinante na resposta da membrana. Esse comportamento reforça a necessidade de controle das condições de oxidação, para se promover o recondicionamento adequado para obtenção de membranas esperadas, seja de UF seja de NF, conforme o tratamento aplicado.

Lawler *et al.* (2013) havia indicado o NaClO como um poderoso oxidante da camada de poliamida de membranas de OR. Kang *et al.* (2007) investigou os mecanismos de ataque do cloro em membranas de poliamida e indicaram que ocorre a cloração do anel aromático por meio de duas vias possíveis de reação. Na sequência, segundo os autores, o cloro ataca as ligações de amidas nas regiões amorfas, com a quebra do polímero em cadeias menores, acarretando a queda no desempenho da camada seletiva da membrana.

Segundo Kang *et al.* (2007), os mecanismos n-cloração e rearranjo Orton são catalisados em meio ácido e o grupo cloro formado provoca um forte efeito indutivo de enfraquecimento da ligação amida tornando-a mais suscetível à hidrólise. O ambiente ácido é o mais favorável para a cloração do anel aromático pelo rearranjo Orton e para a conversão da amida N-H a N-Cl, enquanto o ambiente alcalino causa apenas a cloração dos grupos terminais amina reativos, sem danificar seriamente as ligações de hidrogênio entre as cadeias de polímeros.

Aguilar, Paula e Amaral (2023) em seu estudo alcançaram o valor de 3,82 L/m²·h·bar em uma membrana recondicionada com limpeza química (NaOH 0,1% e HCl 0,2%, ambos por 16 h) seguida por oxidação em cloro livre, com 4.464 ppm·h. Valor inferior ao do presente estudo, que com 42.000 ppm.h, obteve uma permeabilidade de 8,3 L/m²·h·bar.

No trabalho de Paula, Gomes e Amaral (2017) as maiores permeabilidades em NaClO foram obtidas ambos em pH 11, em 110 g/L, por imersão em 2,7 h, em 297.000 ppm·h, obtendo 80,9 L/m²·h·bar e em 55 g/L, por imersão em 5,4 h, em 297.000 ppm·h, obtendo 86,0 L/m²·h·bar. Nesse estudo, as maiores permeabilidades em NaClO foram obtidas nos tratamentos dois e três, com intensidade de contato de 210.000 e 220.000 ppm·h, apresentando 38,1 e 34,4 L/m²·h·bar, respectivamente.

Tratamento da membrana com permanganato de potássio ($KMnO_4$)

A exposição das membranas no tratamento com permanganato resultou em uma permeabilidade maior nas membranas em pH ácido comparado aos valores do mesmo tratamento em pH neutro. Apesar do maior valor de permeabilidade ser no tratamento com menor tempo de exposição e menor concentração, os tratamentos com alta concentração apresentaram, bom desempenho na oxidação, expresso através de altos valores de permeabilidade neste tratamento. Os valores de coeficiente de determinação (R^2), variaram entre 0,993 e 0,998, indicam excelente ajuste linear entre o fluxo de permeado e a pressão aplicada, com discretos desvios que não comprometem a confiabilidade dos resultados de permeabilidade hidráulica.

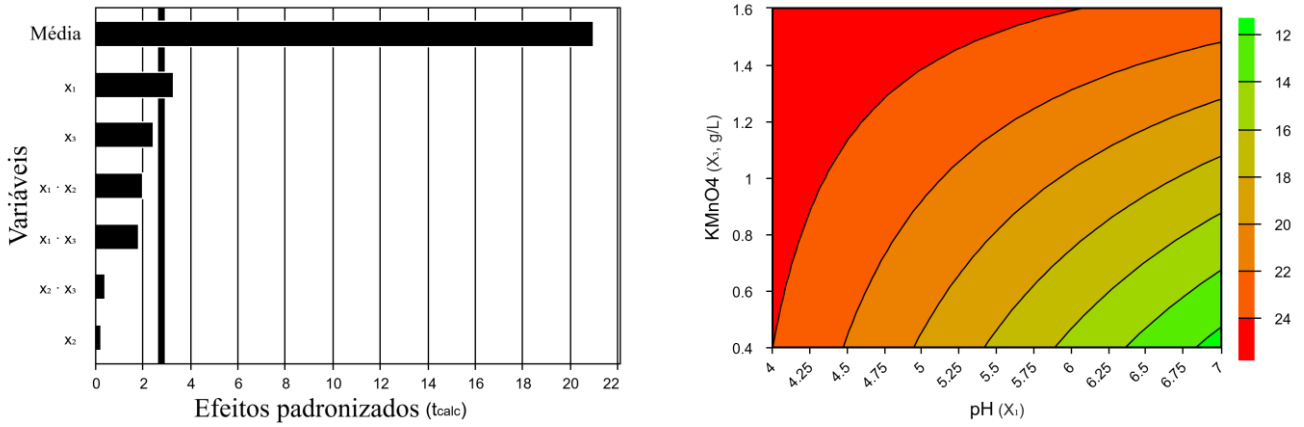
A tabela 04 apresenta a tabela de análise de variância (ANOVA) do tratamento dos dados do recondicionamento com $KMnO_4$.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	264,0	6	44,0	4,0	0,10131
Resíduos	44,3	4	11,1		
Falta de ajuste	20,1	2	10,0	0,8	0,54680
Erro puro	24,2	2	12,1		
Total	308,3	10			
R^2	85,64%				

Tabela 04: Análise de variância ANOVA dos dados de recondicionamento com $KMnO_4$ e respectivo R^2.
Fonte: Autoral (2026)

A ANOVA indica que o modelo de regressão obtido para o tratamento com $KMnO_4$ não é estatisticamente significativo ($p = 0,101 > 0,05$), ou seja, as variáveis consideradas, em conjunto, não influenciam a permeabilidade. Apesar disso, o R^2 de 85,64% sugere um bom ajuste da variação dos dados experimentais e a falta de ajuste não foi significativa ($p = 0,5468 > 0,05$), indicando que o modelo é adequado para descrever os dados experimentais, sem evidência de erro sistemático.

A Figura 03 apresenta o gráfico de Pareto e as curvas de nível de superfície de resposta (RSM), da permeabilidade da membrana em função da concentração de $KMnO_4$, do tempo de exposição e do pH.



(a) (b)

Figura 03: Gráfico de Pareto (a) e curvas de nível da superfície de resposta (b) do tratamento oxidativo com $KMnO_4$. Fonte: Autoral (2026)

O gráfico de Pareto (Figura 03a), evidencia que o fator mais importante no processo foi o pH, apresentando o maior efeito padronizado sobre a permeabilidade das membranas. Esse resultado indica que a acidez do meio exerce papel dominante na eficiência do tratamento oxidativo com $KMnO_4$. Os demais fatores, como concentração e tempo de exposição, não apresentaram efeitos significativos sobre a permeabilidade após a oxidação dentro das condições avaliadas.

A predominância do pH está associada ao maior potencial oxidante do permanganato em meio ácido, o que favorece a degradação da camada seletiva das membranas. Esse comportamento está em acordo com a literatura, que reporta maior reatividade do $KMnO_4$ em pH ácido. As interações entre os fatores apresentaram menor relevância, indicando que o efeito principal do pH é mais determinante do que as combinações entre variáveis no intervalo estudado. A literatura reporta que mantidas as demais condições, o desempenho da permeabilidade foi maior na solução menos concentrada, em ambientes neutro e alcalino, mantidas as demais condições, os resultados de permeabilidade obtidos foram bastante próximos (Paula; Gomes; Amaral, 2017).

Ao se analisar as curvas de nível para esta resposta (Figura 03b) observa-se a forte dependência do pH, com a região de maior permeabilidade localizada em condições mais ácidas, indicando maior eficiência do $KMnO_4$ como agente oxidante nessas condições. À medida que o pH se aproxima da neutralidade, há uma redução progressiva da permeabilidade, sugerindo diminuição da reatividade do oxidante e, consequentemente, menor impacto sobre a estrutura da membrana. As curvas também evidenciam que, mesmo em condições de maior intensidade de contato, não há formação de uma região de desempenho máximo tão pronunciada quanto no NaClO, sugerindo que o $KMnO_4$ promove uma oxidação mais moderada e menos agressiva à estrutura polimérica.

A análise conjunta do gráfico de Pareto e da curva de nível evidencia a concordância entre a significância estatística dos fatores e o comportamento experimental do sistema. O gráfico de Pareto indica o pH como o fator de maior influência sobre a permeabilidade das membranas, resultado que é corroborado pelas curvas de nível, nas quais se observa um gradiente bem definido de aumento da permeabilidade associado às condições de maior acidez. Dessa forma, os resultados indicam que a otimização do tratamento deve priorizar o controle do pH e em seguida concentração da solução, enquanto o tempo pode ser ajustado para maximizar o desempenho sem comprometer a integridade da membrana.

Os valores de permeabilidade nos tratamentos de permanganato em pH ácido ficaram dentro da faixa de 20,7 a 28,5 L/m².h.bar, seja com 1,5 g/L seja com 0,5 g/L, a exposição ao pH ácido resultou em uma maior permeabilidade nas membranas do que em pH neutro. Os tratamentos que resultaram em maior permeabilidade foram o 8 e o 12, cujas condições de acidez aliado a um menor tempo de exposição foram comuns, mostrando o efeito do pH. Os tratamentos 14 e 15 também tiveram alta permeabilidade, indicando o grande efeito da intensidade de contato. No geral, esse tratamento atingiu uma faixa de permeabilidade de 9,29 a 28,5 L/m²·h·bar, indicando recondicionamento a membranas de UF e NF.

Após o tratamento oxidativo das membranas com $KMnO_4$, observou-se sobre a superfície das mesmas uma coloração marrom, que foi identificada como a formação de uma camada de dióxido de manganês (MnO_2), fenômeno já relatado por Ambrosi e Tessaro (2013). Nesse caso, foi necessário a lavagem com água ultrapura e arraste com algodão sob a água para remoção do material depositado, ao menos parcialmente, conforme observado pelo considerável clareamento da superfície das amostras. Elas apresentaram coloração marrom mais intensa, conforme maior concentração, indicando maior presença de MnO_2.

Ambrosi e Tessaro (2013) e Paula, Gomes e Amaral (2017) destacam a importância da limpeza química ácida por imersão das membranas em solução de ácido cítrico 0,2% (pH 2,5) após o tratamento oxidativo com $KMnO_4$, pois ensaios de permeabilidade revelaram um aumento médio da permeabilidade em 3,4 ± 0,5 vezes (~240%) em relação aos resultados obtidos sem a limpeza.

Em seus estudos com $KMnO_4$, Paula, Gomes e Amaral (2017) alcançaram a maior permeabilidade em pH 4, com concentração de 0,9 g/L por imersão durante 333 h e 299.700 ppm·h, de 68,1 L/m²·h·bar. Ainda nesse mesmo estudo, uma intensidade de contato de 299.700 ppm·h, na concentração de 0,9 g/L por 333h, em pH 6,5 obteve 45,8 L/m²·h·bar e em pH 10, 43,1 L/m²·h·bar. Obteve-se ainda a permeabilidade de 45,4 L/m²·h·bar, nas condições de pH 7, 45 g/L por imersão durante 6,67 h e 300.150 ppm·h.

No presente estudo, a intensidade de contato dos tratamentos intermediários 16, 17 e 18, foram próximos aos relatados acima, de 228.000 ppm·h, que apresentaram valores intermediários de permeabilidade, 22,4, 21,3 e 15,9 L/m²·h·bar, respectivamente, valores intermediários de permeabilidade, pois nesse estudo, as maiores permeabilidades em $KMnO_4$ foram obtidas nos tratamentos 8, 12 e 14, com intensidade de contato de 24.000, 72.000 e 612.000 ppm·h, apresentando 28,5, 26,4 e 25,8 L/m²·h·bar, respectivamente. Esses valores foram inferiores em comparação ao resultado de Paula, Gomes e Amaral (2017), mesmo com intensidade de contato próxima, corroborando que a variável pH é determinante no processo, principalmente devido a variabilidade apresentada.

Comparação entre os tratamentos químicos

Nos pontos médios do NaClO, a permeabilidade variou de 25,3 a 31,1 L/m²·h·bar, sem diferença significativa entre si, mas diferiram do tratamento com o $KMnO_4$ de acordo com o teste de médias de Tukey ($p < 0,05$), cujos pontos médios, variaram de 15,9 a 22,4 L/m²·h·bar, sem diferença significativa entre si ($p > 0,05$) (Tabela 02). De maneira geral, os agentes oxidantes NaClO e $KMnO_4$ mostraram-se eficientes para o recondicionamento das membranas de OR descartadas. O tratamento por imersão em NaClO resultou em uma permeabilidade um pouco maior que o tratamento por imersão em $KMnO_4$. Em estudos com NaOH, NaClO, H_2O_2 e $KMnO_4$, o NaClO e $KMnO_4$ foram os agentes de oxidação que revelaram os aumentos mais expressivos de permeabilidade, além de também favorecer a estabilidade de pH durante os tratamentos oxidativos (Paula; Gomes; Amaral, 2017). Pesquisas indicam que o $KMnO_4$ em pH ácido é um oxidante muito agressivo; no entanto, o NaClO tende a degradar de forma mais destrutiva a camada PA, o que reduz a seletividade das membranas. De modo geral, os resultados indicam que os protocolos utilizando o NaClO, apresentaram membranas na faixa de UF, enquanto os tratamentos com $KMnO_4$ mostraram maior variabilidade e menor previsibilidade de desempenho e apresentaram membranas na faixa de UF e NF.

A análise dos gráficos de curvas de nível e de Pareto para os tratamentos com NaClO e $KMnO_4$ evidencia comportamentos distintos dos agentes oxidantes, indicando diferentes mecanismos de atuação sobre a camada seletiva das membranas. Comparativamente, os resultados indicam que o NaClO promove uma oxidação mais agressiva e dependente da intensidade de contato, resultando em maiores valores de permeabilidade. Por outro lado, o $KMnO_4$ apresenta uma ação mais moderada e fortemente dependente do pH, proporcionando ganhos de permeabilidade mais controlados.

Considerações Finais

Os resultados demonstram que os tratamentos oxidativos com NaClO e $KMnO_4$ são eficazes para a reciclagem de membranas de osmose reversa em fim de vida útil, promovendo aumento da permeabilidade e possibilitando sua conversão em membranas de baixa pressão. Os dois agentes oxidantes apresentam regimes distintos de atuação: enquanto o NaClO é governado predominantemente pela intensidade do tratamento (concentração e tempo), o $KMnO_4$ é controlado principalmente pelas condições químicas do meio, especialmente o pH. Essa diferença deve ser considerada na definição de estratégias de recondicionamento de membranas, visando otimizar o desempenho hidráulico sem comprometer a integridade estrutural do material. Nas condições abrangidas nesse estudo, o tratamento com o hipoclorito resultou em membranas de UF e o tratamento com permanganato resultou em membranas tanto de UF quanto de NF. Dessa forma, os dois agentes apresentam mecanismos distintos de atuação, influenciando diretamente o desempenho e as características das membranas recondicionadas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela bolsa de estudos, a CAPES e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo financiamento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

AGUILAR, D. C. B. de; PAULA, E. C. de; AMARAL, M. C. S. Recycled membrane for drinking water treatment with high iron and manganese concentrations. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 11, n. 5, p. 110466, out. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.110466.

AMBROSI, A.; TESSARO, I.C. Study on potassium permanganate chemical treatment of discarded reverse osmosis membranes aiming their reuse. Separation Science and Technology, v. 48, p. 1537–1543, 2013. DOI: https://doi.org/10.1080/01496395.2012.745876.

LAWLER, W.; ANTONY, A.; CRAN, M.; DUKE, M.; LESLIE, G.; LE-CLECH, P. Production and characterization of UF membranes by chemical conversion of used RO membranes. Journal of Membrane Science, v. 447, p. 203–211, 2013. Disponível: https://vuir.vu.edu.au/24448/1/FD3AAF48.pdf.

LIU, L.; LUO, X.B.; DING, L.; LUO, S.L. Nanomaterials for the removal of pollutants and resource reutilization. Micro and Nano Technologies, p. 83-147, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814837-2.00004-4.

LEE, K. P.; ARNOT, T. C.; MATTIAA, D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination – Development to date and future potential. Journal of Membrane Science, v. 370, Issues 1–2, p. 1-22, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.12.036.

PUTRI, RR D.; SUSANTO, H.; SETIAWAN, L.; CHRISTWARDANA, M.; WIDIASA, N. Recycling end-of-life brackish water reverse osmosis membranes: Oxidative conservation, characterisation, and performance validation. Desalination and Water Treatment, v. 323, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101359.

KANG, G.-D.; GAO, C.-J.; CHEN, W.-D.; JIE, X.-M.; CAO, Y.-M.; YUAN, Q. Study on hypochlorite degradation of aromatic polyamide reverse osmosis membrane. Journal of Membrane Science, v. 300, p. 165–171, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.05.025.

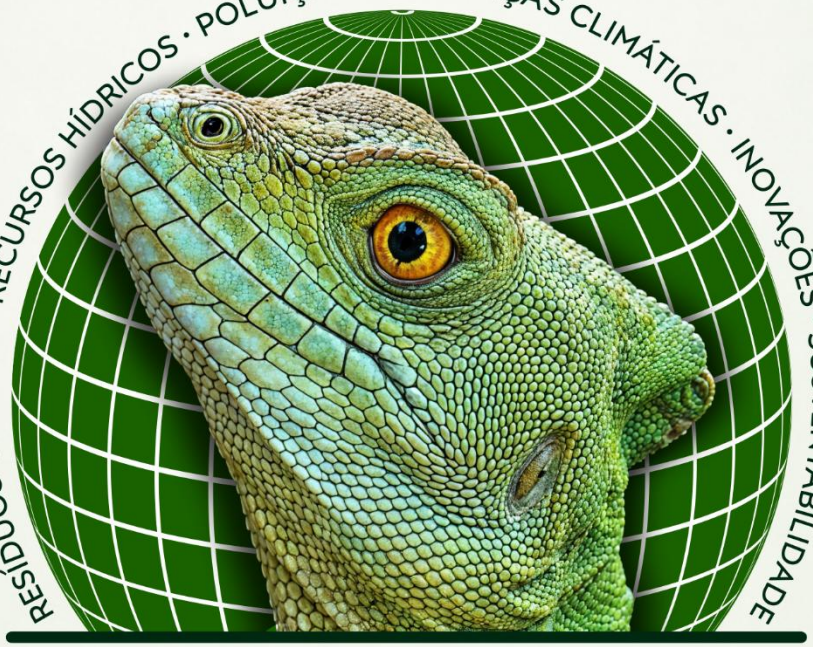
PAULA, E. C. de; GOMES, J. C. L.; AMARAL, M. C. S. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes by oxidative treatment: a technical evaluation. Water Science and Technology, v. 76, n. 3, p. 605–622, jul. 2017. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2017.238.

RICCI, B. C.; ARCANJO, G. S.; MOREIRA, V. R.; LEBRON, Y. A. R.; KOCH, K.; COSTA, F. C. R.; FERREIRA, B. P.; LISBOA, F. L. C.; MIRANDA, L. D.; FARIA, C. V. de; LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. A novel submerged anaerobic osmotic membrane bioreactor coupled to membrane distillation for water reclamation from municipal wastewater. Chemical Engineering Journal, v. 414, p. 128645, jun. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128645.

WHO. Safe Drinking-water from Desalination. World Health Organization, Geneva, 2011. Disponível em:<http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/desalination__guidance_en.pdf.

ÁREA TEMÁTICA 33

SANEAMENTO: PLANEJAMENTO, POLÍTICAS PÚBLICAS E LEGISLAÇÃO



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

O PAPEL DA REGULAÇÃO NA IMPLEMENTAÇÃO DOS DIREITOS HUMANOS À ÁGUA E AO SANEAMENTO NO BRASIL: DESAFIOS E PERSPECTIVAS A PARTIR DO CONTEXTO DA COVID-19

1 Davi Madureira Victral; 2 Léo Heller

[1] *Instituto René Rachou, Fiocruz Minas, davi.victral@live.com;* [2] *Instituto René Rachou, Fiocruz Minas, leo.heller@fiocruz.br*

Palavras-chave: Direitos humanos à água e ao saneamento; Regulação; Políticas Públicas

Resumo

A pandemia de Covid-19 trouxe à tona os déficits históricos do saneamento básico no Brasil e evidenciou a centralidade da regulação como instrumento para garantir a efetivação dos direitos humanos à água e ao saneamento (DHAS). Este artigo discute o papel das entidades reguladoras na implementação dos DHAS, utilizando a pandemia como balizador de suas ações. Foram analisadas as respostas institucionais de cinco estados mais afetados nos primeiros 40 dias da pandemia, bem como as publicações de 25 entes reguladores estaduais nas 40 primeiras semanas epidemiológicas de 2020. Os resultados apontam que a regulação priorizou a sustentabilidade financeira dos prestadores de serviços em detrimento da proteção equitativa da população, com lacunas importantes na atenção a populações vulneráveis e ausência de medidas específicas voltadas ao esgotamento sanitário. Conclui-se pela necessidade de fortalecer os marcos regulatórios sob a ótica dos DHAS, de modo a universalizar o acesso, reduzir desigualdades e consolidar a regulação como instrumento de garantia de direitos.

Introdução

A pandemia da Covid-19 expôs de forma contundente as fragilidades na garantia dos direitos humanos em todo o mundo, incluindo o direito à saúde e os direitos humanos à água e ao saneamento (DHAS). Medidas como a garantia de acesso à água para higiene das mãos, a suspensão temporária de cortes de fornecimento por inadimplência e a não discriminação de populações em situação de vulnerabilidade foram amplamente discutidas e recomendadas por organismos internacionais e nacionais (HOSTMAELINGEN; BENTZEN, 2020; LOFTUS; SULTANA, 2020; SEKALALA et al., 2021; SPADARO, 2020; TOEBES; FORMAN; BARTOLINI, 2020; VICTRAL; HELLER, 2021). Relatórios de instituições como UNICEF e OMS reforçaram a necessidade de medidas emergenciais para mitigar os efeitos da crise sanitária, destacando déficits regionais de atendimento, barreiras de acessibilidade física e econômica e desigualdades no acesso (UNICEF, 2020; WHO, 2020a).

Os DHAS representam o reconhecimento da água e do esgotamento sanitário como elementos fundamentais para a dignidade humana e para a saúde pública (MURTHY, 2013). Esses direitos impõem aos Estados a obrigação de respeitar, proteger e cumprir, garantindo a universalização do acesso sem discriminação. No caso brasileiro, essa obrigação convoca diferentes atores estatais, entre os quais se destacam os entes reguladores do setor de saneamento. Situados na interface entre formuladores de políticas, prestadores de serviços e usuários, os reguladores dispõem de instrumentos normativos e de monitoramento que os colocam em posição privilegiada para avaliar se os DHAS estão sendo progressivamente implementados.

Parte-se, assim, da hipótese de que os entes reguladores são atores estratégicos na efetivação dos DHAS no Brasil. Para testá-la, este estudo utiliza a pandemia da Covid-19 como contexto empírico, investigando: (i) como os entes estaduais reguladores articularam suas respostas à pandemia sob a ótica dos DHAS; (ii) em que medida o arcabouço legal e regulatório federal e estadual incorporou os princípios e conteúdos normativos desses direitos; e (iii) se o conjunto das práticas regulatórias observadas favoreceu a construção de um ambiente regulatório positivo para sua implementação.

A análise articula referenciais de direitos humanos e teorias da regulação aplicadas ao setor de saneamento, discutindo suas conexões e tensões. A partir disso, busca-se compreender os limites e as potencialidades da regulação brasileira para alinhar políticas públicas de saneamento aos compromissos internacionais de direitos humanos, especialmente em contextos de crise sanitária.

Referencial Teórico

Direitos humanos à água e ao saneamento

Os Direitos humanos à água e ao saneamento (DHAS) derivam do reconhecimento de que o acesso à água potável e ao saneamento adequado são condições essenciais para a vida com dignidade, a saúde pública e o desenvolvimento sustentável. O Comentário Geral nº 15, elaborado pelo Comitê de Direitos Econômicos, Sociais e Culturais da ONU (OHCHR, 2002), consolidou a base jurídica desses direitos, definindo-os como obrigações estatais imediatas e progressivas, de acordo com os recursos disponíveis. Posteriormente, a Resolução A/RES/64/292 da Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU, 2010a) explicitou o direito humano à água e ao esgotamento sanitário como autônomo, essencial para a realização de outros direitos humanos, como saúde, moradia e alimentação. O conteúdo normativo desses direitos inclui a disponibilidade em quantidade suficiente, a qualidade e segurança da água, a acessibilidade física e financeira, a aceitabilidade cultural e a garantia de continuidade dos serviços.

Além dos elementos normativos, os DHAS também são orientados por princípios que reforçam sua dimensão política e social: equidade, não discriminação, participação e accountability (ROAF; DE ALBUQUERQUE; HELLER, 2018). Esses princípios determinam que os Estados devem priorizar populações em situação de vulnerabilidade e assegurar mecanismos de participação social e de transparência na tomada de decisão. No caso brasileiro, embora a Constituição Federal de 1988 assegure

direitos fundamentais à saúde e ao meio ambiente equilibrado, a incorporação explícita dos DHAS ainda é fragmentada e dispersa no ordenamento jurídico e regulatório. Assim, a efetivação prática desses direitos depende da atuação coordenada entre políticas públicas, regulação e mecanismos de governança capazes de enfrentar desigualdades históricas no acesso ao saneamento.

Regulação do saneamento no Brasil

A regulação do setor de saneamento no Brasil tem raízes na transição do modelo estatal provedor para o modelo de Estado regulador, especialmente a partir da década de 1990. Até então, a gestão do saneamento era fortemente centralizada nas companhias estaduais, criadas durante o Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) e vinculadas a financiamentos do Banco Nacional de Habitação (BNH). A Reforma Gerencial do Estado (1995) e a promulgação da Lei de Concessões (Lei nº 8.987/1995) introduziram novos arranjos contratuais e estimularam a necessidade de regulação independente para equilibrar os interesses entre prestadores privados, Estado e usuários (TOLEDO SILVA, 2003; MARINHO, 2006). Esse processo culminou na Lei nº 11.445/2007, que estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico e consolidou a regulação como função essencial para garantir a universalização, a eficiência e a modicidade tarifária dos serviços.

Mais recentemente, a Lei nº 14.026/2020, conhecida como novo marco legal do saneamento, reforçou o papel regulatório ao atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a competência de editar normas de referência para todo o país, buscando harmonizar e reduzir a heterogeneidade regulatória existente entre os entes subnacionais. A regulação no setor, portanto, passa a ter funções que vão além da esfera econômica, incluindo aspectos sociais e ambientais, como o monitoramento da qualidade da água, a definição de tarifas sociais e a garantia de continuidade dos serviços em situações de vulnerabilidade. Nesse sentido, os entes reguladores estaduais e municipais se posicionam como atores estratégicos na efetivação dos DHAS, na medida em que detêm instrumentos normativos, fiscalizatórios e sancionatórios que podem aproximar o setor de uma agenda de equidade, universalização e participação social.

Regulação e Direitos Humanos

A relação entre regulação e direitos humanos vem sendo cada vez mais reconhecida na literatura internacional e nos documentos das Nações Unidas. O Comentário Geral nº 15 (OHCHR, 2002) e a Resolução A/HRC/RES/15/9 (AGNU, 2010b) afirmam que os Estados não apenas devem reconhecer os DHAS, mas também criar mecanismos regulatórios capazes de garantir sua efetivação. A regulação, nesse sentido, não pode se limitar a corrigir falhas de mercado ou garantir eficiência econômica: ela deve assegurar que o conteúdo normativo dos direitos seja traduzido em políticas concretas. Isso implica incorporar às práticas regulatórias princípios como equidade, não discriminação, participação social e accountability, orientando decisões sobre tarifas, metas de universalização, mecanismos de subsídio e monitoramento da qualidade dos serviços.

No Brasil, a legislação recente tem reforçado esse papel ampliado da regulação. A Lei nº 14.026/2020, ao redefinir o marco regulatório do saneamento, atribui às agências reguladoras a missão de editar normas que conciliem objetivos técnicos, econômicos e sociais. Entretanto, a incorporação dos DHAS nesse processo ainda ocorre de forma fragmentada e pouco explícita. Muitas vezes, os reguladores priorizam a sustentabilidade financeira dos prestadores em detrimento da proteção de populações vulneráveis, revelando tensões entre a lógica de mercado e a agenda de direitos humanos (VICTRAL; HELLER, 2021). Assim, fortalecer a regulação como instrumento de promoção dos DHAS exige não apenas alterações normativas, mas também capacidade institucional, cultura organizacional orientada por direitos e maior participação democrática nos processos decisórios.

Metodologia

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e quantitativa, com base na análise documental e na técnica de análise de conteúdo (BARDIN, 2016). O objetivo central foi compreender de que maneira as respostas institucionais e regulatórias à pandemia de Covid-19, no Brasil, dialogaram com os princípios e conteúdos normativos dos DHAS.

Etapa 1 – Respostas institucionais à pandemia

A primeira etapa buscou analisar como os estados brasileiros mais afetados no início da pandemia articularam suas respostas institucionais relativas ao abastecimento de água e ao esgotamento sanitário. Para tanto, foram selecionados os cinco estados com maior número de casos confirmados por 100 mil habitantes nos primeiros 40 dias da crise(Tabela 1): Amapá, Roraima, Amazonas, Ceará e Maranhão. A escolha baseou-se em dados oficiais do Ministério da Saúde, considerando a intensidade da propagação inicial do vírus e sua relação com as fragilidades estruturais do saneamento nesses territórios.

Tabela 3 – Número de casos confirmados por 100.000 habitantes nos primeiros 40 dias da pandemia da Covid-19 nos cinco estados mais afetados no Brasil

Estado	Dia 0	Dia 40	Casos Confirmados	População (2019)	Casos Confirmados/100.000 hab.
Amapá	20/03/2020	29/04/2020	918	845.731	108,55
Roraima	22/03/2020	30/04/2020	519	605.761	85,68
Amazonas	15/03/2020	24/04/2020	2888	4.144.597	69,68
Ceará	17/03/2020	26/04/2020	5421	9.132.078	59,36
Maranhão	21/03/2020	30/04/2020	2804	7.075.181	39,63

Fonte: Adaptado dos dados coletados do site do Ministério da Saúde[2] (2020)

Foram examinados 363 documentos oficiais publicados nos sites governamentais durante o período delimitado, incluindo leis, decretos, notas técnicas e recomendações oriundas de diferentes instituições: gabinetes de governadores, assembleias legislativas, ministérios públicos estaduais, conselhos participativos de saúde, empresas estaduais de saneamento e autoridades regulatórias. O corpus documental foi sistematizado em um inventário e submetido à análise de conteúdo no software ATLAS.ti, permitindo a identificação de categorias temáticas relacionadas ao saneamento, à higiene e aos direitos humanos.

A análise priorizou identificar: (i) a temporalidade das respostas; (ii) o conteúdo normativo presente nos documentos; (iii) as lacunas no atendimento a populações vulneráveis. Essa etapa possibilitou avaliar como o discurso governamental e institucional incorporou, ou não, os princípios de equidade, universalização e não discriminação, essenciais para os DHAS.

Etapa 2 – Respostas regulatórias à pandemia

A segunda etapa concentrou-se especificamente nos 25 entes reguladores estaduais de saneamento existentes no Brasil. O recorte temporal compreendeu as 40 primeiras semanas epidemiológicas de 2020 (Figura 1), período correspondente ao avanço da primeira onda da pandemia e às primeiras respostas institucionais organizadas.

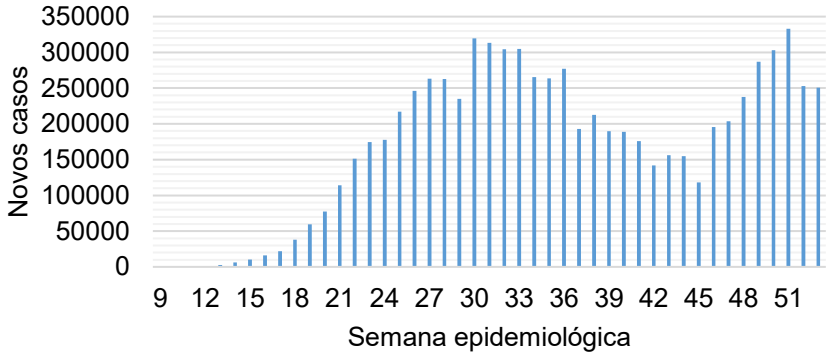


Figura 2 - Número de casos novos de contaminação pelo novo coronavírus por semana epidemiológica do ano de 2020 em todo o Brasil
Fonte: Elaborada pelo autor, adaptada de Ministério da Saúde (2021).

Foram inicialmente coletados 643 documentos publicados nos portais oficiais das agências reguladoras, dos quais 100 foram selecionados por apresentarem medidas diretamente relacionadas ao setor de saneamento no contexto da Covid-19 (Figura 2). Esses documentos incluíram resoluções, deliberações, notas técnicas e orientações dirigidas aos prestadores de serviços e à sociedade.

A análise foi conduzida em três dimensões:

1. Continuidade e segurança dos serviços: medidas para assegurar a operação e manutenção, evitando desabastecimentos.
2. Acessibilidade econômica e necessidades básicas: políticas de suspensão de cortes por inadimplência, flexibilização de tarifas e programas emergenciais de apoio.
3. Suporte financeiro aos prestadores: iniciativas de reequilíbrio econômico-financeiro de contratos e compensações tarifárias.

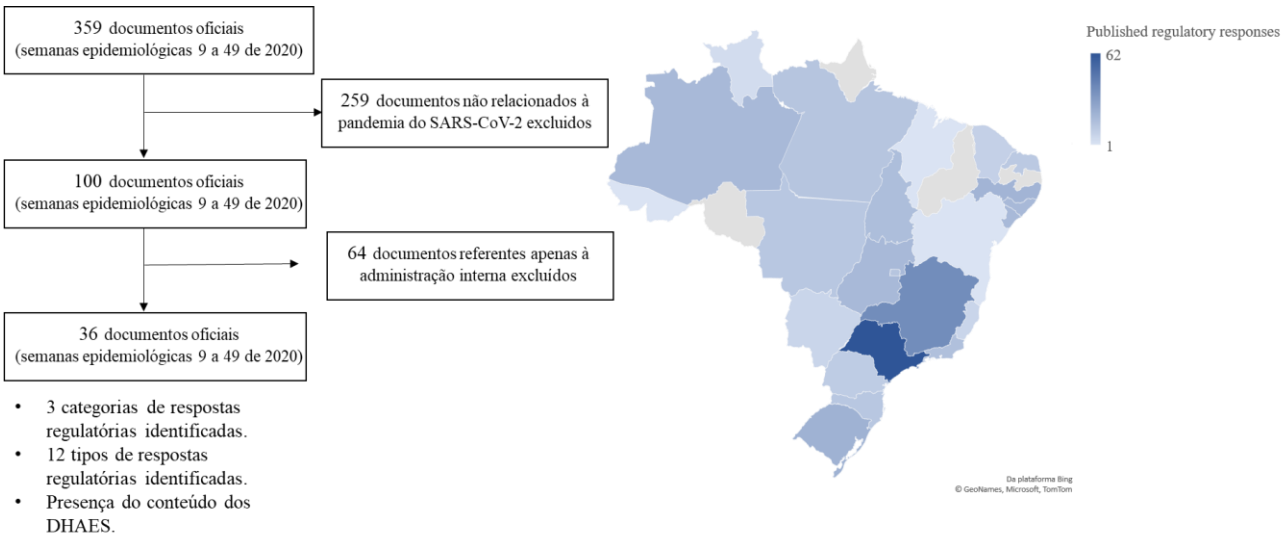


Figura 3 - Diagrama dos processos de seleção dos documentos selecionados
Fonte: Próprio autor (2020)

Cada documento foi codificado segundo categorias previamente estabelecidas em um livro de códigos elaborado a partir do conteúdo normativo e dos princípios dos DHAS. A confiabilidade da codificação foi aferida por meio de dupla leitura independente e índices de concordância (Krippendorff's Alpha > 0,5). Posteriormente, os dados foram processados em softwares ATLAS.ti e SPSS, permitindo análises de frequência, coocorrência e correlação entre as medidas regulatórias, os princípios dos DHAS e os grupos populacionais alvo.

Resultados e Discussão

Respostas institucionais nos estados

A análise das respostas institucionais dos estados revelou forte dependência de medidas emergenciais, sem articulação clara com os planos estaduais de saneamento. A suspensão temporária dos cortes por inadimplência, medida adotada em diversos estados, mostrou-se positiva, mas limitada, uma vez que não contemplou famílias que já viviam em situação de exclusão dos serviços formais. Como aponta Murthy (2013), os DHAS devem ser compreendidos como obrigações universais e não condicionadas, o que contrasta com a adoção de políticas restritivas e temporárias. A ausência de linguagem explícita de direitos nos documentos analisados reforça que a proteção dos usuários foi tratada como medida excepcional, e não como princípio estruturante da ação estatal.

Outro aspecto crítico refere-se às desigualdades regionais. Nos estados da Região Norte, a ausência de infraestrutura consolidada agravou a vulnerabilidade da população durante a pandemia, uma vez que grande parte dos domicílios não possuía ligação à rede de abastecimento e dependia de soluções individuais precárias (HELLER; CASTRO, 2007). Nesses contextos, a suspensão de cortes foi inócua, evidenciando um descompasso entre a formulação de medidas emergenciais e a realidade socioespacial dos serviços. Como destacam Neves-Silva e Heller (2016), as respostas estatais em saneamento tendem a reproduzir as desigualdades existentes, favorecendo territórios e grupos já integrados à rede de serviços em detrimento de comunidades marginalizadas.

Além disso, observou-se baixa articulação interinstitucional. Embora o setor de saúde tenha reiterado a importância da lavagem das mãos como medida fundamental de prevenção, as ações de saneamento não dialogaram suficientemente com as políticas de saúde pública, assistência social e habitação (ROAF; DE ALBUQUERQUE; HELLER, 2018). Essa fragmentação limitou a efetividade das medidas e demonstra que a proteção dos DHAS exige arranjos de governança mais integrados, que considerem a interdependência entre saúde, saneamento e direitos humanos. A pandemia, portanto, explicitou a necessidade de estratégias intersetoriais robustas para enfrentar crises sanitárias em países marcados por profundas desigualdades.

Em alguns estados, houve ainda a tentativa de adoção de medidas de caráter social, como isenções temporárias de tarifas para famílias beneficiárias de programas de transferência de renda. No entanto, essas iniciativas foram pontuais e sem mecanismos claros de monitoramento, o que reduziu seu alcance e efetividade. Como observa Victral e Heller (2021), a regulação e as respostas institucionais brasileiras à pandemia permaneceram centradas na lógica setorial e econômica, com limitada incorporação dos princípios de equidade e não discriminação. Isso reforça o desafio de alinhar as políticas públicas de saneamento à perspectiva de justiça social e à efetividade dos DHAS, especialmente em cenários de crise.

Respostas regulatórias dos entes estaduais

A análise das publicações de 25 entes reguladores estaduais mostrou que as medidas adotadas durante a pandemia estiveram fortemente orientadas à preservação da sustentabilidade econômico-financeira dos prestadores de serviços. Resoluções e notas técnicas frequentemente trataram de postergação de investimentos, flexibilização de prazos contratuais e recomposição tarifária futura, refletindo a preocupação dos reguladores em assegurar o equilíbrio econômico dos contratos de concessão. Essa ênfase evidencia a prevalência da lógica econômica sobre a lógica dos direitos, o que já havia sido apontado por Posner (1974) em sua teoria da regulação e reafirmado, no campo do saneamento, por Heller e Rezende (2008), ao argumentarem que o foco regulatório brasileiro tem se concentrado em questões tarifárias e de viabilidade financeira, em detrimento da universalização dos serviços.

Embora algumas agências tenham instituído medidas voltadas à proteção dos usuários, como a suspensão temporária de cortes por inadimplência ou a ampliação da tarifa social, tais medidas se mostraram pontuais e muitas vezes restritas a critérios rígidos de elegibilidade. Além disso, a ausência de coordenação nacional resultou em forte heterogeneidade regulatória entre os estados, reforçando a fragmentação institucional que já caracteriza o setor no Brasil (HELLER; CASTRO, 2007). Esse quadro indica que, apesar da Lei nº 14.026/2020 prever a harmonização regulatória pela ANA, o período da pandemia ainda refletia um cenário de dispersão normativa e ausência de padrões uniformes de proteção.

Outro ponto crítico foi a invisibilidade de populações vulneráveis e de temas historicamente negligenciados, como o esgotamento sanitário. Os documentos regulatórios analisados raramente mencionaram comunidades em favelas, áreas rurais ou territórios indígenas, reproduzindo o viés de atender prioritariamente os usuários já conectados à rede formal de abastecimento. Como ressaltam Neves-Silva e Heller (2016), a regulação precisa incorporar mecanismos explícitos de equidade e não discriminação para garantir que os serviços cheguem justamente a quem mais necessita. A pandemia demonstrou que, ao manter a regulação ancorada sobretudo na sustentabilidade financeira dos prestadores, o setor limita sua capacidade de se constituir em instrumento de garantia de direitos. Nesse sentido, Victral e Heller (2021) apontam que o contexto pandêmico escancarou tanto a relevância quanto as limitações da regulação, reforçando a necessidade de uma reorientação para os princípios dos DHAS.

Implicações para a implementação dos DHAS

Os resultados encontrados permitem afirmar que a pandemia de Covid-19 funcionou como um verdadeiro teste de estresse para a regulação do saneamento no Brasil, evidenciando tanto avanços pontuais quanto limitações estruturais. Se por um lado as agências reguladoras foram capazes de produzir respostas rápidas em um contexto emergencial, por outro, tais medidas revelaram uma orientação predominante para a manutenção da sustentabilidade financeira dos prestadores, em detrimento da proteção universal dos usuários. Como destacam Roaf, de Albuquerque e Heller (2018), a realização dos DHAS exige que os Estados assegurem, além da eficiência econômica, a equidade, a não discriminação e a accountability, elementos que apareceram de forma tímida nos documentos regulatórios analisados.

Um aspecto particularmente crítico é a invisibilidade de populações vulneráveis. Comunidades em favelas, ocupações urbanas, áreas rurais dispersas, assentamentos precários e povos indígenas raramente foram mencionados nos documentos regulatórios, apesar de serem os grupos mais afetados pela falta de acesso ao saneamento. Esse viés não é exclusivo do Brasil: estudos internacionais demonstram que, em contextos de privatização ou de forte orientação de mercado, a lógica regulatória tende a priorizar áreas de maior retorno econômico, marginalizando territórios de baixa rentabilidade (HALL; LOBINA, 2021). No caso brasileiro, essa seletividade contrasta com a obrigação de universalização estabelecida no marco legal (Lei nº 14.026/2020) e, sobretudo, com os compromissos internacionais assumidos pelo país em relação aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 6.

Outro ponto relevante refere-se à negligência do esgotamento sanitário. Enquanto medidas voltadas ao abastecimento de água — como a suspensão de cortes — receberam atenção, a coleta e o tratamento de esgoto praticamente não foram contemplados nas respostas institucionais e regulatórias. Esse desequilíbrio reproduz uma tendência histórica do setor, já apontada por Heller e Castro (2007), de priorizar o fornecimento de água em detrimento de soluções integrais de saneamento. No entanto, em um contexto de pandemia, no qual a prevenção de doenças transmissíveis depende diretamente de condições adequadas de saneamento, essa lacuna evidencia o quanto os DHAS ainda não são considerados em sua integralidade.

Portanto, as implicações para a implementação dos DHAS no Brasil são claras: a regulação precisa se reorientar para além da lógica econômico-financeira, incorporando de forma explícita os princípios e conteúdos normativos desses direitos em suas práticas cotidianas. Como defendem Neves-Silva e Heller (2016), o reconhecimento formal dos direitos não basta; é necessário criar mecanismos institucionais e regulatórios que garantam sua efetividade concreta, sobretudo para os grupos mais vulneráveis. A pandemia demonstrou que, sem essa mudança de paradigma, a universalização prevista até 2033 corre o risco de se materializar de forma desigual e excludente, comprometendo o caráter de direito humano essencial que a água e o esgotamento sanitário representam.

Comentários finais

A análise das respostas institucionais e regulatórias à pandemia da Covid-19 no Brasil evidencia que a regulação do saneamento desempenha um papel estratégico, mas ainda limitado, na efetivação dos DHAS. Durante a crise sanitária, as medidas adotadas pelos entes reguladores priorizaram, em grande parte, a sustentabilidade econômico-financeira dos prestadores de serviços, relegando a um segundo plano princípios fundamentais como equidade, não discriminação e participação social. A suspensão temporária de cortes por inadimplência e algumas iniciativas voltadas à tarifa social foram passos importantes, mas insuficientes para assegurar a proteção universal, especialmente das populações em maior situação de vulnerabilidade.

O estudo revelou também a persistência de uma lacuna histórica: o esgotamento sanitário permaneceu praticamente invisível nas respostas, apesar de sua relevância para a saúde pública em um contexto pandêmico. Essa omissão reforça a necessidade de repensar as prioridades do setor, que historicamente concentra esforços no abastecimento de água, mas não avança com a mesma intensidade na coleta e tratamento de esgoto.

Do ponto de vista institucional, a heterogeneidade das respostas regulatórias estaduais demonstra a ausência de um padrão normativo nacional consolidado, o que limita a efetividade da regulação como instrumento de garantia de direitos. A atuação recente da ANA, prevista na Lei nº 14.026/2020, representa uma oportunidade para harmonizar práticas, mas seu impacto dependerá da capacidade de incorporar explicitamente os DHAS às normas de referência e de induzir sua implementação nos âmbitos estadual e municipal.

Com base nesses achados, algumas recomendações emergem para o fortalecimento da regulação brasileira:

1. Incorporação explícita dos DHAS nos marcos legais e normativos, de modo que princípios como universalização, equidade e participação social orientem não apenas os objetivos setoriais, mas também os critérios de tomada de decisão regulatória.
2. Capacitação técnica e institucional das agências reguladoras, ampliando suas competências para lidar com a dimensão social dos serviços, e não apenas com a regulação tarifária e contratual.
3. Fortalecimento da participação social e da accountability, garantindo que os usuários, sobretudo os mais vulneráveis, tenham voz ativa na definição de prioridades regulatórias e no monitoramento das ações.
4. Integração intersetorial entre políticas de saneamento, saúde pública, habitação e meio ambiente, reconhecendo que a efetivação dos DHAS não se limita a soluções técnicas, mas envolve coordenação ampla das políticas sociais.
5. Prioridade ao esgotamento sanitário, com definição de metas específicas e mecanismos de indução regulatória, assegurando que essa dimensão do saneamento receba a devida atenção na agenda de universalização.

Conclui-se que a pandemia de Covid-19 evidenciou tanto a importância estratégica dos entes reguladores quanto suas limitações em operar como garantidores de direitos humanos. Para que o Brasil cumpra os compromissos da Agenda 2030 e avance rumo à universalização do saneamento até 2033, será indispensável consolidar uma regulação orientada por direitos, capaz de equilibrar os imperativos de eficiência econômica com a centralidade da dignidade humana.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo provimento de financiamento para esta pesquisa, bem como a Universidade Federal de Minas Gerais, por hospedar essa pesquisa em seu Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Referências Bibliográficas

AGNU. UN Special Rapporteur on the Human Rights to Water and Sanitation. Report of the Independent Expert on the Issue of Human Rights Obligations Related to Access to Safe Drinking Water and Sanitation, Catarina de Albuquerque (A/HRC/15/31). 2010. Available online: https://undocs.org/sp/A/HRC/15/31

AGNU. UN Special Rapporteur on the Human Rights to Water and Sanitation. Report of the Special Rapporteur on the Human Rights to Safe Drinking Water and Sanitation (A/HRC/36/45). 2017. Available online: https://undocs.org/sp/A/HRC/36/45

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. 1. ed. São Paulo: Edições 70, 2016. v. 1.

HOSTMAELINGEN, N.; BENTZEN, H. B. *How to operationalise human rights for COVID-19 measures*. *BMJ Global Health*. [S.l.]: BMJ Publishing Group. , 9 jul. 2020

LOFTUS, A.; SULTANA, F. Are we all in this together? COVID-19 and the Human Rights to Water and Sanitation. *Public Water and COVID-19*. [S.l: s.n.], 2020. v. 1. p. 49–60.

MARINHO, M. DO S. J. *Regulação dos Serviços de Saneamento no Brasil*. 2006. 1–230 f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MURTHY, S. L. The Human Right(s) to Water and Sanitation: History, Meaning, and the Controversy Over-Privatization. *Berkeley Journal of International Law*, v. 31, n. 1, p. 89–147, 2013.

OFFICE OF THE HIGH COMMISSIONER FOR HUMAN RIGHTS (OHCHR). *General Comment No. 15: The Right to Water (Arts. 11 and 12 of the Covenant)*. . Genebra: [s.n.], 2002.

ROAF, V.; DE ALBUQUERQUE, C.; HELLER, L. The human rights to water and sanitation: Challenges and implications for future priorities. *Equality in Water and Sanitation Services*, p. 26–45, 2018.

SEKALALA, S. *et al.* An intersectional human rights approach to prioritising access to COVID-19 vaccines. *BMJ Global Health*, v. 6, n. 2, p. 1–8, 2021.

SPADARO, A. COVID-19: Testing the Limits of Human Rights. *European Journal of Risk Regulation*, v. 11, n. March, p. 1–9, 2020.

TOEBES, B.; FORMAN, L.; BARTOLINI, G. Toward Human Rights-Consistent Responses to Health Emergencies: What Is the Overlap between Core Right to Health Obligations and Core International Health Regulation Capacities? *Health and human rights*, v. 22, n. 2, p. 99–111, 2020.

TOLEDO SILVA, Ricardo. Público e privado na oferta de infra-estrutura urbana no Brasil. In: Dossiê: serviços urbanos, cidade e cidadania. Disponível em: <http://www.usp.br/fau/ docentes/deptecnologia/r_toledo/3textos/index.html>. Acesso em: 21 maio 2003.

UNICEF. *One of the best defences against coronavirus*. Disponível em: <https://www.unicef.org/coronavirus/water-sanitation-one-of-best-defences-against-coronavirus>. Acesso em: 26 jul. 2020.

VICTRAL, D.; HELLER, L. The Human Rights to Water and Sanitation in Policy Responses to the COVID-19 Pandemic: An Analysis of Brazilian States. *Water*, v. 13, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13020228>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *COVID-19 Strategy Update*. . Geneva, Switzerland: [s.n.], 14 abr. 2020a. Disponível em: <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/covid-strategy-update-14april2020.pdf?sfvrsn=29da3ba0_19>. Acesso em: 22 jun. 2020.

OUTORGA COMO INSTRUMENTO DE GESTÃO HÍDRICA: ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS INTERNOS DE UMA COMPANHIA ESTADUAL DE SANEAMENTO

1 Rosangela Monteiro Gomes, 2 Elisabeth Laura Alves de Lima, 3 Odile Maria Cronemberger Sobral Chaves Arrais, 4 Giulia Mayana Lopes de Carvalho, 5 Nathália Bandeira Carvalho dos Santos

1 COMPESA, e-mail: rosangelamonteiro@compesa.com.br; 2 COMPESA, e-mail: elisabethlima@compesa.com.br; 3 COMPESA, e-mail: odilearrais@compesa.com.br; 4 COMPESA, e-mail: giuliacarvalho@compesa.com.br; 5 UFPE, e-mail: nathalia.bandeira@ufpe.br

Palavras-chave: Recursos Hídricos; Companhia de Saneamento; Pernambuco.

Resumo

A água, enquanto bem de domínio público e recurso natural finito, demanda instrumentos de gestão capazes de assegurar o uso racional e equitativo frente às múltiplas demandas existentes. No Brasil, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos constitui instrumento fundamental da Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/1997, sendo indispensável para a regularização das captações, construções de obras hídricas e dos lançamentos de efluentes associados aos serviços de saneamento básico. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo analisar a gestão dos procedimentos internos para obtenção das outorgas dos direitos de uso de recursos hídricos no âmbito da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), relacionando o marco legal, os procedimentos administrativos adotados e sua relevância para a universalização dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no estado de Pernambuco. A pesquisa adotou abordagem qualitativa, de caráter descritivo, fundamentada na análise documental. Foram realizadas revisões da legislação federal e estadual aplicável à temática, consultas aos portais institucionais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), bem como a análise de termos de outorga e documentos públicos disponibilizados pela COMPESA. Complementarmente, utilizaram-se dados obtidos por meio da Lei de Acesso à Informação, os quais foram sistematizados, tabulados e analisados. Os resultados evidenciaram que a COMPESA utiliza, no gerenciamento dos processos de outorga, os seguintes sistemas e plataformas: SEI, planilhas em Microsoft Excel, SIRH, Plataforma Águas Brasil e SIEGRH. No período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2025, foram concedidas 553 outorgas, com predominância da tipologia de captação de água superficial. Observou-se, ainda, maior interação institucional com a APAC, em comparação à ANA e à AESA. No que se refere aos custos financeiros, verificou-se investimento total de R$ 6.852.440,77 para a emissão de 52 outorgas junto à ANA, evidenciando impacto financeiro significativo nos processos de regularização em âmbito federal. Observou-se, ainda que, a gestão das outorgas representa elemento estratégico para a segurança jurídica, o planejamento operacional e a sustentabilidade dos sistemas de saneamento, destacando-se o papel da Gerência de Gestão Ambiental e do Núcleo de Outorgas na condução desses processos. Conclui-se que a efetivação das metas do Novo Marco Legal do Saneamento Básico depende não apenas da ampliação da infraestrutura, mas também de uma gestão hídrica eficiente e integrada, na qual a outorga desempenha papel fundamental.

Introdução

De acordo com a Constituição Federal de 1988, a água é um bem de domínio público e um recurso natural finito, cuja utilização requer instrumentos de gestão capazes de conciliar usos múltiplos e mitigar confitos decorrentes de sua escassez. No ordenamento jurídico brasileiro, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos constitui um dos principais instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, com a finalidade de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, bem como garantir o exercício equitativo do direito de acesso a esse recurso essencial.

A operacionalização desse instrumento envolve a articulação entre diferentes esferas institucionais, com destaque para a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no âmbito federal, e os órgãos gestores estaduais de recursos hídricos. No estado de Pernambuco, essa função cabe à Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e no estado da Paraíba à Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), portanto a este órgão é dado o controle para que possam distribuir a água de forma igualitária no que diz respeito a quantidade e a qualidade deste recurso natural (Santos et al., 2024).

O crescimento populacional acarreta maior demanda por recursos naturais e por infraestrutura básica, como por exemplo, os serviços de saneamento. Segundo o Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população do estado de Pernambuco no ano de 2022 foi de 9.058.931 habitantes. Estimativas populacionais mais recentes apontam que Pernambuco alcançou cerca de 9,56 milhões de habitantes em 2025.

As Projeções de População do IBGE, com base no Censo de 2022, indicam que a população pernambucana atingirá um pico de aproximadamente 9,7 milhões de habitantes por volta de 2038, isso demanda a adoção de modelos de planejamento mais eficientes e integrados, pois, conforme destacado por Domínguez Calle et al. (2023), o cenário atual pode intensificar problemas futuros, em razão das mudanças no regime hidrológico observadas globalmente, associadas a fatores territoriais e limitações estruturais na gestão dos recursos hídricos.

Diante ao cenário demográfico supracitado, somam-se desafios relacionados à disponibilidade hídrica e à provisão de serviços de saneamento. A Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, conhecida como Novo Marco Legal do Saneamento Básico, promoveu uma atualização substancial no marco regulatório do setor, visando à universalização dos serviços de abastecimento de água potável e de esgotamento sanitário em todo o território nacional. Essa legislação modernizou o marco regulatório anterior, ampliou a competição, estimulou investimentos e estabeleceu mecanismos para maior eficiência e transparência na prestação dos serviços, no entanto Pequeno et al., (2023) destacam que a priorização da rentabilidade econômica na prestação dos serviços de saneamento pode aprofundar desigualdades socioambientais, sendo indispensável a atuação ativa do Estado para garantir a universalização do acesso e a efetivação da dignidade humana.

Sá, Roberto e Souto (2023) destacam em seus estudos vários aspectos relevantes elencados na Lei nº 14.026/2020, como por exemplo, a definição de metas claras e obrigatórias de universalização inclusive com a participação da iniciativa privada, visto a necessidade de alcançar até 31 de dezembro de 2033, 99 % da população brasileira tenha acesso à água potável tratada e 90 % disponha de serviços de coleta e tratamento de esgoto. Tais metas são fundamentais para a promoção da saúde pública, a proteção ambiental e a melhoria da qualidade de vida, além de estarem alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), desde 2015, especialmente no que diz respeito ao ODS 6 - Água potável e saneamento para todos.

Nesse contexto, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos configura-se como instrumento indispensável à viabilização técnica, jurídica e ambiental das metas de universalização do saneamento previsto na Lei nº 9.433/1997. Sendo assim, a outorga visa disciplinar o uso racional da água, assegurando o controle das captações, construções de obras hídricas e dos lançamentos de efluentes, bem como a compatibilização entre a disponibilidade hídrica e as diversas demandas existentes, sendo que a pluralidade do uso da água depende das características sociais e econômicas das regiões representadas na bacia hidrográfica (Peixoto et al., 2025).

A implementação dos sistemas de abastecimento e esgotamento exige a regularização das captações e dos lançamentos, sendo a outorga um dos instrumentos centrais para assegurar segurança jurídica e compatibilizar demandas com a disponibilidade hídrica. Contudo, sua efetividade depende da capacidade institucional do usuário, sob risco de reduzir-se a requisito formal dissociado da gestão integrada dos recursos hídricos (Reis et. al., 2023). dicionalmente, a gestão adequada das outorgas favorece a integração entre as políticas públicas de saneamento básico e de recursos hídricos, promovendo a proteção ambiental, a manutenção da qualidade das águas e a sustentabilidade dos sistemas implantados. Assim, o cumprimento das metas estabelecidas pela Lei nº 14.026/2020 não se restringe à ampliação física da infraestrutura, mas pressupõe uma gestão hídrica eficiente e articulada, em que a outorga desempenha papel central para assegurar o acesso contínuo e equitativo à água, bem como a adequada disposição dos efluentes tratados.

No Brasil, a competência para a emissão da outorga de direito de uso dos recursos hídricos é definida a partir da "dominialidade" das águas, conforme disposto na Constituição Federal de 1988, na Lei nº 9.433/1997 e em normas complementares. De acordo com a Lei supracitada a competência para outorgar o direito de uso da agua é atribuida à União a gestão dos corpos hídricos de domínio federal e aos Estados a responsabilidade sobre os de domínio estadual. Contudo, a existência de competência legal não assegura, por si só, a efetividade do instrumento. Estudos sobre a gestão na bacia do rio Munim (MA) evidenciam que limitações financeiras, estruturais e institucionais no âmbito dos comitês de bacia comprometem a implementação dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, inclusive a outorga, reduzindo sua capacidade de mediar conflitos e regular os múltiplos usos, conforme evidenciado por Mendes et. al., (2024).

A definição da dominialidade é fundamental para identificar se a solicitação da outorga deve ser dirigida à ANA ou aos órgãos gestores estaduais, no que tange ao estado de Pernambuco sendo responsabilidade da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), todavia, neste estudo também destaca-se o estado da Paraíba pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), devido a Companhia também captar água do referido estado.

Ainda de acordo com a Lei nº 9.433/1997, empreendimentos localizados em bacias hidrográficas interestaduais podem demandar atuação articulada entre a ANA e os órgãos estaduais, sobretudo quando há impactos significativos nos regimes quantitativos ou qualitativos dos recursos hídricos. Nesses casos, a compatibilização das outorgas é essencial para garantir a gestão integrada e o uso sustentável das águas, em consonância com os princípios do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Dessa forma, a correta identificação da dominialidade do corpo hídrico constitui etapa indispensável no processo de regularização do uso da água, assegurando que a solicitação de outorga seja encaminhada ao órgão competente, evitando sobreposições, conflitos administrativos e insegurança jurídica.

Do ponto de vista teórico e prático, Maia, Vasconcellos Sobrinho e Mendes (2022) destacam a outorga como instrumento essencial da governança dos recursos hídricos por orientar a tomada de decisões e disciplinar o uso da água, contribuindo para o uso sustentável e o planejamento dos recursos hídricos. Porém Marques *et al.* (2022) enfatizam os potenciais conflitos pelo uso dos recursos hídricos quando a demanda dos usuários supera o limite outorgável de uma bacia, reforçando a importância do cálculo da disponibilidade hídrica em conjunto com os Comitês de Bacias Hidrográficas para a definição de vazões outorgáveis de forma equitativa. Montefusco *et al.* (2021) ressaltam que as crises hídricas evidenciam a necessidade de uma nova relação da sociedade com a água, destacando a evolução da proteção jurídica da água potável no Brasil e a adoção de um regime de outorga que assegure uma gestão eficiente, sustentável e humanizada desse recurso essencial.

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo analisar a gestão dos procedimentos internos para obtenção das outorgas dos direitos de uso de recursos hídricos no âmbito da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), relacionando o marco legal, os procedimentos administrativos adotados e sua relevância para a universalização dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no estado de Pernambuco.

Material e Métodos

A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, de caráter descritivo, fundamentada na análise documental. Inicialmente, realizou-se a revisão da legislação federal e estadual aplicável à outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, com destaque para a Lei nº 9.433/1997 e normas correlatas. Em seguida, procedeu-se à consulta aos portais institucionais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), com vistas à compreensão dos procedimentos e diretrizes relacionadas à outorga da Companhia.

Paralelamente, foram levantados e analisados termos de outorga e documentos públicos disponibilizados pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), referentes aos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) e dos Sistemas de Esgotamento Sanitários (SES) de sua responsabilidade para o período compreendido entre janeiro de 2015 e dezembro de 2025. Complementarmente, por meio da Lei de Acesso à Informação, obtiveram-se dados relativos à gestão das outorgas, os quais foram organizados e sistematizados em planilhas eletrônicas, utilizando o *software Microsoft Excel*, versão 2019, possibilitando análises técnica e comparativas as legislações vigentes. Por fim, realizou-se uma análise crítica dos procedimentos administrativos adotados e dos desafios técnicos e institucionais observados, articulando o marco legal com a prática administrativa e operacional da prestadora de serviços públicos do estado de Pernambuco.

Por fim, os sistemas utilizados pela referida Companhia para o gerenciamento das outorgas foram apresentados por meio de imagens, os quais foram inseridos ao longo do texto com o objetivo de ilustrar os procedimentos adotados e apoiar a análise metodológica.

Resultados e discussão

Companhia Pernambucana de Saneamento de Pernambuco (COMPESA)

A Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) é uma empresa estatal vinculada ao Governo do Estado de Pernambuco por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento (SRHS) de Pernambuco, responsável pela prestação dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário em 172 municípios pernambucanos. No exercício de suas atribuições, a COMPESA está sujeita ao cumprimento da legislação ambiental e de recursos hídricos, incluindo a obrigatoriedade de obtenção de outorgas de direito de uso de recursos hídricos para captações, construções de barragens, lançamentos de efluentes tratados e demais intervenções em corpos d'água. Dessa forma, a atuação da Companhia articula-se diretamente com os instrumentos de gestão ambiental e hídrica, inserindo a prestação dos serviços de saneamento em um contexto regulatório complexo, que demanda atuação integrada entre órgãos ambientais, gestores de recursos hídricos e entidades reguladoras.

A atuação da COMPESA ocorre, majoritariamente, por meio de contratos de concessão firmados com os municípios, titulares constitucionais dos serviços de saneamento básico, conforme disposto no art. 30, inciso V, da Constituição Federal. Esses contratos estabelecem as condições para a delegação da prestação dos serviços, definindo direitos, deveres, metas de universalização, padrões de qualidade, prazos e mecanismos de regulação e fiscalização. No contexto do Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020), tais contratos passaram a exigir maior rigor quanto ao cumprimento de metas de expansão e eficiência operacional, bem como à sustentabilidade econômico-financeira da prestação dos serviços.

Gestão e Monitoramento das Outorgas dos Direitos de Uso de Recursos Hídricos

Com vistas ao atendimento das exigências estabelecidas na legislação de recursos hídricos, a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) tem investido de forma contínua na gestão e no monitoramento das outorgas dos direitos de uso de recursos hídricos. Essas outorgas estão diretamente associadas aos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) e aos Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES), os quais demandam controle técnico e administrativo permanente para assegurar a regularidade e a continuidade das operações.

Nesse contexto, foi instituída a Gerência de Gestão Ambiental (GMA), cuja missão consiste em promover ações e procedimentos voltados à conformidade da Companhia com a legislação ambiental vigente. A GMA é estruturada por uma gerência, uma supervisão e cinco núcleos técnicos, a saber: Licenciamento Ambiental, Outorga, Gestão Florestal, Recebimento de Obras e Educação Ambiental. Dentre esses, destaca-se neste estudo o Núcleo de Outorgas, que, de forma integrada aos demais núcleos, é responsável pela gestão, acompanhamento e monitoramento das outorgas, enquanto instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos.

O processo de gestão e monitoramento das outorgas ocorre de maneira sistematizada. Inicialmente, para que os colaboradores responsáveis pelas unidades operacionais possam solicitar a outorga junto à Gerência de Gestão Ambiental, torna-se necessário o encaminhamento prévio de informações e documentos técnicos específicos (Quadro 01), os quais subsidiam a análise e a condução do processo administrativo junto à APAC, ANA e AESA.

Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos		**Documentação necessária**
APAC	Poço Perfuração e Poço Operação	Solicitação feita através do Sistema de Informação de Recursos Hídricos (SIRH) - PE - requerimento específico por tipologia e anexando os documentos: croqui de localização, perfil construtivo do poço, ART do projeto de perfuração e comprovante de titularidade do terreno.

	Barragens	Solicitação feita através do Sistema de Informação de Recursos Hídricos (SIRH) – PE - requerimento especifico por tipologia.
	Captação de água	Solicitação feita através do Sistema de Informação de Recursos Hídricos (SIRH) – PE – requerimento especifico por tipologia.
	Lançamento de efluentes	Solicitação feita através do Sistema de Informação de Recursos Hídricos (SIRH) – PE - requerimento especifico por tipologia.
ANA	Barragens	Solicitação através do sistema - Plataforma Águas Brasil
	Captação de água	Solicitação através do sistema - Plataforma Águas Brasil
	Lançamento de efluentes	Solicitação através do sistema - Plataforma Águas Brasil
AESA	Captação de água	Solicitação através do sistema – Sistema para obtenção de Licenças de Obras Hídricas e Outorgas (SIEGRH)

Quadro 01: Tipologias de outorga e respectivos sistemas de solicitação e documentação exigida pelos órgãos gestores (APAC, ANA e AESA).
Fonte: as autoras (2026)

As documentações supracitadas são solicitadas por meio de processo administrativo formalizado no Sistema Eletrônico de Informações (SEI). Após o recebimento das informações, procede-se à análise e validação dos documentos apresentados, com posterior encaminhamento às etapas subsequentes do fluxo processual (Figura 1).

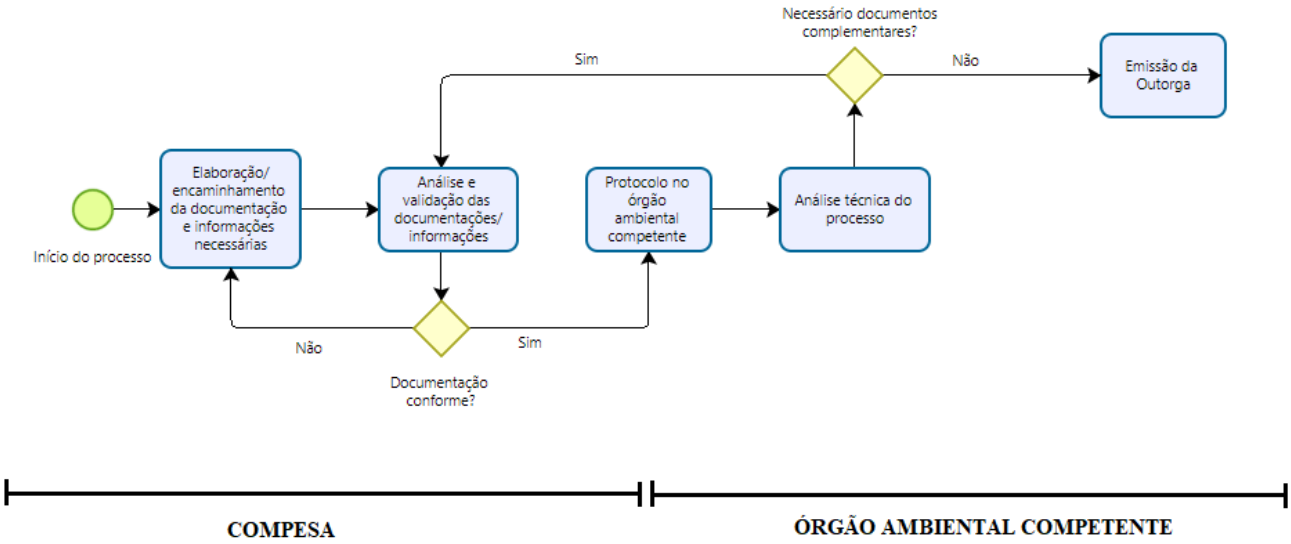


Figura 01: Fluxograma dos procedimentos de solicitação da Outorga na Compesa.
Fonte: as autoras (2026)

Os requerimentos de outorga junto à APAC são realizados por meio do SIRN; ANA, por intermédio da Plataforma Água Brasil, a qual emite notificação automática por correio eletrônico com antecedência de 365 dias do vencimento da outorga; e, na AESA, por meio da plataforma SIEGRH. A equipe responsável realiza monitoramento diário dessas plataformas para verificação de notificações ou pendências. Quando identificada alguma demanda, esta é analisada e, se necessário, a gerência solicitante é formalmente comunicada.

Após a emissão da outorga, a Gerência de Gestão Ambiental (GMA) realiza o registro das informações em planilha eletrônica de controle interno, contemplando dados como sistema vinculado, vazão outorgada, corpo hídrico, prazo de vigência e data-limite para renovação. Na sequência, a outorga é encaminhada à gerência demandante por meio do SEI.

Destaca-se que o prazo de validade das outorgas de direito de uso de recursos hídricos não é padronizado, variando conforme o tipo de intervenção, as características do corpo hídrico e as diretrizes estabelecidas pelo órgão gestor competente. Essa variabilidade exige acompanhamento sistemático, a fim de evitar a expiração dos atos autorizativos e eventuais inconformidades legais perante a legislação ambiental e de recursos hídricos.

Com o objetivo de prevenir a perda de prazos, a GMA adota mecanismos permanentes de monitoramento e controle. O acompanhamento é realizado por meio de planilha eletrônica de gestão interna, nas quais são registrados e atualizados os prazos de vigência de cada outorga, possibilitando a identificação antecipada da necessidade de renovação. Quando restam 180 dias para o vencimento, é instaurado processo no SEI para consulta à gerência responsável quanto ao interesse na renovação. Havendo manifestação favorável, dá-se continuidade aos trâmites administrativos junto ao órgão competente; caso contrário, formaliza-se a comunicação ao órgão gestor para solicitação de cancelamento da outorga.

Todavia, ressalta-se que COMPESA encontra-se em processo de informatização dos procedimentos internos de solicitação, acompanhamento e controle das outorgas por meio do Sistema Integrado da COMPESA (SIC), como pode ser

observado na Figura 02. A iniciativa visa centralizar informações técnicas e administrativas, otimizar o fluxo processual e fortalecer a governança diante da relevância estratégica e do elevado quantitativo de outorgas gerenciadas pela Companhia.

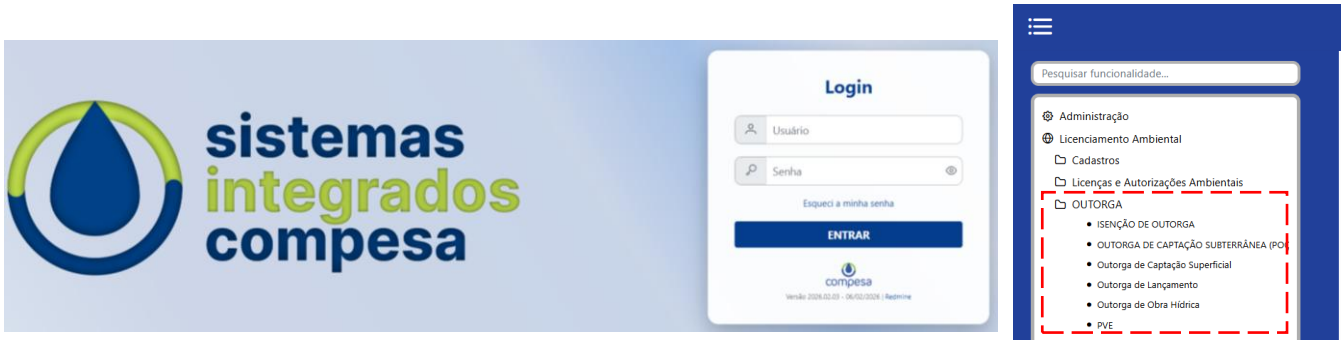


Figura 02: Páginas principais do Sistema Integrado da Compesa (SIC) para solicitação e gestão das outorgas.
Fonte: Compesa (2026)

Quantitativo e Custos com a Obtenção das Outorgas dos Direitos de Uso de Recursos Hídricos

Analisando os dadosdisponibilizados, verificou-se que a COMPESA obteve, junto à Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), à Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) e à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no período compreendido entre janeiro de 2015 e dezembro de 2025, o total de 553 outorgas de direito de uso de recursos hídricos, conforme apresentado no Quadro 02.

Órgão Ambiental	Tipologia da outorga	Quantitativo (unid)	Porcentagem (%)
APAC	Barragens	105	90,42
	Captação de água superficial e subterrânea	332	
	Lançamento de efluentes	63	
	TOTAL	500	
ANA	Barragens	01	9,40
	Captação de água superficial	50	
	Lançamento de efluentes	01	
	TOTAL	52	
AESA	Captação de água superficial	01	0,18
	TOTAL	01	
	TOTAL GLOBAL	553	100

Quadro 02: Quantitativo de outorgas concedidas à COMPESA por órgão gestor e tipologia (2015–2025).
Fonte: as autoras (2026)

A distribuição das 553 outorgas evidencia predominância estadual: 500 emitidas pela APAC (90,42%), 52 pela ANA (9,40%) e 1 pela AESA (0,18%), indicando que a regularização hídrica da Companhia concentra-se em corpos d'água de domínio estadual, especialmente em Pernambuco. Quanto à tipologia, 69,26% referem-se à captação de água, 19% (106) a barragens e 12% (64) a lançamento de efluentes (Figuras 03 e 04), evidenciando forte dependência operacional da disponibilidade hídrica.

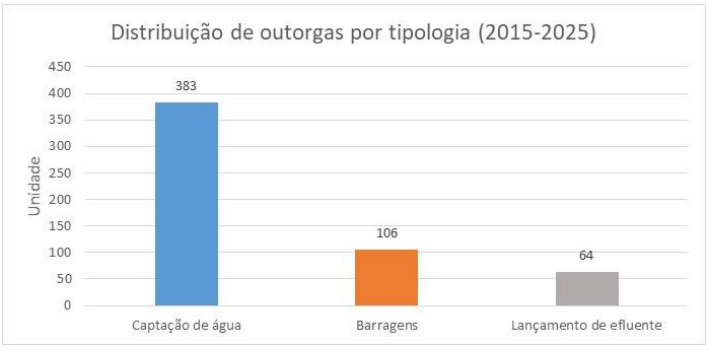




Figura 03 e 04: Quantitativo e Porcentagem de outorgas concedidas à COMPESA por tipologia (2015–2025).
Fonte: as autoras (2026)

No que se refere aos custos associados à obtenção das outorgas, verificou-se que não há cobrança de valores para a solicitação ou emissão das outorgas junto à APAC, em Pernambuco. Em contrapartida, no âmbito da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), há cobrança de valores no momento da solicitação conforme critérios estabelecidos na legislação estadual vigente. Já a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), embora não haja cobrança pela solicitação do ato administrativo de outorga, incidem valores referentes à cobrança pelo uso dos recursos hídricos, calculados com base na declaração anual do volume de água efetivamente utilizado ou outorgado, em conformidade com os instrumentos normativos federais, mas salientamos que são instrumentos distintos.

Dessa forma, para o período analisado, a COMPESA apresentou uma despesa total de R$ 6.852.440,77 (seis milhões, oitocentos e cinquenta e dois mil, quatrocentos e quarenta reais e setenta e sete centavos), decorrente tanto das taxas associadas à solicitação de outorgas junto à AESA quanto da cobrança pelo uso dos recursos hídricos nos processos vinculados à ANA. A análise dos dados evidencia que, embora a maior parte das outorgas esteja vinculada à esfera estadual de Pernambuco (90,42%), os custos financeiros concentram-se nos processos de domínio da União, ainda que estes representem apenas 9,40% do total de atos autorizativos, e em segundo plano, ao estado da Paraíba.

Tal assimetria revela que a gestão das outorgas federais exige planejamento técnico-financeiro diferenciado. O montante de mais de R$ 6,85 milhões gastos no período analisado suscita reflexões relevantes sob a ótica econômico-regulatória. Embora a cobrança pelo uso da água constitua instrumento legítimo da Política Nacional de Recursos Hídricos, seu impacto financeiro pode repercutir na estrutura tarifária dos serviços de saneamento, especialmente em companhias estaduais que operam com equilíbrio econômico-financeiro sensível.

Nesse contexto, questiona-se se os custos associados às outorgas federais podem influenciar indiretamente as tarifas praticadas ou reduzir a margem de investimento em expansão da infraestrutura, afetando, ainda que de forma indireta, o cumprimento das metas de universalização previstas no Novo Marco Legal do Saneamento. Adicionalmente, os dados evidenciam a importância de estratégias de planejamento hídrico mais eficientes, incluindo: Revisão periódica de vazões outorgadas; Redução de perdas nos sistemas; Otimização operacional; e Integração entre planejamento de recursos hídricos e expansão do saneamento.

Assim, a gestão das outorgas não deve ser compreendida apenas como exigência legal, mas como instrumento estratégico de governança hídrica e sustentabilidade financeira institucional.

Além disso, destaca-se que no âmbito das obrigações associadas às outorgas emitidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a COMPESA realiza anualmente o envio da Declaração Anual de Uso de Recursos Hídricos (DAURH). Esse relatório tem como finalidade informar ao órgão gestor federal os volumes efetivamente captados e utilizados nos empreendimentos outorgados, permitindo o acompanhamento do uso dos recursos hídricos e subsidiando a cobrança pelo uso da água.

O procedimento consiste no acesso ao sistema eletrônico disponibilizado pela ANA, no qual são declarados, para cada ponto outorgado, os dados referentes ao volume anual utilizado, período de operação e demais informações técnicas exigidas. O envio da Declaração de Uso de Recursos Hídricos (DAURH) ocorre dentro do prazo estabelecido pela Agência e é condição indispensável para a regularidade das outorgas, uma vez que a omissão ou inconsistência das informações pode acarretar notificações, penalidades administrativas e impedimentos para a renovação das outorgas vigentes.

Considerações finais

A outorga dos direitos de uso de recursos hídricos configura-se como instrumento técnico-jurídico imprescindível para a efetivação das políticas públicas de recursos hídricos e de saneamento básico no Brasil. A análise desenvolvida evidenciou que a regularização das captações e dos lançamentos de efluentes é condição indispensável para a segurança jurídica, o planejamento operacional e a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário operados pela COMPESA.

A estrutura institucional da Companhia, em especial a atuação da Gerência de Gestão Ambiental, com destaque para o núcleo de Outorgas, desempenha papel estratégico na condução, no acompanhamento e no monitoramento dos processos de outorga. Tal atuação contribui para a conformidade com a legislação ambiental e de recursos hídricos vigente, bem como para o fortalecimento da articulação institucional com os órgãos gestores competentes, notadamente a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Ademais, a adoção de procedimentos administrativos sistematizados e a implementação de ferramentas informatizadas, como o Sistema Integrado da COMPESA, tendem a representar avanços significativos no aprimoramento da gestão hídrica institucional, à medida que forem plenamente consolidados e utilizados de forma efetiva.

Dessa forma, conclui-se que o cumprimento das metas estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico não depende apenas da ampliação da infraestrutura física, mas também de uma gestão eficiente e integrada das outorgas de uso dos recursos hídricos. O fortalecimento desse instrumento contribui para a mitigação de conflitos pelo uso da água, para a proteção ambiental e para a garantia do acesso contínuo e equitativo aos serviços de saneamento, especialmente em um cenário de crescente pressão sobre a disponibilidade hídrica. Contudo, sugere-se que futuramente sejam realizados novos estudos com o intuito de verificar a progressão da COMPESA no que tange a adoção de novas ferramentas de gestão e monitoramento das outorgas.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) pelo apoio institucional concedido à realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos. Brasília: ANA, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/ana. Acesso em: 25 jan. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Volume 6 – Outorga de direito de uso de recursos hídricos. Apostila técnica. Brasília: ANA, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/ana. Acesso em: 28 jan. 2026.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). Outorga de direito de uso de recursos hídricos. Recife: APAC, [s.d.]. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br. Acesso em: 26 jan. 2026.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, [2016]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 28 jan. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Outorga de direito de uso de recursos hídricos. Brasília: ANA, [s.d.]. Acesso em: 24 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Cria a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 jul. 2000.

BRASIL. Ministério das Cidades. Marco legal do saneamento básico. Brasília, DF: Ministério das Cidades, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/cidades. Acesso em: jan. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH. Brasília, DF: MMA, [s.d.]. Acesso em: 24 jan. 2026.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO (COMPESA). Termos de outorga: Termo de Outorga ETE Escada; Termo de Outorga SES-Gravatá. Recife: COMPESA, [s.d.]. Disponível em: https://servicos.compesa.com.br. Acesso em: 26 jan. 2026. Acesso em: 13 fev. 2026.

DE SÁ, M. M.; ROBERTO, J. C. A.; SOUTO, S. P. Análise dos impactos do novo marco legal do saneamento na prestação de serviços de saneamento básico no Brasil. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, *[S. l.]*, v. 21, n. 6, p. 3833–3854, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n6-041. Disponível em: https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/670. Acesso em: 13 fev. 2026.

DOMÍNGUEZ, E. A. C.; RIVERA, H. G.; VANEGAS, R. S.; MORENO, P. Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, Bogotá, Colombia, v. 32, n. 123, p. 195–212, 2023. DOI: 10.18257/raccefyn.32(123).2008.2257.

DOS SANTOS, J. J. S.; SANTOS, Y. T. da C.; SILVA, A. M. dos S.; ARAGÃO, J. S.; ARAÚJO, G. M. Outorgas de direito de uso dos recursos hídricos na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Salgado. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, *[S. l.]*, v. 17, n. 8, p. e10040, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.8-541. Disponível em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/10040. Acesso em: 13 fev. 2026.

MAIA, P. C. C.; SOBRINHO VASCONCELLOS, M.; MENDES, R. L. R. Governança da água na Amazônia paraense: uma análise no uso da outorga de direito de uso dos recursos hídricos. **P2P & Inovação**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 8–28, 2023. Disponível em: https://revista.ibict.br/p2p/article/view/6116/5680. Acesso em: 26 jan. 2026.

MARQUES, H. F. M.; REIS, B. C.; FEITOZA, V. S.; DA SILVA, J. G.; MONTE-MOR, R. C. de A. Conflitos na gestão de recursos hídricos no Estado de Minas Gerais: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Córrego dos Quatis, Itueta–Minas Gerais, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, e27910111967, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i1.11967. Disponível em: https://rsdjournal.org. Acesso em: 14 jan. 2026.

MENDES, J. J.; GUANDIQUE, M. E. G.; RODRIGUES, J. N. P.; MARTINS, G. C.; BARROSO, F. da C.; MENDES, G. J.; CHAVES, N. dos R. B.; DINIZ, D. G. B. Gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Munim: gerenciamento do

comitê de bacia hidrográfica. **Caderno Pedagógico**, *[S. l.]*, v. 21, n. 7, p. e5430, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n7-033. Disponível em: https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/5430. Acesso em: 13 fev. 2026.

MONTEFUSCO, C. de L. A.; TAMWING, D. S.; DA CRUZ, W. M.; MOREIRA, J. G. do V.; SERRANO, R. O. P. Direito e diretrizes de acesso à água: contexto geral e abordagem para a cidade de Rio Branco, Acre, Brasil. **Enciclopédia Biosfera, Jandaia-GO: Centro Científico Conhecer**, v. 18, n. 37, p. 181–194, 2021. DOI: 10.18677/EnciBio_2021C15.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS 6: Água potável e saneamento. ONU, 2015. Disponível em: https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/. Acesso em: 26 jan. 2026.

PEIXOTO, N. M.; CABRAL, G. K. P.; DOS SANTOS, M. M. Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos como Instrumento de Gestão Hídrica: Uma análise na bacia do rio Macaé (RJ). **Revista Brasileira de Geografia Física**, *[S. l.]*, v. 18, n. 6, p. 4782–4798, 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.6.p4782-4798. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/265584. Acesso em: 13 fev. 2026.

PEQUENO, L. A. B.; DOS SANTOS, W. B.; BEZERRA, D. E.; TORQUATO, A. L. O Saneamento como Mercadoria: Uma Análise da Lei 14.026 e sua Aplicabilidade no Estado da Paraíba – Brasil. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 594–613, 2023. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.2.83274. Disponível em: https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/83274. Acesso em: 13 fev. 2026.

Reis, A. M. R.; Siqueira, G. W.; Siqueira, M. A. do S. L.; Alvares, T. C. C.; Teixeira, D. F. Environmental management of the water supply of Cidade Universitária Prof. José da Silveira Netto (UFPA) and implementation model for granting water use. **Research, Society and Development**, *[S. l.]*, v. 12, n. 10, p. e06121043374, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i10.43374. Disponível em: https://rsdjournal.org/rsd/article/view/43374. Acesso em: 13 fev. 2026.

DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA IMPLEMENTAÇÃO DA COMPOSTAGEM COMO POLÍTICA PÚBLICA NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS: UMA REVISÃO

1 Juliana Glicerio Dazzi Bissoli, 2 Walter Igor Gomes Da Cruz, 3 Juliana Salomão das Neves, 4 Janaína Rodrigues Ferreira, 5 Aila Cavatti Lopes, 6 Lorena Knupp Morelllato, 7 Rodrigo Pratte Santos, 8 Renato Ribeiro Siman

1 Universidade Federal do Espírito Santo, e-mail: juliana.dazzi@edu.ufes.br; 2 Universidade Federal do Espírito Santo, e-mail: walter.i.cruz@ufes.edu.br; 3 Universidade Federal do Espírito Santo, e-mail: juliana.neves@edu.ufes.br; 4 Universidade Federal do Espírito Santo, e-mail: janaina.ferreira@edu.ufes.br; 5 Universidade Federal do Espírito Santo, email: ailla.lopes@edu.ufes.br; 6 Universidade Federal do Espírito Santo, email: loren.up@gmail.com; 7 Universidade Federal do Espírito Santo, email: rodrigo.pratte@ufes.br; 8 Universidade Federal do Espírito Santo, email: renato.siman@ufes.br

Palavras-chave: Gerenciamento de Resíduos Sólidos (*Waste Management*); Compostagem (*Composting*); Sustentabilidade (*Sustainability*).

Resumo

A crescente geração de resíduos sólidos, impulsionada pelo aumento populacional e padrões de consumo, exige estratégias de gestão sustentáveis, especialmente para a fração orgânica, que representa entre 40% e 70% do total gerado. Apesar de a compostagem ser uma alternativa biologicamente eficiente, de baixo custo e essencial para a economia circular, sua aplicação em larga escala no âmbito de políticas públicas ainda é limitada. Diante deste cenário, o presente trabalho objetivou identificar e analisar os principais fatores que influenciam a adoção e a continuidade da compostagem como política pública para o tratamento de resíduos orgânicos. Para tanto, realizou-se uma pesquisa bibliométrica e bibliográfica estruturada nas bases Web of Science e Scopus, abrangendo o período de 2017 a 2024. A análise do portfólio final de artigos revelou que a implementação da compostagem é condicionada por um conjunto de fatores inter-relacionados de natureza econômica, social, política e ambiental. Os resultados demonstram que a disponibilidade de recursos financeiros, o engajamento social, modelos de governança robustos e arranjos regulatórios claros atuam como os principais indutores ou barreiras para a viabilidade dessa prática. Conclui-se que, embora tecnicamente simples, a consolidação da compostagem como política pública demanda uma integração estratégica entre gestão governamental e participação da sociedade para superar as dificuldades de aplicação em larga escala.

Introdução

O aumento da população mundial, aliado às mudanças nos hábitos de vida, levou a um crescimento considerável na geração de resíduos nos últimos anos (Sayara *et al*., 2020; Sharma; Soni; Soni, 2024). As projeções indicam que essa tendência de crescimento poderá levar a uma produção estimada de resíduos de 3,4 bilhões de toneladas até 2050, reforçando a necessidade de estratégias de gestão sustentáveis e eficazes (Ebrahimi *et al*.,2024).

Grande parte desses resíduos gerados é composta por resíduos orgânicos, que podem representar de 40% a 70% dos resíduos sólidos urbanos (Xue *et al*., 2025). Os resíduos orgânicos são aqueles resíduos que tem origem orgânica, biodegradáveis e podem ser decompostos pela ação de microrganismos. Incluem os resíduos de podas, resíduos domésticos, resíduos comerciais, industriais, dentre outros (Mancini; Arzoumanidis; Raggi, 2019). Atualmente, a coleta, o reaproveitamento e a reciclagem desses materiais são questões ambientais prioritárias e essenciais, tanto em áreas urbanas quanto em rurais, em diversos países (Wainaina *et al*., 2020). Com o esgotamento progressivo dos aterros sanitários e as dificuldades crescentes em encontrar novos locais para disposição de resíduos, especialmente em áreas metropolitanas, digestão anaeróbia e compostagem têm ganhado destaque.

Desta forma, diversos locais adotam políticas que restringem a disposição em aterros e incentivam tratamentos alternativos como a compostagem, favorecendo a economia circular e a sustentabilidade ambiental (Wang; Yang, 2018). A compostagem é uma técnica tratamento de resíduos orgânicos que converte os resíduos em matéria orgânica estável. Ao final do processo, tem-se o composto, um fertilizante cuja aplicação que aumenta a matéria orgânica do solo, enriquece a comunidade microbiana e melhora o rendimento das colheitas (Sharma *et al*., 2019; Yian *et al*., 2024).

A compostagem foi apontada como uma das soluções para a gestão de resíduos sólidos em países em desenvolvimento (Hettiarachchi *et al*., 2018), podendo eliminar contaminantes e mitigar impactos ambientais significativos. Trata-se de uma opção sustentável de gestão de resíduos, pois contribui para a economia circular e combate o esgotamento de recursos (Kadhila *et al*., 2023).

No entanto, a compostagem enfrenta diversas dificuldades, especialmente em países de baixa renda. Vários desafios foram relatados como influenciadores da atitude em relação à compostagem, incluindo a capacidade da comunidade de participar de programas de compostagem, a disponibilidade e adequação de recursos (infraestrutura, financeiros e tecnológicos), a conscientização e o treinamento sobre produção e uso de composto, a disponibilidade de mercado do composto produzido, o apoio do governo e da liderança política, o conhecimento das políticas e leis nacionais, a contribuição da sociedade e da

comunidade empresarial e os métodos inovadores de compostagem (Lalitha; Fernando, 2019). Além disso, apesar de ser considerada uma técnica simples e de baixo custo, a compostagem normalmente não é uma opção utilizada em larga escala no tratamento dos orgânicos (Rahmani *et al*., 2024).

Dessa forma, este artigo apresenta uma revisão dos principais fatores que influenciam a implantação da compostagem como política pública para o tratamento de resíduos orgânicos. A análise busca esclarecer as razões para a discrepância entre a simplicidade técnica e o baixo nível de adoção dessa prática, identificando os desafios e oportunidades para a ampliação da compostagem.

Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise dos principais fatores que impactam a adoção da compostagem como política pública para o tratamento de resíduos orgânicos. Apesar de ser uma técnica de baixo custo e de relativa simplicidade, a compostagem ainda é subutilizada em muitos contextos, devido a diversos desafios que dificultam sua aplicação em larga escala. Assim, esta revisão busca identificar e categorizar esses fatores, incluindo barreiras econômicas, sociais, políticas e ambientais, que contribuem para a baixa adesão à prática. Além disso, destacou-se oportunidades e estratégias que facilitam a implementação da compostagem como uma alternativa viável e sustentável, promovendo o gerenciamento adequado dos resíduos orgânicos e reduzindo seu impacto ambiental. Ademais, também se visou compreender como esta temática vem sendo abordada à luz da academia internacional.

Material e Método

Para realização deste trabalho, foram realizadas pesquisas bibliométrica e bibliográfica estruturada na tentativa de compreender como a implantação da compostagem como política pública para o tratamento de resíduos orgânicos vem sendo abordado pela produção científica internacional, bem como determinar os principais fatores que influenciam nesta implantação. A investigação contemplou a busca sistemática de termos em artigos científicos, livros, documentos técnicos e legislações correlatas ao tema do trabalho. Para garantir maior abrangência e padronização dos resultados, os descritores foram definidos em língua inglesa e adaptados às formas mais recorrentes de indexação nas bases de dados internacionais, permitindo maior consistência na recuperação dos registros.

Buscando estabelecer um portfólio de artigos relacionados ao tema em estudo, inseriu-se os termos de busca nas bases *Web of Science* e *Scopus*, fixando-se o lapso temporal em 2017-2024. A escolha dessas bases científicas ocorreu devido à sua significativa relevância para a pesquisa na literatura (Khudzari *et al.,* 2018; Solis *et al.,* 2019), além de sua extensa cobertura, que facilitou a obtenção de um maior número de artigos (Salvador *et al*., 2019). A estratégia de pesquisa utilizou operadores booleanos e agrupamentos de sinônimos, com o objetivo de ampliar a sensibilidade da busca sem perder especificidade temática. Foram utilizadas duas combinações estruturadas de termos, inseridas nas bases científicas, contemplando diferentes dimensões do problema de pesquisa: aspectos técnicos da compostagem, tipologias de resíduos orgânicos, fatores sociais e educacionais, instrumentos legais e de política pública, variáveis econômicas e financeiras, e critérios de desempenho e impacto ambiental. Entre os principais descritores empregados estiveram termos relacionados a sistemas e instalações de compostagem, resíduos biodegradáveis, educação ambiental, fatores sociais, subsídios governamentais, instrumentos regulatórios, sustentabilidade financeira, análise de custos e avaliação de impactos ambientais.

Foram utilizadas combinações estruturadas de termos organizadas em blocos temáticos. No bloco relacionado ao processo de compostagem, foram empregados os termos: "*Composting*", "*Composting Plants*", "*Composting Facility*", "*Composting Progress*" e "*Composting System*". Para caracterização do tipo de resíduo, utilizaram-se os descritores: "*Biowaste*", "*Organic Waste*", "*Biodegradable Waste*", "*Waste Composting*", "*Organic Food Waste*" e "*Compostable Waste*". No eixo social e educacional, foram incluídos os termos: "*Environmental Education*", "*Education for Sustainability*", "*Sustainability Education", "Environmental Education Programme*", "*Social Analysis*" e "*Social Benefit Analysis*".

No bloco referente a instrumentos legais e políticas públicas, foram empregados os termos: "*Government Subsidies*", "*Financial Assistance*", "*Government Benefits*", "*Directive*", "*Law*", "*Legislation*", "*Decree*", "*Policy*", "*Regulation*", "*Rule*" e "*Public Policies".* Para a dimensão econômica e financeira, utilizaram-se os descritores: "*Financial Sustainability*", "*Financial Sustainable*", "*Financial Planning*", "*Cost-Benefit Analysis*", "*Rate Reliance*", "*Tariffs*", "*Taxes*", "*Rates*", "*Fares*", "*Operation Cost*" e "*Economic Analysis*". Por fim, no eixo ambiental, foram incluídos os termos: "*Environmental Impact*", "*Environmental Impact Assessment*", "*Environmental Performance*", "*Evaluating Environmental Impacts*", "*Environmental Evaluation*", "*Environmental Benefit Analysis*", "*Environmental Sustainability*" e "*Environmental Cost Benefit Analysis*". Na barra de busca das bases *Web of Science* e *Scopus*, os blocos foram unidos por operadores booleanos AND, unindo os blocos, e OR, para sinônimos.

Após a busca, os artigos passaram por triagem em múltiplas fases. Inicialmente, realizou-se a filtragem por títulos, palavras-chave e resumos para verificar a aderência ao escopo. Os estudos selecionados seguiram para leitura integral, sendo incluídos no portfólio final apenas aqueles alinhados à implantação da compostagem sob a ótica de políticas públicas, fatores condicionantes e sustentabilidade, baseando a análise e discussão dos resultados. A partir desse portfólio, a análise bibliométrica incluiu a construção de gráficos de nuvem de palavras, publicações por ano e distribuição por países, além da avaliação do fator de impacto dos periódicos e do número de citações na Scopus, visando aferir a relevância científica. Já na análise bibliográfica, após leitura completa, foram discutidos os fatores nas dimensões legal, econômica, ambiental e social que influenciam a adoção da compostagem como política pública.

Resultado e Discussão

Foram obtidos 100 artigos na primeira etapa de filtragem (títulos, palavras-chave e resumos). Após isso, 29 artigos foram lidos por completo e 10 artigos compuseram, então, o portfólio final. Os artigos selecionados estão descritos no Quadro 1.

Título	Autor(es)	Ano de publicação	Citações na *Scopus*	Periódico	CiteScore
Stakeholders' social acceptance of a new organic waste management policy in the city of Florianópolis (Brazil)	Di Fiore *et al.*	2022	18	Journal of Cleaner Production	20,7
Waste Management through Composting: Challenges and Potentials	Aylara *et al.*	2020	783	Sustainability	7,7
Integrating community perspectives into domestic food waste prevention and diversion policies	Benyam, Kinnear, Rolfe	2018	45	Resources, Conservation and Recycling	24,7
Waste generation and pro-environmental behaviors at household level: A citizen science study in Buenos Aires (Argentina)	Pierini *et. al*	2021	36	Resources, Conservation and Recycling	24,7
Monitoring and evaluation of prevention activities regarding household organics waste from insular communities	Zorpas *et al.*	2018	62	Journal of Cleaner Production	20,7
Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects	Onwosi *et al.*	2017	604	Journal of Environmental Management	14,4
Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies	Wainaina *et al.*	2020	467	Bioresource Technology	20,7
Biological valorization of urban solid biowaste: A study among circular bioeconomy start-ups in France	Costa *et al.*	2024	8	Sustainable Chemistry and Pharmacy	8,8
Household food waste composting habits and behaviours in Hungary: A segmentation study	Kunszabó *et al.*	2022	22	Sustainable Chemistry and Pharmacy	8,8
Factors Associated with Composting of Solid Waste at Household Level in Masaka Municipality, Central Uganda	Nsimb *et al.*	2018	21	Journal of Environmental and Public Health	Sem medida

Quadro 1: Portfólio final de artigos.
Fonte: Elaborados pelos autores (2026)

As principais palavras-chave utilizadas nos artigos do portfólio dessa pesquisa encontram-se ilustradas na nuvem de palavras da Figura 1, onde o tamanho da fonte simboliza a recorrência em que o termo foi encontrado nas fontes pesquisadas. As principais palavras-chave que foram utilizadas estão relacionadas à compostagem, incluindo *composting*, *compost, organic waste*, *domestic waste* e *food waste.* Elas estão relacionadas às principais dimensões que influenciam na escolha da compostagem ao longo do tempo como tratamento para fração de resíduos orgânicos, como *solid waste management, waste treatment, circular economy, waste disposal* e *recycling.* Isto mostra que os artigos encontrados estão de acordo com o tema de estudo e que à luz da academia internacional tem-se investigado de que forma os resíduos orgânicos provenientes de fontes diversas podem ser destinados de forma adequada, o que corrobora com a Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010, que diz que a "destinação final ambientalmente adequada é a destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos" (Brasil, 2010).



Figura 1: Nuvem das principais palavras-chave dos artigos do portfólio final.
Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

No que tange aos países que mais publicaram sobre o tema dentro do portfólio final, observa-se pela Figura 2, que embora conste países desenvolvidos como França, Holanda, Hungria e Austrália, os principais países produtores deste conteúdo são países em desenvolvimento (Argentina, China, Nigéria e Uganda), onde legislações nacionais que incentivam o uso da compostagem como política pública são recentes. Para exemplificar, a Argentina, em sua Resolução 19/2019, implementou a possibilidade de reconhecimento legal do composto produzido a partir de resíduos domésticos, visando a ampliação da adoção da compostagem (Moreno; Schamber, 2024). Já a China, também em 2019, implementou a classificação de resíduos domésticos, o que possibilitou o surgimento de oportunidades para a indústria da compostagem, visto que entre 50% e 60% dos resíduos domésticos deste país são perecíveis e dominados por matéria orgânica (Cui; Xi; Tan, 2023). Sendo assim, observando que essas normativas são recentes, pode-se inferir que tais países tem investigado mais profundamente o tema da compostagem e por isso surgem na Figura 2 como principais autores dos trabalhos do portfólio final.



Figura 2: Mapa de países que publicaram os artigos do portfólio final.
Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Por último, em se tratando da quantidade de artigos do portfólio final publicados por ano, observa-se a partir da Figura 3 um pico de publicação em 2018, mas nos anos seguintes, mesmo com uma queda, houve 60% das publicações dos artigos do portfólio.

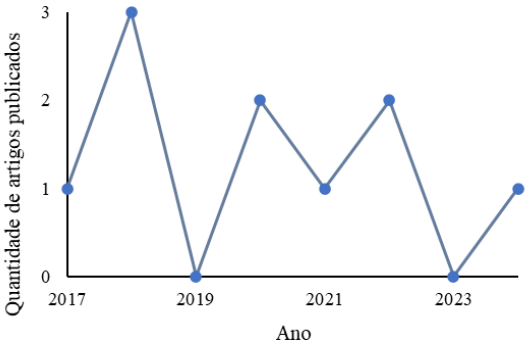


Figura 3: Quantidade de artigos do portfólio final publicados por ano.
Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Além disso, as revistas onde estes trabalhos foram publicados possuem alto nível de relevância no meio científico, com fatores de impacto (CiteScore) elevados. Pode-se citar, como exemplo, as revistas *Journal of Cleaner Production, Bioresource Technology* e *Resources, Conservation and Recycling*, que possuem fator de impacto acima de 20 (Quadro 1), o que indica se tratar de periódicos de renome no meio do saneamento e resíduos sólidos. Ademais, pode-se observar também a partir do Quadro 1, que alguns artigos possuem alto número de citações na *Scopus,* por exemplo o trabalho *Waste Management through Composting: Challenges and Potentials,* de Aylara *et al.* (2020), com 783 citações, o que corrobora com a importancia do tema de estudo.

A análise dos artigos selecionados evidenciou diferentes abordagens metodológicas empregadas para identificar os fatores que influenciam a adoção da compostagem como alternativa de tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos. Observou-se que parte significava dos estudos, 50%, refere-se à aplicação de questionários e entrevistas com stakeholders e utilização de dados oficiais provenientes de órgãos governamentais (50%) (Di Fiore *et al*., 2022; Benyam *et al*., 2018; Kunszbó *et al*., 2022; Nsimb *et al*., 2018.), metodologia frequentemente empregada para compreender percepções, barreiras e incentivos associados à adoção da compostagem por gestores públicos, empresas ou pela população. De forma complementar, observa-se que uma parcela relevante das pesquisas (40%) se baseia em revisões de literatura (Aylara *et al*., 2020; Onwosi *et al*., 2017; Wainaina *et al*., 2020), utilizadas para sistematizar conhecimentos prévios e identificar fatores técnicos, econômicos, sociais e ambientais que condicionam a implementação da compostagem em diferentes contextos. Adicionalmente, em menor proporção, alguns estudos realizam experimentos de compostagem em escala laboratorial ou piloto (10%) (Zorpas *et al*., 2018), com o objetivo de avaliar parâmetros operacionais e desempenho do processo.

A literatura científica demonstrou que a eficiência e a adoção da compostagem são influenciadas por diferentes fatores que podem ser agrupados em quatro categorias principais: fatores sociais, econômicos, políticos e ambientais, as quais permitem compreender de forma integrada os condicionantes que influenciam a implementação dessa tecnologia no contexto da gestão de resíduos orgânicos (Aylara *et al*., 2020; Pierini *et al*., 2021; Di Fiore *et al*., 2022). A compreensão integrada desses elementos é essencial para garantir o bom desempenho do processo e a implementação bem-sucedida de programas de tratamento da fração orgânica dos resíduos. Estudos recentes também reforçam que o desenvolvimento de programas de compostagem depende da interação entre políticas públicas, viabilidade econômica, participação social e benefícios ambientais associados ao tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (Palesaraei; Hamidinasab, 2025).

A dimensão legal está relacionada ao conjunto de leis, normas e instrumentos regulatórios que orientam a gestão de resíduos orgânicos e a adoção de tecnologias de tratamento, como a compostagem. A existência de marcos regulatórios, como criação de leis, taxações, punições e incentivos fiscais podem incentivar a separação na fonte, a valorização da fração orgânica e a implementação de sistemas de compostagem em nível municipal ou regional (Pierini *et al*., 2021; Di Fiore *et al*., 2022).

A dimensão política envolve o papel das políticas públicas, estratégias governamentais e participação institucional na promoção da compostagem. O apoio de governos locais, o engajamento de stakeholders e estratégias integradas de gestão de resíduos são fundamentais para viabilizar esses programas (Di Fiore et al., 2022). Políticas com metas de redução de resíduos em aterros, instrumentos voltados à economia circular e diretrizes para gestão sustentável atuam como importantes indutores, contribuindo para a expansão da compostagem, especialmente em contextos que buscam mitigar impactos da disposição final (Jiao et al., 2025). Além disso, ações de educação ambiental e conscientização, associadas à influência social e à disponibilidade de infraestrutura, são determinantes para estimular a adesão de cidadãos e instituições (Pereira; Fiore, 2024).

Além dos aspectos legais e políticos, a literatura destaca que a adoção da compostagem também está fortemente associada à sua viabilidade econômica, que é um dos principais fatores considerados na implementação de sistemas de compostagem. Os custos relacionados à infraestrutura, operação, transporte e manutenção das unidades de compostagem podem influenciar a adoção dessa tecnologia em comparação com alternativas de tratamento de resíduos orgânicos. Desta maneira, que a viabilidade financeira desses sistemas depende de fatores como escala de operação, capacidade de processamento, disponibilidade de materiais estruturantes e condições de mercado para o composto produzido (Su *et al*., 2024; Ansar *et a*l., 2025). Adicionalmente, a comercialização do composto gerado no processo de compostagem pode contribuir significativamente para a sustentabilidade econômica desses sistemas, uma vez que a venda do produto auxilia na compensação dos custos operacionais e no fortalecimento da cadeia de valorização dos resíduos orgânicos (Ayilara *et al*., 2020; Costa *et al*., 2024).

Nesse contexto, a literatura também destaca o papel das políticas públicas no estímulo à viabilidade econômica da compostagem. De acordo Behroozia *et al*. (2020) e Murillo *et al*. (2022), os governos devem fornecer subsídios financeiros suficientes para atrair o investimento do setor privado, como indústrias e/ou empresas e outros entes, para promoção da compostagem e o reaproveitamento dos resíduos. Além disso, leis que incentivam a compostagem são um passo importante em direção sustentabilidade do gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos (Di Fiore *et al*., 2022; Sanjuan-Delmás *et al*., 2021).

Uma política pública eficaz deve integrar a gestão de resíduos com a produção de alimentos, criando um mercado favorável que priorize o uso de adubos orgânicos em detrimento dos fertilizantes tradicionais (Onwosi *et al*.,2017).

Na dimensão ambiental a compostagem consegue afastar grande parte de resíduos orgânicos que iriam para aterro sanitários ou lixões reduzindo odor, contaminação de solo e água, proliferação de vetores e redução dos gases de efeito estufa (Di Fiore *et al*., 2022; Onwosi *et al*., 2017; Zorpas *et al*., 2018). O processo consegue transformar resíduos húmus ricos em nutrientes, que atuam como fertilizante natural, condicionador de solo, o que promove a substituição de fertilizantes químicos possibilitando a agricultura urbana, porém, se a compostagem não for bem manejada e planejada, torna-se um fator limitante devido à possibilidade de proliferação de doenças e vetores, contaminação de solo e água (Di Fiore *et al*., 2022; Onwosi *et al.*).

De acordo com Onwosi *et al*. (2017), um ponto crítisco desta dimensão é a necessidade de controle rigoroso para evitar que a própria atividade de compostagem gere poluição. Isso inclui o manejo do chorume para proteger lençóis freáticos e a mitigação de emissões gasosas (como metano e óxido nitroso) que possuem alto potencial de aquecimento global.

A dimensão social refere-se criação de empregos, aumento da segurança alimentar (uso do composto como fertilizante), separação dos resíduos, educação ambiental, aceitação do tratamento e conhecimento da técnica. Um dos principais aspectos para o sucesso das políticas de compostagem depende quase que inteiramente do comportamento e aceitação cidadã, auxiliando na separação correta na fonte pelos cidadãos. Alguns fatores como falta de tempo, desinteresse ou o fator NIMBY (Not In My Bacck Yard - rejeição a ter instalações perto de casa) acabam dificultando a adesão. (Di Fiore *et al*., 2022; Pierini *et al*., 2021; 2017; Zorpas *et al*., 2018; Kunszbó *et al*., 2022). A educação e confiança no sistema também entram como lacuna importante, a falta de conhecimento técnico e a desconfiança de que o sistema público realmente irá reciclar o resíduo separado são uma das grandes barreiras encontradas (Zorpas *et al*., 2018; Pierini *et al*., 2021). Campanhas de educação ambiental, principalmente envolvendo crianças e líderes comunitários, são essenciais para mudar esse quadro (Pierini *et al*., 2021; Benyam; Kinnear; Rolfe, 2018; Zorpas *et al*., 2018).

Ainda relacionado a dimensão social, segundo Onwosi *et al*. (2017), a compostagem pode ser apresentada como uma solução essencial para os desafios gerados pelo crescimento populacional e urbanização acelerada, especialmente em países em desenvolvimento, onde a gestão de resíduos é um gargalo social.

A compostagem doméstica/ de quintal foi identificada como a opção de política preferencial entre os residentes consultados, demonstrando que existe uma predisposição positiva para a adoção desta prática em nível domiciliar (Benyam *et al*., 2018).

Nesse contexto, a disseminação de informações qualificadas sobre os benefícios e limitações da compostagem torna-se fundamental para fortalecer a aceitação social da tecnologia. Outro fator de influência destacado na busca bibliográfica foi a atenuação que a compostagem pode oferecer aos impactos ambientais que outros tratamentos biológicos podem gerar, como emissão de odor e contaminação dos solos e recursos hídricos (Mancini *et al*., 2019; Di Fiore *et al*., 2022). Por isso, a formação de agentes ambientais é essencial para o conhecimento dos benefícios da compostagem, suas vantagens e desvantagens e como pode-se evitar os possíveis impactos, além de seus benefícios no gerenciamento de resíduos orgânicos (Zorpas *et al*., 2018).

Comentários Finais

Este estudo cumpriu seu objetivo ao identificar e analisar, por meio de uma revisão bibliográfica estruturada, os fatores determinantes para a implementação da compostagem como política pública no tratamento de resíduos orgânicos. A pesquisa evidenciou que, embora a compostagem seja uma técnica de baixo custo e biologicamente eficiente, sua aplicação em larga escala ainda enfrenta barreiras multifacetadas que transcendem a dimensão puramente técnica.

A análise do portfólio bibliográfico revelou que o sucesso dessa prática depende de um conjunto de fatores inter-relacionados. A compostagem afirma-se como uma estratégia vital para a mitigação das alterações climáticas, ao reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Além disso, o retorno da matéria orgânica ao solo promove o sequestro de carbono, a recuperação de solos degradados e a preservação dos ciclos de nutrientes, alinhando a gestão de resíduos aos princípios da Economia Circular.

O engajamento da comunidade e a aceitação dos *stakeholders* são fundamentais, sendo frequentemente condicionados por programas de educação ambiental e pela vontade política das lideranças locais em transformar a percepção dos resíduos orgânicos.

A existência de legislações robustas e diretrizes municipais claras atua como um indutor direto para a triagem na fonte e o reconhecimento legal do composto produzido, garantindo segurança jurídica para as operações. Nesse contexto, a disponibilidade de recursos financeiros e a criação de mercados para o composto orgânico continuam a ser os principais desafios, especialmente em países em desenvolvimento, onde a viabilidade económica depende da redução de custos logísticos e de incentivos governamentais.

Desta maneira, conclui-se que a discrepância entre a simplicidade do processo biológico e a sua limitada adoção institucional decorre da complexidade em gerenciar estas múltiplas variáveis simultaneamente. Para que a compostagem se consolide como política pública, é indispensável uma visão sistémica que reconheça os seus benefícios ambientais como ativos económicos e sociais. O estudo reafirma que a valorização da fração orgânica não é apenas uma necessidade técnica, mas uma estratégia prioritária para o desenvolvimento urbano sustentável e a resiliência climática.

As limitações deste estudo incluem o foco exclusivo em bases de dados internacionais e literatura em inglês, o que pode ter omitido experiências locais e literatura cinzenta relevante. Para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de estudos de caso no cenário brasileiro para validar estes fatores frente ao Novo Marco Legal do Saneamento. Sugere-se ainda o desenvolvimento de indicadores de custo-benefício que contabilizem as externalidades ambientais, fornecendo dados mais precisos para a tomada de decisão de gestores municipais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) pelo conhecimento e suporte, e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes) pelo apoio financeiro concedido.

Referências Bibliográficas

ANSAR, A.; DU, J.; JAVED, Q.; ADNAN, M.; JAVAID, I. Biodegradable Waste in Compost Production. A Review of Its Economic Potential. **Nitrogen**, v.6, n.2, 2025.

AYILARA, M.S.; OLANREWAJU, O.S.; OLIKUBOLA, O.B.; ODEYEMI, O. Waste Management through Composting: Challenges and Potentials. **Sustainability**, v.12, n.11, 2020.

BEHROOZNIA, L.; SHARIFI, M.; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H. Comparative life cycle environmental impacts of two scenarios for managing an organic fraction of municipal solid waste in Rasht-Iran**. Journal of Cleaner Production**, v.268, n.20, 2020.

BENYAM, A.; KINNEAR, S.; ROLFE, J. Integrating community perspectives into domestic food waste prevention and diversion policies. **Resources, Conservation and Recycling**, v.134, p.174-183, 2018.

COSTA, S.; DONNER, M.; DUQUENNOI, C.; SAVARY, V. Biological valorization of urban solid biowaste: A study among circular bioeconomy start-ups in France. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v.39, 2024.

CUI, D.; XI, B.; TAN, W. Composting industry under the Chinese municipal solid waste sorting policy: challenges, opportunities, and directions. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 8, p. 19513-19519, 2023.

DI FIORE, G.; SPECHT, K.; ROVVER, O.J.; ZANASI, C. Stakeholders' social acceptance of a new organic waste management policy in the city of Florianópolis (Brazil). **Journal of Cleaner Production**, v.379, n.2, 2022.

EBRAHIMI, M.; GHOLIPOUR, S.; MOSTAFAII, G.; YOUSEFIAN, F. Biochar-amended food waste compost: A review of properties. **Results in Engineering**, v. 24, 2024.

HETTIARACHCHI, H., MEEGODA, J. N., & RYU, S. Organic waste buyback as a viable method to enhance sustainable municipal solid waste management in developing countries. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.15, n.2483, 2018.

JIAO, F.J.; LI, C.; XIE, H.; LI, H. Advancing biomass fermentation and composting for global sustainability: A bibliometric perspective (2019–2024). **Discover Sustainability**, v.6, n.667, 2025.

KADHILA, T., DE WIT, M. P., SCHENCK, R. A conceptual framework for sustainable waste management in small municipalities: The cases of Langebaan, South Africa and Swakopmund, Namibia. **Environmental Science and Pollution Research**, v.30, 2023.

KHUDZARI, J.M.; KURIAN, J.; TARTAKOVSKY, B.; RAGHAVAN, G.S.V. Bibliometric analysis of global research trends on microbial fuel cells using Scopus database. **Biochemical Engineering Journal**, v. 136, p. 51–60, 2018.

KUNSZABÓ, A.; SZAKOS, D.; DORKÓ, A.; FARKAS, C.; KASZA, G. Household food waste composting habits and behaviours in Hungary: A segmentation study. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v.30, 2022.

LALITHA, R.; FERNANDO, S. Solid waste management of local governments in the Western Province of Sri Lanka: An implementation analysis. **Waste Management**, v.84, p.194–203, 2019.

MANCINI. E.; ARZOUMANIDIS, I.; RAGGI, A.; Evaluation of potencial environmental impacts related to two organic waste treatment options in Italy. **Journal of Cleaner Production**, v.141, n.20, 2019.

MORENO, I. R.; SCHAMBER, P. J. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en Argentina. Normativas que condicionan su tratamiento y experiencias que proyectan potencialidades en la Región Metropolitana de Buenos Aires.**Cuaderno urbano**, v. 38, n. 38, p. 137-140, 2024.

MURILLO, U.L.M.; VILLEGAS, L.M.; ORTIZ, R.A.R.; ACEVEDO, D.M.; GARCÍA-CORTÉS, F.J. Management of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in the Context of a Sustainable and Circular Model: Analysis of Trends in Latin America and the Caribbean. **International Journal of Environmental Reasearch and Public Health**, v,19, n.10, 2022.

ONWOSI, C.; IGBOKWE, V.C.; ODIMBA, J.N.; EKE, I.E.; NWANKWOALA, M.O.; IROH, I.N.; EZEOGU, L.I. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. **Journal of Cleaner Production**, v.190. n.1, p.140-157, 2017.

PALESARAEI, A.N.; HAMIDINASAB, B. Systematic life cycle assessment of food waste management via composting technologies: An integrative review. **Science of The Total Environment**, v.1003, 2025.

PEREIRA, V.R.; PIORE, F.A. Opportunities and Barriers to Composting in a Municipal Context: A Case Study in São José dos Campos, Brazil. **Sustainability**, v.16, n.24, 2024.

PIERINI, V.I.; MAZZEO, N.; CAZENAVE, M.; SEMMARTI, M. Waste generation and pro-environmental behaviors at household level: A citizen science study in Buenos Aires (Argentina). **Resources, Conservation and Recycling,** v.170, 2021.

RAHMANI, Y.; PARASHKOOHI, M.G.; AFSHARI, H.; MOHAMMADI, A. Enhancing sustainability of urban waste management through data envelopment analysis for municipal solid waste composting in Tehran, Iran. **Cleaner Engineering and Technology**, v.21, 2024.

SALVADOR, Rodrigo et al. Life cycle assessment of electricity from biogas: A systematic literature review. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 38, n. 4, 2019.

SANJUAN-DELMÁS, D.; TAELMAN, S.E.; ARLANI, A.; OBERSTEG, A.; VÉR, C.; ÓVARI, A.; TONINI, D.; DEWULF, J. Sustainability assessment of organic waste management in three EU Cities: Analyzing stakeholder-based solutions. **Waste Management**, v.132, n.1, 2021.

SAYARA, T.; BASHEER-SALIMIA, R.; HAWAMDE, F.; SÁNCHEZ, A. Recycling of Organic Wastes through Composting: Process Performance and Compost Application in Agriculture. **Agronomy**, v.10, n.11, 2020.

SHARMA, A.; SONI, R.; SONI, S.K. From waste to wealth: exploring modern composting innovations and compost valorization. **Journal of Material Cycles and Waste**, v.26, p.20-48, 2024.

SOLIS, Blandy Pamplona et al. Bibliometric analysis of the mass transport in a gas 129 diffusion layer in PEM fuel cells. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 23, 2019.

SU, Y.; ZHOU, S.; TIAN, P.; QI, C.; XU, Z.; ZHANG, Y.; HUH, S.Y.; LUO, W.; LI, G.; LI, Y. Techno-economic assessment of industrial food waste composting facility: Evaluating bulking agents, processing strategies, and market dynamics. Bioresource Technology, v.408, 2024.

WAINAINA, S.; AWASTHI, M.K.; SARSAIYA, S.; CHEN, H.; SINGH, E.; KUMAR, A.; KUMAR, S.; ZHANG, Z.; TAHERZADEH, M.J. Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion Technologies. **Bioresource Technology**, v.301, 2020.

WANG, S.; YANG, Z. Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review. **Biosource Technology**, v.248, p.13-19, 2018.

XUE, Y.; MORENO, J.M.; LI, C. Growing community-based composting programs in China: Implementation and policy lessons from eight cases. Resources, **Conservation and Recycling**, v.212, 2025.

ZORPAS, A.A.; LASARIDI, K.; POCIOVALISTEANU, D.M.; LOIZIA, P. Monitoring and evaluation of prevention activities regarding household organics waste from insular communities. **Journal of Cleaner Production**, v.172, n.20, 2018.

GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE: UM ESTUDO DE CASO EM MUNICÍPIOS DO ESPÍRITO SANTO

Juliana Salomão Das Neves, Janaína Rodrigues Ferreira, Juliana Glicerio Dazzi Bissoli, Ailla Cavatti Lopes, Katarina Da Silva Couto, Walter Igor Gomes Da Cruz, Rodrigo Pratte Santos, Renato Ribeiro Siman

1 Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e-mail: juliana.neves@edu.ufes.br; 2 Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e-mail: janaina.ferreira@edu.ufes.br; 3 Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e-mail: juliana.dazzi@edu.ufes.br; 4 Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e-mail: ailla.lopes@edu.ufes.br; 5 Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e-mail: katarina.couto@edu.ufes.br; 6 Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e-mail: walter.i.cruz@edu.ufes.br; 7 Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e-mail: rodrigo.pratte@ufes.br; 8 Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e-mail: renato.siman@ufes.br

Palavras-chave: Sustentabilidade Financeira, Disposição a pagar; Resíduos de Serviços de Saúde.

Resumo

Com o desenvolvimento econômico e tecnológico, houve um avanço da geração de resíduos sólidos, incluindo os provenientes de serviços de saúde (RSS). Devido às suas peculiaridades, estes resíduos, requerem a aplicação do orçamento com seu manejo. Com isso, uma forma de averiguar o valor cobrado é através do estudo da disposição a pagar (DAP) e da verificação dos fatores que impactam na sua implementação. A partir de um estudo de caso, que foi aplicado em dois municípios do Espírito Santo, por meio de questionários, analisou-se a influência de diferentes fatores na DAP dos estabelecimentos geradores de RSS. Os resultados indicaram que, embora o conhecimento sobre o Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde (PGRSS) e sobre a legislação específica tenha sido percebido como um dos fatores mais relevantes por parte dos responsáveis, sua influência não se mostrou uniforme entre os Município B (menor população e legislação específica recentemente implantada) e Munícipio A (maior população e legislação mais consolidada). Em contraste, o conhecimento sobre a insustentabilidade financeira do serviço de manejo demonstrou maior potencial de sensibilização em um dos municípios estudados. Por fim, observou-se que ambos os municípios alegaram que conhecer o destino da arrecadação com a cobrança é importante para estar apto ao pagamento pelo manejo.

Introdução

Os resíduos de serviços de saúde (RSS) são aqueles oriundos do atendimento à saúde humana ou animal, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS (Brasil, 2010). No que tange à geração de RSS, e a partir dos dados declarados por 752 municípios ao SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos) no ano de 2020, mais de 39,2 milhões de toneladas foram geradas (SINIR, 2020). Entre os fatores que impactam esta geração, pode-se citar as características do estabelecimento (WHO, 1999), o elevado uso de materiais descartáveis e o consumismo exacerbado (Sisinno, Moreira; 2005), além do desenvolvimento econômico dos países (Schneider et al., 2001). Essa elevada geração de RSS e as peculiaridades destes resíduos acarretam uma complexidade do gerenciamento, o que torna o manejo dos mesmos oneroso aos municípios. Para exemplificar, no ano de 2022, o poder público dispendeu R$ 63,5 milhões somente com a coleta de RSS.

De modo a reduzir esta despesa e aplicando o princípio do poluidor-pagador, o poder público passou a responsabilizar os estabelecimentos de serviços de saúde em relação ao manejo de seus resíduos. É o caso da Prefeitura Municipal de Vitória – ES, que através do Art. 2° do Decreto n° 20.413, traz que "os estabelecimentos geradores de resíduos provenientes de serviços de saúde deverão assumir a responsabilidade pela coleta, transporte e disposição final, nos termos da Lei Federal n° 12.305, de 02 de agosto de 2010". Com isso, o serviço de manejo pode ser realizado por empresa contratada pelo gerador ou pela municipalidade, mediante pagamento do preço público local (Vitória, 2022). Além disso, os estabelecimentos de serviços de saúde estão sujeitos à elaboração de Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde (PGRSS) (Brasil, 2010).

Porém, uma discussão que vem ganhando força é em relação ao preço praticado pela municipalidade e pelas empresas privadas para o gerenciamento dos resíduos sólidos. Um ponto importante é a implantação de um preço considerado justo pelos usuários do serviço de manejo, para que a aceitação seja maior e contribua para o crescimento da arrecadação (BATLLEVELL; HANF, 2008; LAKHAN, 2015). Por isso, o conceito de disposição a pagar (DAP) e os fatores que podem impactar nesta são inseridos neste contexto.

Material e Métodos

Para investigar a influência de determinados fatores na DAP pelo manejo de RSS em municípios do Espírito Santo, foram desenvolvidos e aplicados questionários composto de perguntas objetivas os quais abordava buscaram investigar os conhecimentos da existência de PGRSS, da legislação específica que impunha a cobrança, da insustentabilidade financeira municipal para a execução de manejo de resíduos, bem como do destino da arrecadação pelo gerenciamento dos RSS na Disposição ao Pagamento (DAP) pelo seu gerenciamento.

O questionário foi aprovado pelo Comitê de Ética da Universidade Federal do Espírito Santo, a partir do parecer consubstanciado nº 63183322.0.0000.5542. Após aprovação, o questionário foi aplicado aos estabelecimentos de serviços de

saúde de dois municípios do Espírito Santo, aqui denominados como Município A (467 mil habitantes) e Município B (94 mil habitantes) (IBGE, 2022). Os questionários foram aplicados à 41 estabelecimentos do Município A e 24 do Município B.

Para mensurar este impacto das variáveis investigadas na DAP pelo gerenciamento dos RSS, utilizou-se a escala Likert de 5 pontos, como forma de ordenar as respostas qualitativas.

Resultados e Discussão

A partir dos resultados obtidos com a aplicação do questionário, observou-se que, para o Município A, a parcela de estabelecimentos que não possuem PGRSS é de 56%, enquanto 34% possuem o plano e 10% não souberam informar sobre sua existência, valores que vão na contramão do que é estabelecido pela PNRS (Brasil, 2010). Já para o Município B, 58% dos estabelecimentos entrevistados possuem PGRSS, porém 42%, percentual também elevado, não possuem o plano estabelecido. Esses dados demonstram a persistência de falhas no cumprimento de uma legislação implementada em 2010, já em vigor há 14 anos. É visível que uma política de comando-controle mais rígida é necessária para que os estabelecimentos elaborem seus PGRSS, visto que o mesmo possibilita o fornecimento de informações para o gerenciamento de seus resíduos, bem como o estabelecimento de procedimentos para o manejo seguro dos RSS, desde a segregação na fonte, acondicionamento, transporte interno, armazenamento temporário, tratamento, armazenamento externo, coleta e transporte externos, até a disposição final dos rejeitos (ANVISA, 2004). Para aqueles estabelecimentos que possuíam PGRSS, a pesquisa buscou identificar o impacto que o conhecimento do plano tem na Disposição ao Pagamento (DAP) para o gerenciamento de seus resíduos. Como pode ser observado na Figura 1, aproximadamente 25% dos entrevistados nos dois municípios percebem a necessidade do pagamento, e para piorar o cenário, quase 30 % dos entrevistados do município B declararam discordar da necessidade de pagamento pelo gerenciamento de seus resíduos. É importante ressaltar que o conhecimento do PGRSS permite entender o manejo e o gerenciamento dos resíduos sólidos e a DAP pelos mesmos foi direcionada erroneamente por alguns entrevistados como uma obrigação do poder público.

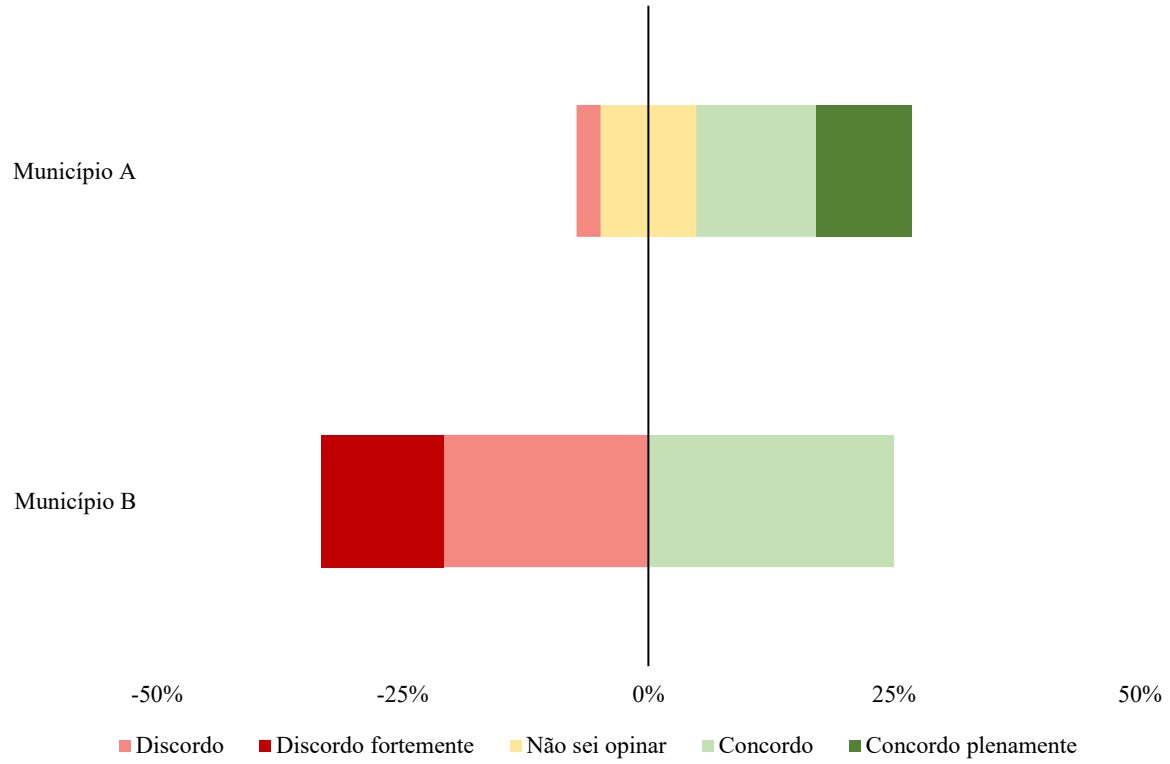


Figura 01: Conhecimento do PGRSS *versus* DAP pelo gerenciamento dos resíduos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para aprofundar esta análise, o segundo fator avaliado foi o conhecimento da legislação específica sobre a responsabilização dos estabelecimentos de serviços de saúde acerca do manejo de seus resíduos a cobrança pelo seu gerenciamento (Figura 2). Diferentemente do Município A, o cenário visto para a pergunta anterior se repetiu, com o Município B, onde os entrevistados discordaram novamente que o conhecimento da legislação impacta no quanto o estabelecimento está disposto a desembolsar para seu manejo. Então, parece que mesmo conhecendo a legislação que permite a cobrança não impactou na DAP. Porém, em se tratando do Município A, os entrevistados disseram concordar que um conhecimento mais aprofundado da lei impactava na DAP. Uma explicação para essa diferença pode ser creditada a maturidade da execução de uma legislação, que no Município A já encontrava instrução desde 2015, enquanto no B teve sua regulamentação apenas em 2022.

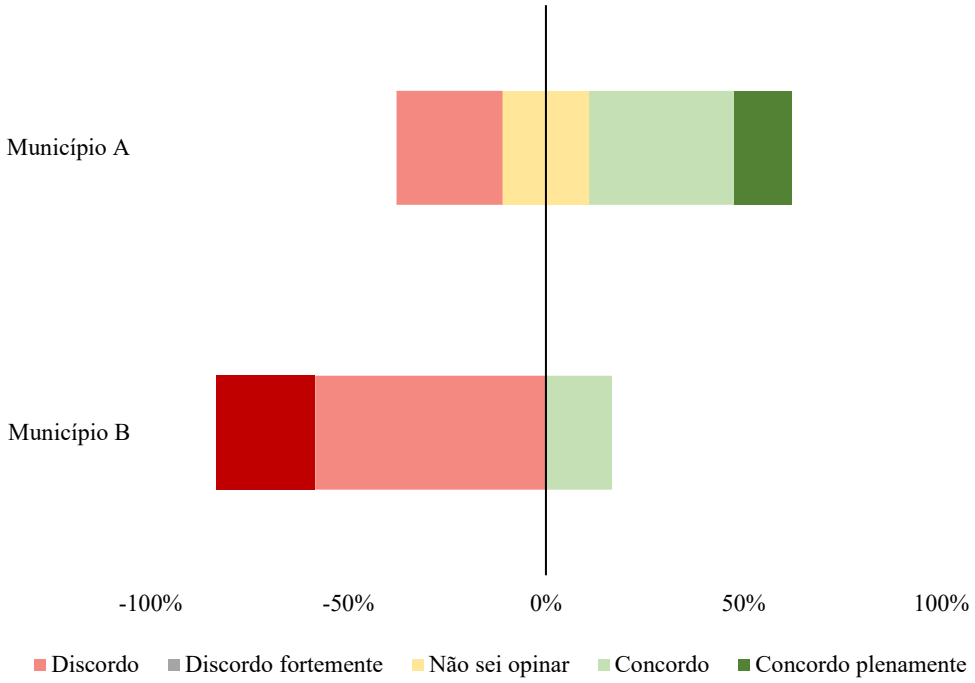


Figura 02: Conhecimento da legislação específica *versus* DAP pelo gerenciamento dos resíduos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O terceiro elemento analisado foi o efeito do conhecimento da insustentabilidade financeira do serviço de manejo de resíduos sólidos municipal na DAP pelo manejo de RSS (Figura 3). Em se tratando de resíduos sólidos urbanos (RSU), pouco mais de 50% das despesas com o gerenciamento de resíduos são supridas pelo que se arrecada com a cobrança pela execução do serviço (SNIS, 2021). Neste cenário, observou-se um equilíbrio entre a parcela que considera "pouco importante" conhecer esta problemática para estar apto a pagar pelo manejo com a parcela que diz ser "muito importante" ou "extremamente importante" para o Município A. Muitos respondentes alegaram a imposição da legislação como motivador para o pagamento pelo manejo e não uma comoção devido ao problema enfrentado pelas municipalidades, afirmando que a prefeitura já cobra impostos suficientes para arcar com tais despesas. Os entrevistados do Município B, em sua maioria, se mostraram mais aptos a pagar pelo manejo a partir do conhecimento do problema da insustentabilidade financeira.

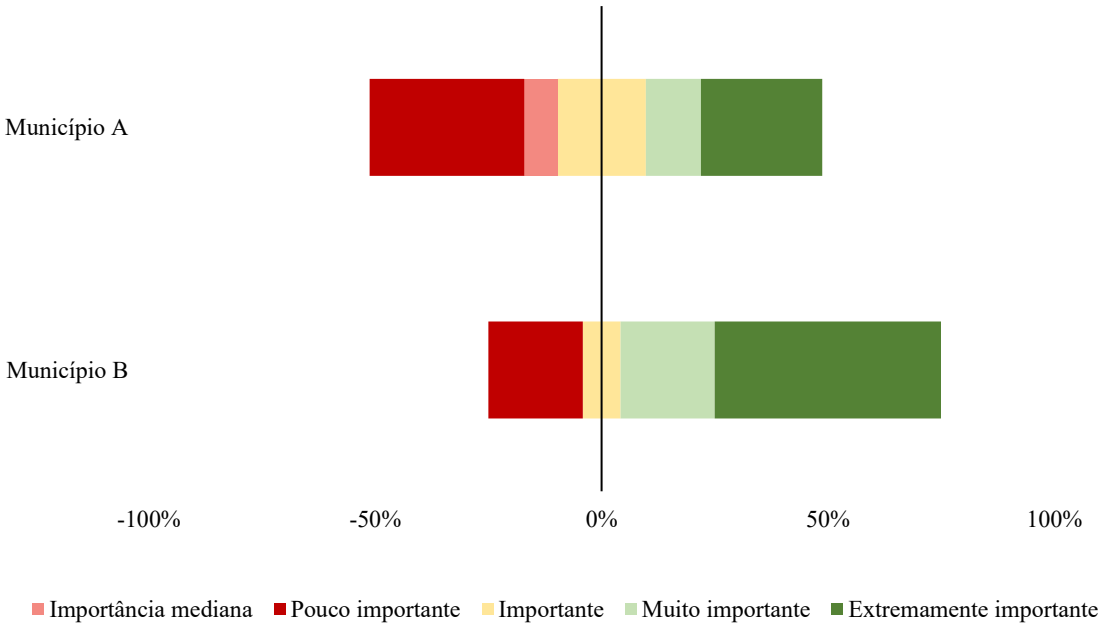


Figura 03: Conhecimento do problema da insustentabilidade financeira *versus* DAP pelo gerenciamento dos resíduos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O último fator analisado foi o impacto do conhecimento acerca da destinação da arrecadação do poder público com a cobrança, pelo manejo na aptidão ao pagamento. Este aspecto é de fundamental importância na implementação de uma política de cobrança, para que se tenha a confiança e uma maior adesão dos geradores, visando a autossuficiência financeira do serviço.

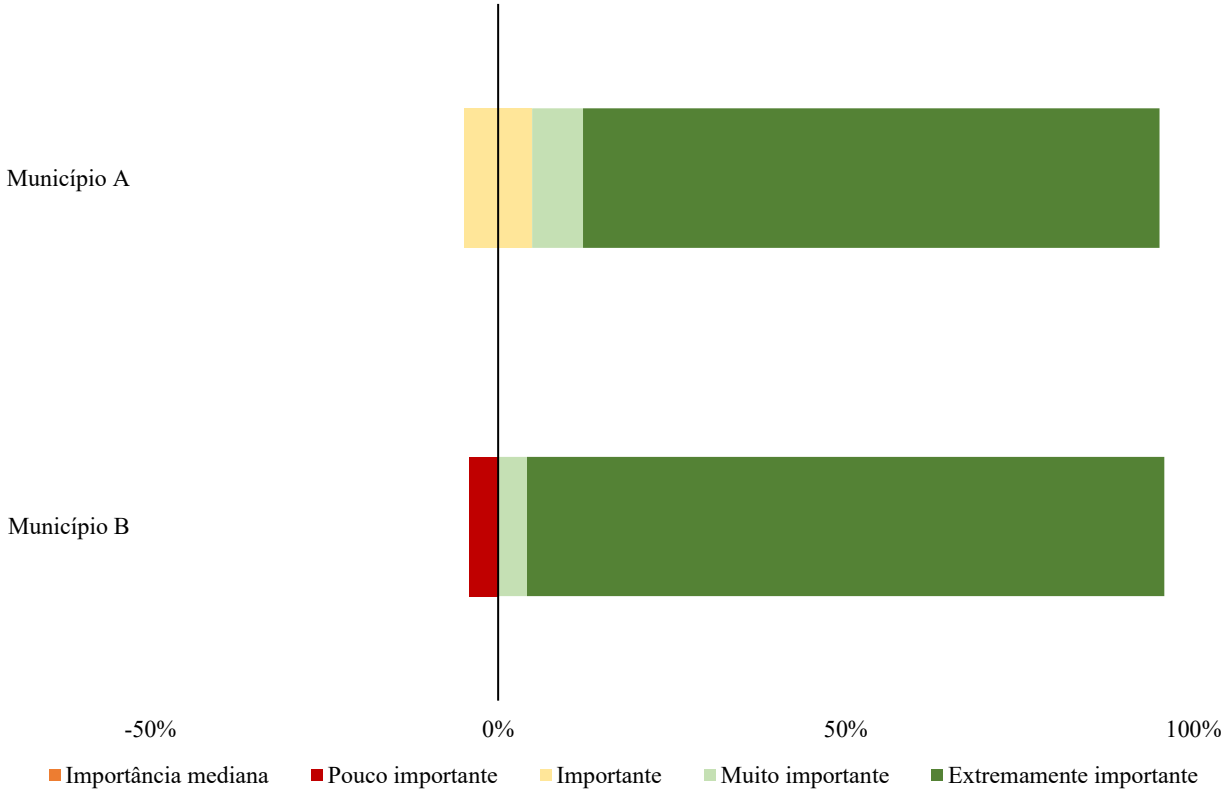


Figura 04: Conhecimento do destino da arrecadação *versus* DAP pelo gerenciamento dos resíduos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

De modo geral, a equidade na utilização de recursos é essencial para a tarifação e aceitação social. Segundo Lakhan (2015), a DAP é fortemente dependente da confiança institucional e da clareza dos benefícios associados, como o reinvestimento em infraestrutura. Assim, a convergência entre municípios sugere que estratégias de comunicação institucional sobre a aplicação das receitas podem atuar como instrumento prático para aumentar a adesão às cobranças e fortalecer a sustentabilidade financeira do serviço.

Conclusão

Com o avanço econômico e tecnológico, houve um aumento na geração de resíduos sólidos, incluindo aqueles provenientes de serviços de saúde, conhecidos como RSS. Esses resíduos, devido às suas características específicas, exigem altos custos de manejo, tornando sua gestão bastante onerosa para o setor público. Assim, ao responsabilizar os geradores, busca-se alcançar a chamada sustentabilidade financeira do serviço. No entanto, uma grande crítica dos geradores é em relação ao preço cobrado pelas prefeituras e empresas privadas de manejo. Dessa forma, uma maneira de verificar a justiça dos valores cobrados é através do estudo da disposição a pagar (DAP) e dos fatores que a influenciam.

Para este trabalho, foi realizado um estudo de caso em dois municípios do Espírito Santo, aplicando questionários aos estabelecimentos de serviços de saúde. O Município B, com menor população e legislação específica implementada mais recentemente, afirmou não acreditar que o conhecimento sobre o Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde (PGRSS) e sobre a legislação específica de responsabilização dos geradores impacte na DAP. Contudo, considera que entender o problema da insustentabilidade financeira é fundamental para estar disposto a pagar pelo manejo. Por outro lado, os geradores do Município A, localizado em uma região economicamente mais ativa do estado, acreditam que o conhecimento sobre o PGRSS e a legislação são cruciais para uma maior DAP, embora as opiniões sobre o impacto do problema da insustentabilidade financeira na DAP tenham sido equilibradas.

Ambos os respondentes dos Municípios A e B afirmaram ser “extremamente importante” entender o destino que o valor proveniente de taxas e tarifas terá, para que o estabelecimento de serviço de saúde se mostre apto ao pagamento. Por fim, ambos os municípios concordaram que saber o destino da arrecadação com a cobrança é importante para estar disposto a pagar pelo manejo.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada n° 306 de 7/12/04. Publicada no DOU de 10 dezembro de 2004.

BATLLEVELL, Marta; HANF, Kenneth. The fairness of PAYT systems: Some guidelines for decision-makers. Waste Management, v. 28, n. 12, p. 2793–2800, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.031>.

BRASIL. Lei No 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, p. 1–21, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades @ – municípios e estados do Brasil. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. Acesso em: 20 fev. 2026.

LAKHAN, Calvin. Stakeholder perceptions of unit based waste disposal schemes in Ontario, Canada. Resources, v. 4, n. 3, p. 434–456, 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos. 2020. SINIR. Disponível em: https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em 10 de junho de 2024.

SCHNEIDER, V.E.; EMMERICH, R.C.; DUARTE, V.C.; ORLANDIN, S.M (2001) Manual de gerenciamento de resíduos sólidos de serviços de saúde São Paulo: Baliero.

SISINNO, C.L.S.; MOREIRA, J.C. (2005) Ecoeficiência: um instrumento para a redução da geração de resíduos e desperdícios em estabelecimentos de saúde. Cadernos de Saúde Pública Rio de Janeiro, v. 21, n. 6, p. 1893-1900.

SNIS. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): base de dados – ano de referência 2021. Brasília: MDR, 2021. Disponível em: https://www.snis.gov.br. Acesso em: 5 mar. 2026.

VITÓRIA. Decreto nº 20.413. Regulamenta a lei nº 8.970, de 21 de junho de 2016, que dispõe sobre a prestação de serviços de coleta, transporte, tratamento e disposição final de resíduos provenientes de serviços de saúde, nos termos da Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, bem como o preço público correspondente e dá outras providências, no que tange os estabelecimentos grandes geradores de resíduos de saúde. Diário Oficial do Município de Vitória. 2022. Disponível em: < https://sistemas.vitoria.es.gov.br/atosnormativos/arquivos/2022/D20413.PDF>. Acesso em 10 de junho de 2024.

WORLD ORGANIZATION HEALTH (WHO). (1999) Safe management of wastes from health-care activities. Geneva: WHO.

DESIGUALDADES REGIONAIS NO ACESSO AO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL: UMA ANÁLISE ENTRE 2015 E 2024

1 Aionyna Rackel da Costa Fernandes, 2 Maria Letícia Barreto Queiroz, 3 Ana Julia Soares de Oliveira, 4 Emilli Carlos de Andrade Silva e 5 Weliton Freire Bezerra Filho

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Natal-Central, e-mail: rackel-costa@hotmail.com; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Natal-Central, e-mail: barretoqmaria7@gmail.com; 3Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Natal-Centra, e-mail:anajulia.soares8002@gmail.com; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Natal-Central, e-mail: emillicarlosandrade@gmail.com; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Natal-Central, e-mail: welitom.bezerra@escolar.ifrn.edu.br

Palavras-chave: Saneamento Básico; Desigualdade Regional; Políticas Públicas.

Resumo

O presente estudo analisa a evolução do acesso aos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil, com ênfase nas desigualdades regionais, no período de 2015 a 2024. A pesquisa utiliza dados secundários provenientes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), considerando as cinco macrorregiões brasileiras. Foram examinados indicadores de cobertura dos serviços, com comparação temporal e projeções exploratórias até 2033, em diálogo com o marco legal instituído pela Lei nº 14.026/2020. Os resultados evidenciam avanços graduais na ampliação do acesso, porém marcados por significativa heterogeneidade regional. As regiões Sul e Sudeste apresentam maiores níveis de cobertura, enquanto Norte e Nordeste concentram os maiores déficits, sobretudo no esgotamento sanitário. Observa-se, ainda, uma assimetria estrutural entre os serviços, com maior abrangência histórica do abastecimento de água em relação à coleta e tratamento de esgoto. A análise indica que, embora haja tendência de crescimento, as projeções sugerem dificuldades no alcance da universalização até 2033, especialmente nas regiões mais vulneráveis. Conclui-se que as desigualdades persistem como elemento central do setor de saneamento no país, demandando abordagens que considerem as especificidades territoriais e socioeconômicas na formulação de políticas públicas.

Introdução

O acesso aos serviços de saneamento básico constitui um dos principais desafios estruturais para o desenvolvimento social, econômico e ambiental no Brasil, sendo amplamente reconhecido como determinante essencial da saúde pública, da proteção dos recursos hídricos e da redução das desigualdades sociais (HELLER; PÁDUA, 2016; ANA, 2022).

A ausência ou precariedade dos serviços de saneamento básico está associada a maior incidência de doenças de veiculação hídrica, piores condições de moradia e maior vulnerabilidade socioambiental, e este problema é especialmente mais grave em populações de baixa renda, negras, pardas e indígenas residentes nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste (ANA, 2022; BOING; BOING; SUBRAMANIAN, 2021).

No contexto brasileiro, as desigualdades territoriais no acesso ao saneamento básico refletem processos históricos de ocupação desigual do território, concentração de investimentos em determinadas regiões e fragilidades institucionais na implementação de políticas públicas (ANA, 2022; TRATA BRASIL, 2023).

Estudos recentes, como o de Jesus, Monteiro e Tomasella (2023), têm demonstrado que a análise do acesso ao saneamento baseada exclusivamente em médias nacionais ou regionais pode mascarar desigualdades estruturais relevantes, ao ocultar variações significativas em diferentes escalas territoriais. Nesse sentido, evidências empíricas indicam que, mesmo em países de renda média como o Brasil, persistem padrões complexos de desigualdade espacial no acesso à água potável, os quais não são plenamente capturados por indicadores agregados, exigindo abordagens analíticas mais refinadas para a compreensão das disparidades no território.

Para enfrentar esses desafios, o setor de saneamento no Brasil passou, nas últimas décadas, por importantes transformações normativas e institucionais. O Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) estabeleceu diretrizes e metas de universalização progressiva dos serviços em âmbito nacional, reconhecendo a necessidade de reduzir déficits históricos e desigualdades regionais (BRASIL, 2019).

Mais recentemente, a Lei nº 14.026/2020, que atualiza o marco legal do saneamento, introduziu mudanças profundas na estrutura regulatória, com a fixação de metas de universalização até 2033, exigência de comprovação de capacidade econômico-financeira dos prestadores e estímulo à regionalização dos serviços (BRASIL, 2020).

Analisando algumas dessas mudanças, Costa (2023) argumenta que esse novo arranjo jurídico reforça a lucratividade estrutural do setor e amplia o espaço para agentes privados, ao mesmo tempo em que redefine o papel das companhias estaduais e dos municípios na governança do saneamento.

Nesse contexto, autores como Narzetti e Marques (2021) destacam o papel estratégico da regulação para induzir investimentos em áreas vulneráveis e, simultaneamente, alertam para o risco de que critérios estritamente econômicos aprofundem assimetrias territoriais na alocação de recursos.

Os autores ainda apontam que reformas institucionais no setor de saneamento, embora orientadas à ampliação da cobertura e à atração de investimentos, não garantem, por si só, a redução das desigualdades no acesso aos serviços. Em contextos marcados por forte heterogeneidade socioeconômica, como o brasileiro, a regulação desempenha papel central na mediação entre eficiência econômica e equidade social, sendo fundamental para assegurar que a expansão dos serviços alcance também as populações mais vulneráveis, historicamente excluídas das políticas públicas de saneamento

Apesar da existência desses instrumentos de planejamento e da atualização do marco legal, análises institucionais e setoriais indicam que a expansão dos serviços de saneamento no Brasil tem ocorrido de forma heterogênea no território nacional, com avanços mais rápidos em regiões e segmentos populacionais de maior renda e estagnação ou progresso lento nas áreas mais vulneráveis (ANA, 2022; COSTA, 2023; NARZETTI; MARQUES, 2021).

Nesse cenário, torna-se fundamental investigar não apenas os níveis absolutos de cobertura, mas também a evolução das desigualdades regionais ao longo do tempo, à luz das metas de universalização estabelecidas para 2033. Assim, este estudo tem como objetivo analisar a evolução das desigualdades regionais no acesso aos serviços de abastecimento de água e coleta de esgoto no Brasil entre 2015 e 2024, com base em dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), e projetando o cenário para 2025 a 2033. Foram utilizados indicadores de cobertura e percentual de população assistida entre os blocos regionais Norte/Nordeste e Sul/Sudeste, de modo a avaliar se os hiatos de acesso apresentam tendências de redução, manutenção ou ampliação no período analisado.

Material e Métodos

A pesquisa adotou abordagem quantitativa, descritiva, com análise longitudinal de dados secundários dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil, no período de 2015 a 2024. O foco recaiu sobre a comparação entre o período anterior à promulgação da Lei n° 14.026/2020 (2015–2020) e o período posterior (2021–2024), a fim de verificar possíveis mudanças na trajetória de expansão desses serviços e nas desigualdades regionais.

A unidade de análise foi composta pelas cinco grandes regiões brasileiras (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul), utilizando as séries regionais pelo Instituto Trata Brasil, com base em dados oficiais do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

A coleta foi realizada a partir das bases disponibilizadas pelo Instituto Trata Brasil, considerando os dados regionais de 2015 a 2024, complementados por dados populacionais obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; os dados de 2025 ainda não estavam disponíveis no momento da pesquisa, o que motivou a delimitação do recorte temporal.

Foram selecionados indicadores de cobertura e desempenho disponibilizados pelo Instituto Trata Brasil para cada região e ano, incluindo: índice de atendimento total de água, índice de atendimento total de esgotamento sanitário e população sem acesso aos serviços de água e de esgotamento sanitário.

Os valores de população sem acesso foram extraídos diretamente dos indicadores sistematizados pelo Instituto Trata Brasil, enquanto os dados de população total foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, sendo utilizados para a análise e contextualização dos indicadores.

As séries foram organizadas em planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel e consolidadas por região e período (2015–2020 e 2021–2024); não foram identificadas inconsistências.

A análise estatística foi estruturada em três etapas, com base em procedimentos de estatística descritiva aplicados à análise de dados sociais (MORETTIN; BUSSAB, 2017). Na primeira, realizou-se uma análise descritiva das séries históricas, com cálculo de médias, variações percentuais e taxas médias anuais de crescimento dos indicadores em cada região, nos períodos pré e pós-lei. Na segunda etapa, efetuaram-se comparações regionais entre os dois períodos, verificando-se se houve aceleração, desaceleração ou manutenção do ritmo de expansão dos serviços. Para quantificar as desigualdades regionais, calcularam-se, para os principais indicadores de cobertura, a diferença absoluta e a razão entre as regiões com maior e menor valor observado em cada período, permitindo avaliar a magnitude absoluta e relativa das disparidades.

Na terceira etapa, aplicou-se regressão linear simples para examinar a tendência temporal dos indicadores de cobertura de água e esgotamento sanitário em cada região. Nesses modelos, o tempo (ano) foi utilizado como variável independente contínua (X) e os indicadores de cobertura como variáveis dependentes (Y), conforme a expressão geral do modelo linear: $Y = a + bX$, possibilitando estimar a direção e a intensidade média anual das tendências observadas.

A partir dos coeficientes angulares estimados no Microsoft Excel, elaboraram-se projeções lineares exploratórias até 2033, utilizando a extrapolação da tendência observada, conforme a expressão $Y_t = Y_0 + b \cdot (t - t_0)$, com o objetivo de confrontar as trajetórias regionais observadas com as metas de 99% de cobertura de água e 90% de cobertura de esgoto estabelecidas pela Lei n 14.026/2020.

Os resultados foram apresentados em gráficos de séries temporais, organizados por região, de modo a facilitar a visualização das desigualdades territoriais e das mudanças após a implementação do novo marco.

A pesquisa apresenta limitações inerentes ao uso de dados secundários de bases oficiais, em especial aqueles sistematizados pelo Instituto Trata Brasil, cujas eventuais restrições metodológicas, diferenças de critérios entre prestadores ou atrasos de atualização podem ter influenciado os resultados, inclusive pela impossibilidade de incorporar o ano de 2025. Ademais, embora a análise longitudinal e as regressões lineares simples permitam identificar tendências e associações temporais, o desenho do estudo não autoriza inferências causais diretas entre a promulgação da Lei n° 14.026/2020 e as mudanças observadas nos indicadores de cobertura.

Resultados e Discussão

A cobertura de água no território brasileiro apresentou avanços significativos nas últimas décadas, no entanto, ainda é marcada por fortes desigualdades regionais.

A análise dos dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 permite compreender a evolução do acesso aos serviços de saneamento básico no Brasil, referentes ao abastecimento de água e ao tratamento de esgoto, com ênfase nas desigualdades regionais entre 2019 e 2024 e criando projeções para 2033, adotado como o ano de referência para a completa universalização de tais serviços no país.

No que se refere ao abastecimento de água, observa-se que o Brasil apresenta níveis relativamente elevados de cobertura quando comparado ao esgotamento sanitário, porém com disparidades significativas entre as regiões. Em 2019, as regiões Sudeste (90,1%) e Sul (87,4%) já apresentavam os maiores índices de atendimento de abastecimento de água, enquanto o Norte (48,5%) e o Nordeste (71,4%) registraram os menores percentuais, evidenciando um quadro de forte vulnerabilidade social e sanitária. Já em 2024, verifica-se uma ampliação do acesso em todas as regiões, com destaque para o Norte, que passou para 56,4%, e para o Centro-Oeste, que atingiu 86,2%. Apesar desses avanços, o padrão da desigualdade regional permanece praticamente inalterado.

Esses resultados dialogam com evidências recentes, como as apresentadas por Jesus, Monteiro e Tomasella (2023), que indicam que a expansão do acesso à água no Brasil não ocorre de forma territorialmente homogênea, sendo marcada por desigualdades espaciais persistentes.

Região	Água Pré-Lei (2019)	População Total Pré-Lei (2019)	Percentual Atingido Pré-Lei (%)	Água Pós-Lei (2024)	População Total Pós-Lei (2024)	Percentual Atingido Pós-Lei (%)	Água 2033 (Projeção)	População Total Projetada (2033)	Perc. Projetado P/ 2033 (%)
Norte	8.724.238	17.970.930	48,5%	10.524.904	18.669.345	56,4%	13.500.000	19.722.458	68,4%
Nordeste	40.160.886	56.272.587	71,4%	40.871.652	57.112.096	71,6%	41.000.000	57.984.557	70,7%
Sul	26.289.852	30.066.296	87,4%	27.244.736	31.113.021	87,6%	28.900.000	32.541.415	88,8%
Sudeste	78.723.676	87.386.818	90,1%	79.654.133	88.617.693	89,9%	81.400.000	89.899.108	90,5%
Centro-Oeste	13.904.203	16.203.468	85,8%	14.718.889	17.071.595	86,2%	16.300.000	18.426.606	88,5%

Tabela 01: Pessoas Atendidas com Abastecimento de Água por Região Brasileira (2019, 2024 e Projeção para 2033). Fonte: Elaboração dos autores com base em dados do IBGE e do Instituto Trata Brasil (2026).

A partir da análise da Tabela 01, foi possível constatar que o abastecimento de água no Brasil apresenta progresso importante, sobretudo quando comparado a outros serviços de saneamento. Verifica-se que todas as regiões do país registram elevação no contingente de pessoas atendidas, indicando uma expansão gradual da cobertura desse serviço essencial. Contudo, assim como observado em outros componentes do saneamento básico, esse avanço ocorre de forma desigual entre as regiões.

A maior abrangência do abastecimento de água em relação aos serviços de esgotamento sanitário observada neste estudo não constitui um fenômeno isolado, mas reflete um padrão estrutural amplamente identificado na literatura internacional. Hamlet e Kaminsky (2023), analisando evidências baseadas em dados globais do monitoramento do setor, indicam que a expansão do acesso à água ocorre de forma mais rápida e abrangente do que a do esgotamento sanitário, resultando em déficits significativamente maiores neste último. Essa assimetria está associada não apenas a fatores técnicos e econômicos, mas também a limitações institucionais e analíticas, uma vez que os próprios sistemas de monitoramento tendem a capturar de forma desigual os avanços nos diferentes componentes do saneamento, contribuindo para a persistência de disparidades no acesso.

A disparidade regional observada no acesso ao abastecimento de água e ao esgotamento sanitário no Brasil reflete um padrão histórico de desenvolvimento desigual do setor. Vieira *et al.* (2025), indicam que essas diferenças não são apenas conjunturais, mas resultam de processos estruturais relacionados à distribuição desigual de investimentos, à capacidade institucional dos entes federativos e às dinâmicas socioeconômicas regionais, o que contribui para a persistência de maiores déficits nas regiões Norte e Nordeste em comparação ao Sul e Sudeste.

As estimativas para 2033 indicam que, apesar da evolução progressiva, uma parcela considerável da população dessas regiões poderá permanecer sem acesso adequado ao abastecimento de água, o que demonstra que o ritmo de expansão, embora positivo, pode não ser suficiente para eliminar completamente as desigualdades regionais.

Nesse sentido, como afirmam Narzetti e Marques (2021), os resultados apontam que a ampliação do acesso à água não depende exclusivamente de metas estabelecidas em lei, mas também de fatores estruturais, como a distribuição de investimentos, a capacidade institucional e as prioridades políticas. Assim, o abastecimento de água, apesar de apresentar indicadores mais favoráveis, ainda reflete um modelo de desenvolvimento desigual, no qual o acesso pleno aos serviços básicos permanece condicionado às dinâmicas socioeconômicas e territoriais mais amplas.

Região	Esgoto Pré-Lei (2019)	População Total Pré-Lei	Percentual Atingido Pré-Lei (%)	Esgoto Pós-Lei (2024)	População Total Pós-Lei (2024)	Percentual Atingido Pós-Lei (%)	Esgoto 2033 (Projeção)	População Total Projetada (2033)	Perc. Projetado P/ 2033 (%)
Norte	1.605.077	17.970.930	8,9%	2.525.474	18.669.345	13,5%	4.335.962	19.722.458	22,0%
Nordeste	14.678.162	56.272.587	26,1%	16.776.821	57.112.096	29,4%	20.693.942	57.984.557	35,7%
Sul	12.817.220	30.066.296	42,6%	14.756.442	31.113.021	47,4%	18.892.171	32.541.415	58,1%
Sudeste	68.396.552	87.386.818	78,3%	70.436.711	88.617.693	79,5%	75.057.278	89.899.108	83,5%
Centro-Oeste	8.250.901	16.203.468	50,9%	10.189.812	17.071.595	59,7%	14.229.004	18.426.606	77,2%

Tabela 2 - Pessoas atendidas com Coleta e Tratamento de Esgotos por Região Brasileira (2019, 2024 e Projeção para 2033). Fonte: Elaboração dos autores com base em dados do IBGE e do Instituto Trata Brasil (2026).

A análise da tabela 2 evidencia-se um avanço nos serviços de coleta e tratamento de esgoto entre 2019 e 2024, todavia ele foi pouco expressivo e de forma desigual nas diferentes regiões brasileiras. Nota-se ainda que houve um aumento no percentual de pessoas atendidas em todas as regiões, explicitando uma ampliação do acesso, ainda que em ritmo limitado e gradual.

No entanto, assim como ocorre nos serviços de abastecimento de água, mantém-se a mesma tendência de desigualdade regional, sendo apresentado um padrão territorial persistente de exclusão. É o que afirmam Marchesi, Couto e Gomes (2023) que a partir de análises espaciais, indicam que o déficit de saneamento é significativamente superior ao de abastecimento de água, atingindo parcelas expressivas da população, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, onde se concentram os menores níveis de cobertura. Esses resultados reforçam a existência de disparidades estruturais no setor, associadas a fatores geográficos, socioeconômicos e à distribuição desigual de infraestrutura no território brasileiro.

Neste cenário, mantendo-se o ritmo de avanço, fica evidente que a universalização estabelecida pela Lei nº 14.026/2020, não será alcançada, especialmente no que se refere aos serviços de esgotamento sanitário.

Diante dos dados apresentados nas tabelas, constata-se que as desigualdades no acesso ao saneamento básico no Brasil tendem persistirem ao longo do intervalo de tempo analisado, explicitando não apenas diferenças pontuais, mas um padrão de disparidade entre as regiões. Esses dados, fundamentados em informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), indicam que o crescimento do acesso não foi suficiente para haver uma redução efetiva nas desigualdades estruturais.

Sobre isso, conforme discutem Vieira *et al*. (2025), as desigualdades no saneamento decorrem de fatores históricos, políticos e econômicos que orientam a distribuição seletiva de investimentos, perpetuando a exclusão de determinadas populações.

Essa interpretação também é reforçada por instituições como a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Trata Brasil, mostrando que a universalização do saneamento esbarra não apenas em limitações técnicas, mas sobretudo em entraves de gestão, planejamento e priorização política. Assim, mais do que evidenciar déficits de cobertura, os resultados julgam que o acesso desigual ao saneamento é um reflexo de decisões estruturais que reproduzem, no território, as desigualdades sociais já existentes.

Considerações Finais

Os resultados obtidos evidenciam que, entre 2015 e 2024, houve melhoria contínua nos indicadores de cobertura de abastecimento de água e de coleta e tratamento de esgoto em todas as regiões brasileiras, mas esses avanços ocorreram a partir de pontos de partida muito distintos e em ritmos desiguais.

Sul e Sudeste mantêm patamares elevados de atendimento, enquanto Norte e Nordeste seguem com os menores percentuais, em especial no esgotamento sanitário, o que revela a persistência de um padrão de desenvolvimento regionalmente assimétrico do setor.

As projeções lineares até 2033 reforçam essa tendência: mesmo sob um cenário de continuidade do crescimento observado, algumas regiões não se aproximam das metas de 99% de cobertura de água e 90% de esgoto estabelecidas pelo novo marco legal, particularmente no que se refere à coleta e tratamento de esgotos nas regiões Norte e Nordeste.

De forma crítica, os achados sugerem que a simples existência de metas normativas e reformas institucionais não tem sido suficiente para reverter as desigualdades estruturais no acesso ao saneamento básico. A manutenção de hiatos significativos entre regiões mais e menos desenvolvidas indica que a expansão dos serviços segue condicionada por fatores como a distribuição

desigual de investimentos, diferenças de capacidade institucional entre entes federativos e dinâmicas socioeconômicas regionais, em consonância com evidências de estudos recentes sobre o tema.

Nesse sentido, o ritmo atual de expansão, embora positivo, mostra-se incompatível com uma universalização equitativa até 2033, sobretudo para o esgotamento sanitário, o que coloca em questão a efetividade prática das metas quando não são acompanhadas de mecanismos robustos de indução de investimentos e de regulação orientada à equidade territorial.

Contudo, não se pode perder de vista que a tendência observada no estudo deve ser interpretada com cautela, uma vez que se baseia em extrapolação linear e não incorpora variáveis institucionais, econômicas ou políticas que possam influenciar o comportamento futuro do setor.

O estudo também apresenta limites que precisam ser reconhecidos: a utilização de dados secundários agregados em escala regional não permite capturar desigualdades intrarregionais e intraurbanas, nem estabelecer relações causais diretas entre a promulgação da Lei nº 14.026/2020 e as mudanças observadas nos indicadores. Ainda assim, a análise longitudinal e comparativa entre regiões fornece evidências consistentes de que a agenda de universalização do saneamento no Brasil enfrenta obstáculos que são menos técnicos e mais estruturais, relacionados a escolhas de planejamento, governança e priorização de territórios.

Em termos de implicações, os resultados apontam para a necessidade de políticas públicas que combinem aumento do volume de investimentos com critérios de alocação que priorizem regiões historicamente deficitárias, sob pena de a universalização do saneamento se consolidar de forma seletiva, reproduzindo no território as desigualdades sociais que o próprio setor deveria contribuir para mitigar.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Natal-Central pelo incentivo proativo à escrita científica dos estudantes potiguares.

Referências Bibliográficas

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Panorama do saneamento básico no Brasil**. Brasília: ANA, 2022.

BOING, A. F.; BOING, A. C.; SUBRAMANIAN, S. V. Inequalities in the access to healthy urban structure and housing: an analysis of the Brazilian census data. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 37, n. 6, e00233119, 2021

BRASIL. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – SNIS**. Brasília: Ministério das Cidades, 2023. Disponível em: Acessar Diagnósticos do SNIS (Água e Esgoto) Acesso em: 12 mar. 2026.

BRASIL. **Diagnóstico Temático – Serviços de Água e Esgoto: visão geral ano de referência 2022**. Brasília: Ministério das Cidades, 2024. Disponível em: Baixar diagnóstico temático de água e esgoto (2022) Acesso em: 12 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445/2007. Brasília: Presidência da República, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm Acesso em: 12 mar. 2026.

BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**. Brasília: Ministério das Cidades, 2019. Disponível em: Acessar o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) Acesso em: 12 mar. 2026.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)**. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/saneamento/snis. Acesso em: 12 mar. 2026.

COSTA, N. do R. Basic Sanitation Policy in Brazil: ideas, institutions and challenges in the Twenty-first Century. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 28, n. 9, p. 2595-2600, 2023

HAMLET, Leigh C.; KAMINSKY, Jessica. Analytical utility of the JMP school water, sanitation and hygiene global monitoring data. *Nature Sustainability*, v. 6, n. 2, p. 222–232, 2023. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41893-022-01005-4. Acesso em: 06 abr. 2026.

HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. ***Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação: 2000–2070.*** Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html. Acesso em: 18 mar. 2026.

JESUS, F. S. M.; MONTEIRO, A. M. V.; TOMASELLA, J. **Spatial inequalities in access to safe drinking water in an upper-middle-income country: a multi-scale analysis of Brazil**. *Water*, Basel, v. 15, n. 8, p. 1620, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/15/8/1620. Acesso em: 06 abr. 2026.

MARCHESI, Matheus Della Tonia; COUTO, Edivando Vitor do; GOMES, Uende Aparecida Figueiredo. Geographical inequalities in access to water and sanitation among Brazilian maritime islands' inhabitants. *Applied Geography*, v. 156, 103120, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103120. Acesso em: 06 abr. 2026.

MORETTIN, Pedro Alberto; BUSSAB, Wilton de Oliveira. **Estatística básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

NARZETTI, D. A.; MARQUES, R. C. Access to water and sanitation services in Brazilian vulnerable areas: the role of regulation and recent institutional reform. Water, Basel, v. 13, n. 6, 787, 2021

TRATA BRASIL. **Ranking do saneamento 2023**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2023. Disponível em: https://tratabrasil.org.br Acesso em: 12 mar. 2026.

VIEIRA, J. M. S.; GOMES, C.; VIEIRA, D. S.; MENDES, R. M.; VALÉRIO FILHO, M. **Diferenças e desigualdades regionais no acesso ao saneamento básico no Brasil**. *Veredas do Direito*, v. 22, n. 7, e223962, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.18623/rvd.v22.n7.3962. Acesso em: 06 abr. 2026.

PLANO DE CONTINGÊNCIA EM SANEAMENTO COMO ESTRATÉGIA CENTRAL DE RESILIÊNCIA URBANA: ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO EM PELOTAS/RS

1 Mariana Machado de Souza Dutra, 2 Fabielle Aparecida dos Santos Martins, 3 Adriana Aparecida dos Santos, 4 Maria Cristina de Almeida Silva, 5 Fernando Jorge Corrêa Magalhães Filho

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: marianamsouzadutra@gmail.com; 2 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: fabielle.martins@outlook.com; 3 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: a.adrianna.dos.santos@gmail.com; 4 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: mariacristinaas@gmail.com ; 5 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail:fernando.magalhaes@ufrgs.br

Palavras-chave: plano de contingência; saneamento; resiliência urbana.

Resumo

A recorrência de eventos extremos tem evidenciado a necessidade de fortalecimento dos planos de contingência como instrumentos centrais na gestão urbana e integração entre planejamento do saneamento, gestão de riscos e instrumentos de resposta a desastres. Este estudo analisa o município de Pelotas, considerando dados institucionais como o Plano de Resiliência, o Plano de Contingência e o Plano Municipal de Saneamento, com ênfase na sua relação com o saneamento e na capacidade de resposta a eventos de inundação. A metodologia baseou-se na análise documental dos planos citados anteriormente e de dados do SNIS, revisão bibliográfica e utilização de dados secundários de saneamento como levantamento de notícias recentes e construção de cenários. Os resultados indicam que, apesar de avanços na cobertura dos serviços, persistem fragilidades operacionais e baixa integração entre instrumentos de planejamento, o que compromete a capacidade de resposta a eventos de inundação. Conclui-se que o aprimoramento do plano de contingência, aliado ao uso de ferramentas e à incorporação de dados locais, é fundamental para o fortalecimento da resiliência urbana.

Introdução

O saneamento básico constitui um componente essencial para a saúde pública, a qualidade ambiental e o desenvolvimento urbano, sendo amplamente reconhecido como um determinante estrutural das condições de vida da população (BRASIL, 2007; HELLER; NASCIMENTO, 2005). No Brasil, a Lei nº 11.445/2007 estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, definindo serviços como abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos e drenagem pluvial, com ênfase na universalização, planejamento integrado e responsabilidades municipais. (BRASIL, 2007).

O Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) reforça a necessidade de integração entre políticas públicas e instrumentos de gestão territorial (BRASIL, 2013). Apesar desses avanços institucionais, persistem os desafios relacionados à eficiência dos serviços, à desigualdade no acesso e à fragilidade na articulação com políticas de gestão de riscos (SILVA; SOUZA, 2020).

A intensificação de eventos extremos, associada às mudanças climáticas e ao crescimento populacional desordenado, tem ampliado a exposição das cidades a inundações, evidenciando limitações nos sistemas de drenagem urbana e saneamento (MOURA; SILVA, 2023). Esses eventos geram impactos diretos na saúde pública, incluindo a disseminação de doenças de veiculação hídrica (FREITAS; XIMENES, 2012).

Diante desse cenário, torna-se fundamental a adoção de instrumentos de planejamento capazes de estruturar ações de prevenção, resposta e recuperação. No âmbito do planejamento urbano, diferentes instrumentos contribuem para a gestão de riscos de desastres, ainda que em níveis distintos. O Plano Municipal de Saneamento Básico atua de forma estrutural, organizando os serviços e a infraestrutura urbana, enquanto o Plano de Resiliência orienta estratégias de adaptação e redução de vulnerabilidades.

No entanto, esses instrumentos não são voltados à resposta imediata a eventos extremos. Nesse sentido, destaca-se o plano de contingência, que assume papel central por seu caráter operacional, sendo responsável por estruturar ações emergenciais e organizar respostas rápidas e coordenadas frente a situações críticas (SEDEC, 2017).

Sob a perspectiva do saneamento, a relevância dos planos de contingência torna-se ainda mais evidente, uma vez que eventos extremos afetam diretamente o funcionamento dos sistemas de abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem urbana e manejo de resíduos sólidos. A ausência de planejamento adequado pode resultar na interrupção de serviços essenciais, contaminação hídrica, extravasamento de esgoto e agravamento de riscos à saúde pública.

Um plano de contingência eficiente deve estar articulado ao planejamento do saneamento básico, incorporando variáveis operacionais e estruturais desses sistemas. Isso inclui a previsão de falhas, definição de medidas emergenciais, priorização de áreas críticas e estabelecimento de estratégias de resposta adaptadas à intensidade dos eventos. Além disso, deve contemplar não apenas ações reativas, mas também medidas preventivas e de recuperação, estruturadas a partir de dados locais e cenários previamente definidos.

Entretanto, em muitos municípios brasileiros, esses planos ainda apresentam caráter genérico, com baixa articulação intersetorial e limitada incorporação de informações específicas do território. Essa lacuna compromete sua efetividade que depende diretamente da qualidade das informações disponíveis, da capacidade de antecipação de cenários e da integração entre diferentes

setores da gestão pública, reduzindo a capacidade de resposta frente à crescente intensificação de eventos extremos associada às mudanças climáticas.

No município de Pelotas, a recorrência de eventos de inundação está associada ao relevo plano, à proximidade com corpos hídricos e à urbanização consolidada. Essas características físicas e territoriais favorecem a ocorrência de alagamentos, demandando abordagens integradas entre saneamento, planejamento urbano e gestão de riscos Apesar da existência de um plano de contingência, observa-se a necessidade de aprimoramento deste instrumento, especialmente quanto à incorporação de dados locais, definição de estratégias operacionais e avaliação de alternativas tecnológicas, uma vez que eventos recentes indicam limitações na sua efetividade, sobretudo na integração com o planejamento em saneamento.

O presente estudo tem como objetivo analisar a integração entre o planejamento do saneamento e os instrumentos de gestão de riscos, com ênfase no plano de contingência como estratégia central de resiliência urbana.

Metodologia

Área de estudo

O município de Pelotas localiza-se no sul do Brasil, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul. Possui área territorial de 1.608,708 km² e população de 325.685 habitantes segundo o último Censo Demográfico (IBGE,2022). A população estimada para 2025 é de 336.150 habitantes, indicando crescimento moderado e consolidando o município como um importante pólo urbano regional (IBGE, 2025).

Do ponto de vista demográfico, Pelotas apresenta predominância de população urbana, refletindo um padrão de ocupação concentrado. Essa configuração, aliada às características físicas do território, reforça a necessidade de planejamento integrado dos sistemas de drenagem urbana, esgotamento sanitário e manejo de águas pluviais (SNIS, 2023).

As características geomorfológicas indicam predomínio de relevo plano a suavemente ondulado. A maior parte do território apresenta declividades entre 0 e 6%, típicas de áreas de planície costeira, enquanto as maiores declividades concentram-se na porção norte do município, associadas ao Planalto Sul-rio-grandense (IBGE, 2019). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, áreas com baixa declividade tendem a apresentar maior propensão ao acúmulo superficial de água, especialmente em contextos urbanos impermeabilizados (IBGE, 2019).

Em termos climáticos, o município apresenta precipitação média anual de aproximadamente 1.366 mm, com distribuição relativamente homogênea ao longo do ano, sob influência de sistemas meteorológicos regionais, como frentes frias e o fenômeno El Niño–Oscilação Sul (INMET, 2020). Eventos extremos podem ultrapassar 180 mm em 24 horas, configurando situações críticas para a drenagem urbana. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia, “episódios de precipitação intensa em curtos períodos são determinantes para a ocorrência de inundações em áreas urbanas com baixa capacidade de escoamento” (INMET, 2020).

A umidade relativa média anual, em torno de 80%, contribui para a saturação do solo, intensificando processos de alagamento. Esse conjunto de fatores como elevada densidade populacional, baixa declividade e alta pluviosidade, aumenta a vulnerabilidade do município a eventos de inundação.

Assim, as características físicas, climáticas e demográficas de Pelotas influenciam diretamente o desempenho dos sistemas de saneamento básico, justificando sua escolha como área de estudo para aplicação de ferramentas de apoio à decisão em cenários de eventos extremos.

Delineamento do estudo

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória e descritiva, baseada em revisão bibliográfica e análise de dados secundários, conforme abordagens consolidadas em estudos de saneamento e planejamento urbano (ASSIS; MONTEIRO, 2023; SILVA JUNIOR et al., 2022).

Foram utilizados dados secundários provenientes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), bem como informações do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), permitindo a avaliação de indicadores de cobertura e eficiência dos serviços de saneamento no município de Pelotas (RS).

Adicionalmente foi realizado um levantamento sistemático de notícias e reportagens veiculadas nos últimos anos sobre eventos de inundação em Pelotas, com o objetivo de identificar padrões de ocorrência, intensidade e impactos associados.

Construção dos cenários de contingência

Os cenários foram estruturados a partir de duas dimensões complementares: (i) a temporal, baseada na lógica dos planos de contingência — antes (prevenção), durante (resposta) e depois (recuperação); e (ii) a intensidade dos eventos, definida a partir da magnitude da precipitação e dos impactos associados.

Com base nos eventos analisados, foram definidos cenários operacionais graduais (leve, moderado e extremo), estruturados conforme a intensidade dos eventos pluviométricos e seus efeitos sobre os sistemas urbanos. Essa classificação permite orientar a tomada de decisão de forma proporcional à magnitude dos eventos, enquanto a organização temporal auxilia na definição das ações ao longo das diferentes fases do desastre.

Dessa forma, cada cenário incorpora tanto o nível de severidade do evento quanto o momento de atuação, permitindo uma abordagem mais integrada entre planejamento e resposta operacional.

Tabela 1 – Estrutura de cenários de contingência para eventos de inundação em Pelotas

Cenário	Intensidade da chuva	Impactos esperados	Sistemas afetados	Ações recomendadas
Leve	< 50 mm/24h	Alagamentos pontuais	Drenagem urbana	Limpeza preventiva, monitoramento de pontos críticos
Moderado	50–100 mm/24h	Alagamentos urbanos, interrupção de vias	Drenagem e mobilidade urbana	Acionamento de bombeamento, alertas à população
Extremo	> 100 mm/24h	Inundações generalizadas, danos estruturais	Drenagem, esgoto e abastecimento	Evacuação de áreas de risco, operação emergencial

Limitações do estudo

Como limitação, destaca-se a utilização predominante de dados secundários, o que pode restringir a precisão das análises. Nesse sentido, recomenda-se, para estudos futuros, a incorporação de dados primários, por meio de aplicação de questionários e levantamentos de campo, visando maior detalhamento das condições locais.

Resultados e Discussão

A análise do plano de contingência do município de Pelotas evidencia avanços institucionais na organização da resposta a desastres, especialmente no que se refere à atuação da Defesa Civil e à identificação de áreas de risco. No entanto, a recorrência de eventos extremos nos últimos anos revela limitações na efetividade desse instrumento, sobretudo na integração com o planejamento em saneamento e na estruturação de cenários operacionais.

Eventos recentes reforçam esse diagnóstico. Em maio de 2024, o nível do canal São Gonçalo atingiu aproximadamente 2,88 metros, igualando a marca histórica da enchente de 1941 e evidenciando a vulnerabilidade do sistema urbano frente a eventos extremos. No mesmo período, episódios recorrentes de chuvas intensas resultaram em acumulados superiores a 100 mm em poucos dias, provocando alagamentos em diversos bairros, interrupção de serviços e impactos na mobilidade urbana.

Também foram registrados eventos com alta intensidade em curtos intervalos de tempo, como precipitações da ordem de 50 mm em cerca de uma hora, capazes de gerar acúmulo rápido de água e sobrecarga dos sistemas de drenagem. Em situações mais críticas, acumulados entre 130 e 160 mm em menos de 48 horas contribuíram para a ampliação das áreas classificadas como de risco no município.

Esse conjunto de evidências indica um padrão caracterizado por alta intensidade, curta duração e recorrência dos eventos, sugerindo que as inundações em Pelotas não constituem ocorrências pontuais, mas um problema estrutural associado às características físicas e urbanas do território.

Nesse contexto, observa-se que o plano de contingência municipal ainda se aproxima de um modelo tradicional, centrado em diretrizes gerais e na resposta emergencial, com limitada capacidade de antecipação. A ausência de cenários operacionais claramente definidos dificulta a organização de respostas graduais e proporcionais à magnitude dos eventos, reforçando o caráter reativo das ações.

Tabela 2 – Comparação entre resposta atual do plano de contingência e resposta esperada baseada em cenários operacionais

Cenário	Condição do evento	Resposta no plano atual	Resposta esperada (baseada em cenários)
Leve	Alagamentos pontuais (< 50 mm/24h)	Ações genéricas de monitoramento	Monitoramento ativo + limpeza preventiva direcionada + atuação em pontos críticos mapeados
Moderado	Alagamentos urbanos e interrupção de vias (50–100 mm/24h)	Resposta reativa após ocorrência	Acionamento prévio de bombeamento + alertas à população + controle de pontos de alagamento

Extremo	Inundações generalizadas (> 100 mm/24h)	Atuação emergencial sem detalhamento operacional específico	Evacuação planejada + operação integrada dos sistemas de drenagem, esgoto e abastecimento + priorização de áreas críticas
Todos os cenários	Impactos no saneamento	Baixa integração com sistemas de saneamento	Integração direta com operação dos sistemas (água, esgoto e drenagem)
Todos os cenários	Uso de dados	Uso limitado de dados locais	Utilização de dados em tempo real e históricos para tomada de decisão

Do ponto de vista do saneamento, essa limitação torna-se ainda mais crítica. A análise evidencia a baixa incorporação de variáveis operacionais fundamentais, como a capacidade hidráulica dos sistemas de drenagem sob diferentes regimes de precipitação, o risco de extravasamento das redes de esgoto, a vulnerabilidade de estações de bombeamento e a garantia de continuidade do abastecimento de água em situações extremas. A ausência de detalhamento desses aspectos compromete a tomada de decisão em momentos críticos.

Tabela 3 – Principais limitações do plano de contingência de Pelotas e suas implicações no saneamento

Aspecto analisado	Limitação identificada	Implicações para o saneamento
Estrutura do plano	Predominância de diretrizes gerais	Dificulta a operacionalização em situações críticas
Integração com saneamento	Baixa articulação com os sistemas de água, esgoto e drenagem	Compromete a continuidade dos serviços essenciais
Cenários operacionais	Ausência de níveis de criticidade definidos	Limita a resposta proporcional à intensidade dos eventos
Drenagem urbana	Obstrução por resíduos sólidos e baixa capacidade de escoamento	Intensificação de alagamentos e sobrecarga do sistema
Esgotamento sanitário	Falta de previsão de extravasamentos	Aumento do risco de contaminação hídrica
Abastecimento de água	Ausência de estratégias para eventos extremos	Risco de interrupção no fornecimento
Uso de dados	Baixa incorporação de dados locais e em tempo real	Reduz a capacidade de antecipação e resposta
Apoio à decisão	Uso limitado de ferramentas analíticas	Decisões menos robustas em cenários complexos

Outro fator recorrente identificado a partir das notícias analisadas refere-se à obstrução dos sistemas de drenagem por resíduos sólidos, que reduz a eficiência do escoamento das águas pluviais e intensifica os impactos das inundações. Esse elemento evidencia que os problemas observados não estão relacionados apenas à infraestrutura, mas também à gestão urbana e ao comportamento da população, reforçando a necessidade de abordagens integradas.

Além disso, verifica-se baixa utilização de dados locais sistematizados e informações em tempo real no processo de planejamento. A incorporação desses dados, associada ao uso de ferramentas de apoio à decisão, pode contribuir para a construção de cenários mais realistas e para a definição de estratégias mais eficazes.

Diante desse cenário, a reformulação do plano de contingência em Pelotas deve ir além da atualização documental, incorporando uma abordagem baseada em cenários, integração com o saneamento e uso de dados locais, de modo a ampliar sua capacidade de resposta frente à intensificação dos eventos extremos.

Considerações Finais

A análise evidencia que o plano de contingência constitui um instrumento central para a organização das ações em situações de desastre, devendo ir além de diretrizes gerais e incorporar estratégias operacionais estruturadas, baseadas em cenários e dados locais.

No caso de Pelotas, persistem fragilidades na integração entre o planejamento do saneamento e a gestão de riscos, especialmente no que se refere à drenagem urbana e à utilização de informações detalhadas para subsidiar a tomada de decisão. Essas limitações contribuem para a manutenção de um modelo predominantemente reativo, com baixa capacidade de antecipação frente à recorrência de eventos extremos.

Dessa forma, recomenda-se o aprimoramento dos planos de contingência por meio da incorporação de níveis de criticidade bem definidos, do uso de dados em tempo real e do detalhamento de protocolos específicos para os sistemas de saneamento. Tais medidas são fundamentais para o fortalecimento da resiliência urbana em contextos de crescente intensificação de eventos extremos.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ASSIS, Cristina Ferreira; MONTEIRO, Rhadson. Metodologias qualitativas e quadros de referência para a pesquisa em ciências humanas e sociais aplicadas. *Jures*, v. 16, n. 29, p. 1–28, 2023.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. *Diário Oficial da União*: Brasília, 2007.

BRASIL. Ministério das Cidades. Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB). Brasília, 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2023. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis. Acesso em: abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC). Guia de elaboração de planos de contingência para desastres. Brasília, 2017.

FREITAS, Carlos Machado de; XIMENES, Elisa Fraga. Enchentes e saúde pública no Brasil: uma análise dos impactos. *Ciência & Saúde Coletiva*, 2012.

HELLER, Léo; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira. Pesquisa e desenvolvimento em saneamento no Brasil: necessidades e tendências. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 10, n. 1, 2005.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base de informações geográficas e geomorfológicas do Brasil. Rio de Janeiro, 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados: Pelotas (RS). Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/pelotas.html. Acesso em: abr. 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas da população residente para os municípios brasileiros. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: abr. 2026.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil (1991–2020). Brasília, 2020. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br. Acesso em: abr. 2026.

INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO (IAS). Municípios e saneamento: Pelotas (RS). Dados do SINISA 2023. Disponível em: https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/rs/pelotas. Acesso em: mar. 2026.

IUCN. International Union for Conservation of Nature. Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. Gland, 2020.

JUNIOR, Izidio Rocha Silva et al. O planejamento territorial e a nova regionalização do saneamento básico no Brasil. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 14, n. 3, p. 834–852, 2025.

MOURA, A. S.; SILVA, M. M. Planejamento urbano e drenagem frente às mudanças climáticas, 2023.

PODER360. Prefeitura de Pelotas determina evacuação de mais 2 localidades. Brasília, 9 maio 2024. Disponível em: https://www.poder360.com.br/brasil/prefeitura-de-pelotas-determina-evacuacao-de-mais-2-localidades/. Acesso em: 8 abr. 2026.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PELOTAS. Prefeitura mantém-se atenta para ocorrência de chuvas. Pelotas, 2025. Disponível em: https://pelotas.rs.gov.br/noticia/prefeitura-mantem-se-atenta-para-ocorrencia-de-chuvas. Acesso em: 8 abr. 2026.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PELOTAS. Prefeitura realiza ações preventivas no Laranjal. Pelotas, 2025. Disponível em: https://www.pelotas.com.br/noticia/prefeitura-realiza-acoes-preventivas-no-laranjal. Acesso em: 8 abr. 2026.

SILVA, T. R.; SOUZA, V. A. Saneamento básico e vulnerabilidade socioambiental no Brasil. *Saúde e Sociedade*, v. 29, n. 1, 2020.

SNIS. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2023. Brasília: Ministério das Cidades, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis.

SUL21. Já sofrendo com inundações, Pelotas e Rio Grande aumentam alerta para áreas de risco. Porto Alegre, 2024. Disponível em: https://sul21.com.br/noticias/geral/2024/05/ja-sofrendo-com-inundacoes-pelotas-e-rio-grande-aumentam-alerta-para-areas-de-risco/. Acesso em: 8 abr. 2026.

UNITED NATIONS. United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water. Paris: UNESCO, 2023.

UNDRR. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Geneva, 2015.

ZHANG, H. et al. Resilience of water infrastructure systems under natural hazards: a review. *Sustainable Cities and Society*, v. 95, 2023.

COMUNIDADES QUILOMBOLAS NOS PLANOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO

1 Adriano Luiz Tonetti, 2 Luiza Cilindri, 3 Luiza dos Santos Magalhães, 4 Marcelle Maria Gois Lima, 5 Mariana Rodrigues Ribeiro dos Santos, 6 Pâmela Nascimento Vieira

1 Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP e-mail: adriado@fec.unicamp.br 2 Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, e-mail:l273019@dac.unicamp.br; 3 Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, e-mail: l240550@dac.unicamp.br; 4 Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, e-mail: marcelleglima@hotmail.com; 5 Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, e-mail:mrrs@unicamp.br; 6 Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, e-mail: p230896@dac.unicamp.br

Palavras-chave: Quilombo; Legislação; Políticas Públicas.

Resumo

As comunidades quilombolas são grupos étnicos que se caracterizam pela relação com o território, a ancestralidade e suas práticas culturais, sendo reconhecidas juridicamente no Brasil a partir da Constituição Federal de 1988. Nesse contexto, o saneamento básico constitui um direito fundamental e um elemento importante para a promoção da saúde e da qualidade de vida, além de estar previsto em diretrizes nacionais e internacionais, sendo abordado pelo sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6), estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU). Considerando a obrigatoriedade de elaboração dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB), este trabalho tem como objetivo analisar se os municípios do estado de São Paulo que possuem comunidades quilombolas reconhecidas pelo ITESP em seus territórios contemplam essas populações em seus planos e de que forma isso se dá. A pesquisa possui abordagem qualitativa e foi desenvolvida a partir da análise documental dos PMSB dos municípios mencionados. Foi realizada a leitura dos planos vigentes, incluindo a busca por termos relacionados às comunidades quilombolas. Os resultados indicam que, apesar da existência dos PMSB nos municípios analisados, não há, de modo geral, tratamento específico para essas comunidades em termos de saneamento, sendo mais comuns menções genéricas ou sua inclusão como áreas rurais ou sistemas isolados. Dessa forma, observa-se um distanciamento entre as diretrizes legais e a forma como essas populações são consideradas no planejamento municipal, evidenciando a necessidade de maior atenção às suas especificidades no âmbito das políticas públicas de saneamento.

Introdução

O marco da constituição de 1988 inaugura o reconhecimento e garantia de políticas e direitos dos quilombos, grupos étnicos predominantemente constituídos pela população negra rural, que se autodefinem a partir das relações específicas com a terra, a ancestralidade, as tradições e as práticas culturais próprias (INCRA, 2017). A partir desse marco legal, o termo quilombo é uma categoria jurídica usada pelo Estado brasileiro, visando assegurar a propriedade definitiva às comunidades negras rurais dotadas de uma trajetória histórica própria e relações territoriais específicas, bem como ancestralidade negra relacionada com o período escravocrata (Andrade et al., 2022).

A população quilombola é predominante negra e rural, sendo grupos historicamente marginalizados. Dessa forma, podem se encontrar em situação de vulnerabilidade e sujeitas ao racismo ambiental, com falta de acesso a serviços básicos, como água potável e saneamento, de estrutura urbana e de condições de moradia digna, o que afeta a saúde e a qualidade de vida dessas populações (BRASIL, 2024). Nesse sentido, é de extrema importância o combate à desigualdade de acesso à serviços básicos e cidadania. Em consonância com a Constituição e leis federais, como a Política Federal de Saneamento Básico, as quais garantem o acesso à infraestrutura, promoção da saúde e direitos dessa população, entende-se que é dever do Estado a garantia de direitos a esses territórios e população, englobado-os nas políticas de planejamento ambiental e de saneamento municipais.

Ainda no contexto internacional, o sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6: Água Potável e Saneamento), estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), enfatiza a necessidade de assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos. Diante disso, é de extrema importância compreender como se dá o cumprimento das políticas públicas que deveriam atender essas populações e seus territórios e garantir o acesso a serviços básicos de infraestrutura e cidadania, como é o caso do atendimento a serviços de saneamento básico a essas localidades.

Dessa forma, o presente estudo tem como objeto de investigação, os planos municipais de saneamento básico e sua abordagem aos territórios quilombolas, tomando os quilombos reconhecidos pelo ITESP, no Estado de São Paulo, como ponto de partida para identificação destes municípios.

Materiais e métodos

Esta pesquisa se classifica como qualitativa, na qual busca-se a compreensão da realidade por meio da "definição do objeto de estudo, coleta de dados e interpretação dos resultados". Ela se difere da pesquisa quantitativa, em geral, por sua subjetividade e nuances comumente menos rígidas (Soares et al. 2022).

O trabalho aqui realizado foi a verificação da presença (ou não) de especificações a respeito de áreas quilombolas nos PMSB do estado de São Paulo, sendo esta, portanto, uma pesquisa de análise documental. A amostra aqui analisada foram os

planos de municípios que contam com comunidades quilombolas em seus limites territoriais, reconhecidas pelo Instituto de Terras do Estado de São Paulo (ITESP). Para isso, foi desenvolvida uma tabela com esses municípios, sua Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI) regional e o nome da comunidade que habita cada um desses municípios.

Na sequência, foram levantados os PMSB dos referidos municípios, em razão de sua obrigatoriedade legal. A busca ocorreu, principalmente, nos sites das prefeituras ou utilizando sites de busca. Nas ocasiões em que os planos não foram encontrados, a prefeitura foi contactada, para que os planos pudessem ser obtidos.

Posteriormente, esses planos foram analisados, para que fosse identificada a presença de especificações de territórios quilombolas e como estes são abordados nos planos. Para isso, foi realizada a leitura do índice dos planos, seguida da leitura dinâmica dos planos; além da busca por palavras-chave como quilombo, comunidades isoladas/sistemas isolados e o nome da comunidade quilombola em questão. Por fim, os resultados obtidos neste estudo foram confrontados com aqueles reportados na literatura.

Resultados e discussões

O ODS 6 enfatiza, a nível internacional, a necessidade de assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos, destacando, entre suas metas, a importância da participação ativa das comunidades locais nos processos de planejamento, gestão e implementação dos serviços de abastecimento de água e saneamento. Tal diretriz reforça os resultados deste estudo, ao evidenciar que o abastecimento de água garantido por meio dos denominados "regos d'água" constitui uma estratégia comunitária relevante para o acesso à água potável, especialmente em contextos de vulnerabilidade socioambiental (ONU, 2015).

Já no âmbito nacional, um dos objetivos da Política Federal de Saneamento Básico, em seu artigo 49, é " proporcionar condições adequadas de salubridade ambiental aos povos indígenas e outras populações tradicionais, com soluções compatíveis com suas características socioculturais" (BRASIL, 2020). Sendo assim, é fundamental que o Estado propicie condições adequadas de saneamento básico também nessas localidades, considerando suas especificidades.

Assim, a elaboração de políticas públicas inclusivas que reconheçam e valorizem as comunidades quilombolas é indispensável para a preservação cultural, a promoção da equidade e o fortalecimento desses grupos. Torna-se igualmente essencial que o poder público reconheça a contribuição quilombola e implemente ações que assegurem sua participação efetiva no desenvolvimento sustentável de seus territórios.

Na Tabela 1, são apontados os municípios paulistas que possuem comunidades quilombolas em seu território e se seus Planos Municipais de Saneamento Básico citam tais comunidades.

Município	CATI regional	Comunidade quilombola	Tem PMSB disponível?	Lei de criação do PMSB	Cita comunidades quilombolas?
Itatiba	Campinas	Brotas	Sim	Lei Municipal nº 4.526 de 2012	O Quilombo das Brotas é citado como "Sistema isolado" - local sem rede de água e esgoto, em fase de execução em 2012. O município possui, ainda, Plano Municipal de Saneamento Rural, no qual os quilombos são citados.
Itaoca	Itapeva	Cangume	Sim	Lei Municipal n° 785 de 2023	Não são citadas, plano extremamente curto e genérico.
Itapeva	Itapeva	Jaó	Sim	Lei Municipal n° 5.255 de 2025	Não são citadas.
Capivari	Piracicaba	Capivari	Sim	Lei Municipal n° 4.730 de 2015	Não são citadas.
Barra do Turvo	Registro	Ribeirão Grande/Terra Seca, Cedro, Reginaldo, Pedra Preta/Paraiso	Sim	Lei Municipal nº 020 de 2008	Não são citadas.

Cananeia	Registro	Mandira, Ex Colônia Velha	Sim	Lei Municipal nº 1.928, de 2008	Sim, mas de forma genérica.
Eldorado	Registro	Ivaporunduva, Pedro Cubas, André Lopes, Sapatu, Pedro Cubas de Cima, Abobral Margem Esquerda, Engenho, Ostra, São Pedro, Nhunguara, Galvão	Sim	Não especificada	Sim, regiões quilombolas são especificadas.
Iporanga	Registro	São Pedro, Nhunguara, Galvão, Maria Rosa, Pilões, Praia Grande, Porto Velho, Bombas, Piririca	Sim	Não especificada	Sim, as comunidades quilombolas são consideradas localidades rurais e não possuem atendimento pela SABESP.
Jacupiranga	Registro	Poça	Sim	Não especificada	A comunidade Poças é reconhecida como comunidade quilombola, mas não é identificada no mapa das localidades do município.
Iguape	Registro	Morro Seco, Aldeia	Sim	Não especificada	Sim, as comunidades quilombolas são consideradas localidades rurais e não possuem atendimento pela SABESP.
Miracatu	Registro	Biguazinho	Sim	Lei Municipal n° 1.847 de 2016	Sim, as comunidades quilombolas são consideradas localidades rurais e não possuem atendimento pela SABESP.
Registro	Registro	Peropeva	Sim	Lei Municipal n° 1.400 de 2014	Não são citadas, plano extremamente curto e genérico.
Ubatuba	Registro	Caçandoca, Camburi	Sim	Lei Municipal nº 3.735 de 2014	Sim, na primeira revisão do PMSB (Lei Municipal nº 4.238, de 19 de dezembro de 2019) ambas as comunidades quilombolas são citadas nas relações de bairros a serem atendidas pelos sistemas existentes ou novos/isolados.
Salto de Pirapora	Sorocaba	Cafundó	Sim.	Lei Municipal nº 2.076 de 2025	Sim, as comunidades quilombolas são abordadas dentro do Programa Saneamento Brasil Rural.

Tabela 1: Comunidades quilombolas nos PMSB de São Paulo.
Fonte: Elaboração própria com base em dados da Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo (ITESP) e nos Planos Municipais de Saneamento (2026).

Como é possível notar na Tabela 1, o estado de São Paulo possui 36 comunidades quilombolas reconhecidas pelo ITESP, distribuídas em 14 municípios. O principal CATI é Registro, presente em 9 dos 14 municípios que possuem quilombo em seu território (ITESP, 2026).

O PMSB de Itatiba, que aborda apenas as dimensões água e esgoto, por exemplo, cita o quilombo Brotas, localizado em seu território (ITATIBA, 2012). Destaca-se que Brotas se encontra em área urbana, segundo o plano diretor do município (ITATIBA, 2011). Todavia, o PMSB data de 2012, não tendo sido atualizado em 2022, como determina a Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2020). Assim, como o Plano não foi renovado, não se sabe se as redes de água e esgoto passaram a atender toda a população local, incluindo quilombolas.

O município de Itatiba possui, ainda, um Plano Municipal de Saneamento Rural, no qual os quilombos são citados. A comunidade quilombola de Brotas é apontada no Plano, todavia não são detalhadas ações/soluções de saneamento específicas direcionadas a tal população (ITATIBA, 2025).

Já o PMSB de Cananéia destaca:

> "Para as regiões rurais, populações quilombolas, ribeirinhas e assentamentos rurais, as propostas deverão estar em conformidade com o Programa de Saneamento Rural em vigência…. Cabe à FUNASA a responsabilidade de alocar recursos não onerosos para sistemas de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e melhorias sanitárias domiciliares, prioritariamente para municípios com população inferior a 50.000 habitantes, em comunidades quilombolas, assentamentos de reforma agrária, comunidades extrativistas, populações ribeirinhas e áreas rurais. É importante frisar que apenas municípios com concessão pública são elegíveis para a obtenção de financiamento" (Cananeia, 2022).

Todavia, o Plano não detalha quais ações serão adotadas nessas localidades para que suas especificidades sejam atendidas. Sabe-se que a gestão dos serviços de saneamento de interesse local é atribuída, primordialmente, à esfera municipal, sem que isso implique a exclusão da atuação dos níveis estadual e federal nesse setor. Ainda, a Lei 14.026/2020 determina que o Plano Nacional de Saneamento Básico deverá abranger comunidades quilombolas por meio de ações específicas da União (Brasil, 2020). Assim como o Plano Nacional, os Planos Municipais devem atender as especificidades que tais localidades possuem.

No PMSB de Eldorado, é especificado que o Plano abrange todo o município, inclusive comunidades quilombolas. É detalhado, ainda, que "O município de Eldorado possui dois distritos, Itapeúna, com área de 5 ha, e Quilombo Ivaporunduva, com área de 3 ha." (Eldorado, 2010). No quadro 1, baseado em dados do ITESP, pode ser observado outras comunidades quilombolas no município: Ivaporunduva, Pedro Cubas, André Lopes, Sapatu, Pedro Cubas de Cima, Abobral Margem Esquerda, Engenho, Ostra, São Pedro, Nhunguara, Galvão.

Ainda no município de Eldorado, é defendido no PMSB que a problemática dos quilombos no Estado de São Paulo configura-se também como uma questão relacionada à legitimação da posse territorial e que, conforme disposto na Constituição Federal, em seu Artigo 68 do Ato das Disposições Constitucionais Transitórias, compete ao Estado reconhecer a propriedade definitiva das terras ocupadas pelos remanescentes de comunidades quilombolas (Eldorado, 2010).

Já no município de Ubatuba, a primeira revisão do PMSB aborda as esferas de água, esgoto e resíduos sólidos e em todas elas os Quilombos de Caçandoca e de Camburi são citados (Ubatuba, 2019). Quanto ao abastecimento de água, o Quilombo de Caçandoca está presente na relação de bairros a serem atendidos pelos sistemas existentes, onde o Plano indica as necessidades detectadas para a ampliação e melhoria do mesmo. Já o Quilombo de Camburi é citado como "Sistema isolado", prevendo as fases de elaboração de estudos, projetos e, posteriormente, as obras de implantação, sem datas previstas. Em relação ao esgotamento sanitário, ambas comunidades são citadas como "Sistemas isolados", prevendo fases para implantação, mas sem previsão de quando. O Plano destaca que:~

> "[...] será necessário criar uma política pública municipal, independentemente dos serviços concessionados, voltada para a implantação de sistemas alternativos de tratamento de esgoto, adaptados à realidade de cada núcleo, com a adoção de métodos, técnicas e processos que considerem as peculiaridades locais e regionais, visando solução sanitária e ambiental para a situação atual" (Ubatuba, 2019).

Ainda no município de Ubatuba, a coleta de resíduos sólidos domiciliares atende cerca de 100% da população urbana, englobando apenas o Quilombo de Caçandoca. Referente a núcleos habitacionais mais dispersos, há coleta de resíduos, mas a frequência varia em função da distância e da facilidade de acesso, possuindo lixeiras públicas para concentração dos resíduos para posterior retirada (Ubatuba, 2019).

Quanto ao município de Registro, o PMSB elaborado em 2014 aborda apenas as dimensões água e esgoto e não traz detalhes sobre projetos e ações propostas (Registro, 2014). No entanto, encontrou-se um arquivo de revisão/atualização dos PMSB dos municípios regulados e fiscalizados pela ARSESP para a Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul - UGRHI 11, o qual destaca que tanto as propostas de abastecimento de água quanto as de esgotamento sanitário das regiões rurais, populações quilombolas, ribeirinhas e assentamentos rurais, deverão estar em conformidade com o Programa de Saneamento Rural em vigência. Apesar disso, não são informados maiores detalhes (Registro, 2022).

O PMSB de Salto de Pirapora é o mais recente dentre os municípios analisados, aprovado em 2025. Nele, as comunidades quilombolas são mencionadas no âmbito do Programa de Saneamento Rural. Conforme descrito no plano, trata-se de uma iniciativa que visando "[…] a universalização do saneamento básico, busca o acesso dos serviços do respectivo setor em áreas rurais, de modo a alcançar aqueles que vivem nos campos e florestas, bem como, comunidades quilombolas, indígenas, assentamentos e aglomerados rurais. As metas estabelecidas preveem horizontes de curto, médio e longo prazos, considerando o período de 2019 a 2038" (Salto de Pirapora, 2025). Ainda, o PMSB cita o bairro Cafundó dentre as localidades consideradas "Aglomerado rural", prevendo solução de abastecimento coletiva e de responsabilidade da SABESP, no entanto, não fica claro se tal atendimento se expande para o quilombo (Salto de Pirapora, 2025).

Já os municípios Iporanga, Iguapé e Miracatu possuem PMSB semelhantes. Em todos eles as comunidades quilombolas são tituladas, reconhecidas ou estão em reivindicação, no entanto, nas ações emergenciais, de curto, médio e longo prazo para o saneamento básico não abordam de maneira tão clara e direcionada medidas de atendimento para essas áreas (Iporanga, 2022; Iguapé, 2022; Miracatu, 2022).

Como pode ser observado na análise dos PMSB de São Paulo que possuem comunidades reconhecidas pelo Instituto de Terras do Estado de São Paulo (ITESP), além da ausência de especificações de áreas quilombolas aqui identificadas nas normativas municipais, o atendimento em si das regiões quilombolas no estado também se mostra aquém do necessário.

Já quando se expande para o nível nacional, em um estudo de 2018, foram analisadas publicações de artigos científicos relacionados à temática, produzidos nos 20 anos anteriores disponíveis na Plataforma CAPES. A partir do levantamento realizado, constatou-se que 48,8% das comunidades quilombolas brasileiras obtêm água para abastecimento por meio de poços ou nascentes; 59% destinam seus esgotos a fossas rudimentares; e menos de 30% dessa população dispõe de serviço de coleta de resíduos sólidos (Bezzera, Hora e Scalize, 2018).

Em um artigo mais recente, de 2020, foi feita uma pesquisa em quilombos do Rio Grande do Sul e foi identificado que entre as 136 comunidades quilombolas do Rio Grande do Sul, somente 71 dispõem de abastecimento de água tratada, o que representa 54,62% da amostra analisada. Ademais, foram identificados outros fatores que impactam negativamente essas comunidades, tais como a ausência de coleta de resíduos sólidos, a precariedade das vias de acesso e do transporte, bem como a insuficiência de serviços de saneamento básico, entre outros. Para os autores, tais condições comprometem a comercialização da produção local, o acesso aos serviços de saúde e contribuem para o isolamento social dessas populações (Machado, Diniz e Grossi, 2020).

Ferreira e Pantaleão (2016) analisaram a situação do saneamento básico nas comunidades quilombolas Jussarinha, Mariana e Filus, localizadas no município de Santana do Mundaú, no estado de Alagoas, no que se refere aos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário e à disposição dos resíduos sólidos domiciliares. Os autores identificaram que todas as dimensões se mostraram deficientes, carecendo de soluções adequadas.

Andrade et al., 2022 estudaram o saneamento no quilombo Mesquita da Cidade Ocidental do estado de Goiás, Brasil, além de realizar uma *Scoping review* sobre o tema na localidade. O estudo apontou deficiências no saneamento no quilombo estudado. Ademais, os autores elaboraram a figura 1 que indica os principais aspectos de saneamento no quilombo Mesquita da Cidade Ocidental, que pode ser indicativo para análise de outros quilombos.

Além disso, os autores sustentam que as comunidades quilombolas frequentemente enfrentam processos de exclusão nos espaços de participação e decisão sobre seus territórios, o que evidencia a presença do racismo ambiental. Assim, segundo eles, é imprescindível o fortalecimento da articulação e da cooperação entre os diversos atores sociais - poder público, organizações não governamentais, sociedade civil, lideranças representativas das comunidades quilombolas e instituições de ensino e pesquisa - com o objetivo de consolidar e ampliar práticas voltadas ao cuidado, à promoção da saúde e à melhoria das condições de saneamento (Andrade et al., 2022).

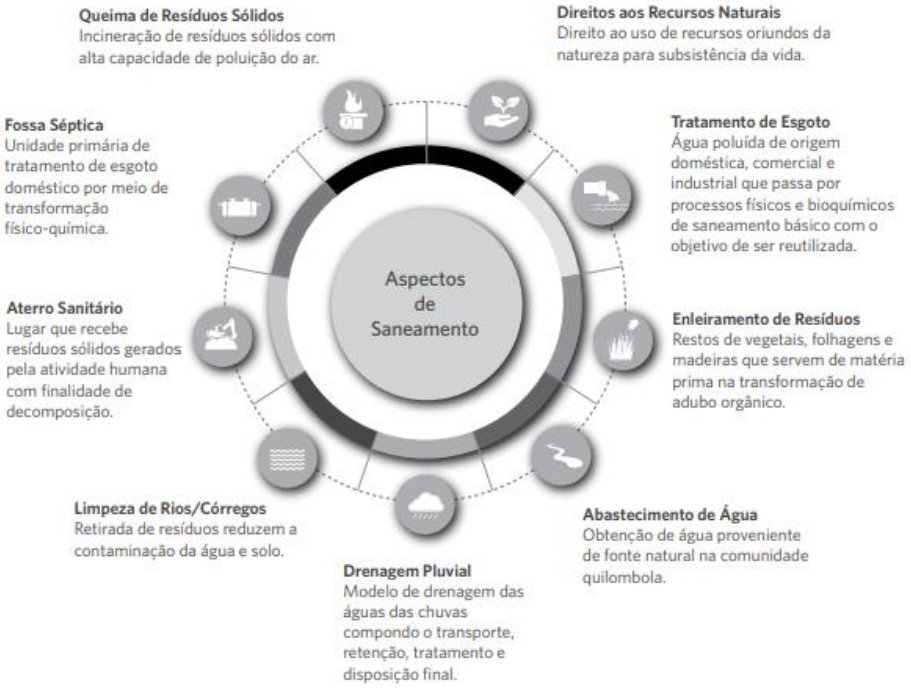


Figura 1: Saneamento no quilombo Mesquita da Cidade Ocidental.
Fonte: Andrade et al. (2022).

A busca por referências bibliográficas aqui realizada demonstra que, ainda que existam estudos sobre o saneamento em regiões quilombolas brasileiras, ainda carecem de pesquisas sobre aspectos legislativos acerca do tema, em especial sobre os Planos Municipais de Saneamento Básico.

De fato, a trajetória de luta dos quilombos, no passado e na atualidade, revela a urgência de políticas públicas consistentes que assegurem os direitos territoriais, enfrentem o racismo estrutural e promovam a justiça social. Garantindo, desse modo, a preservação cultural e o desenvolvimento sustentável dessas comunidades (de Sousa e Alvarenga, 2025).

Considerações finais

A partir da análise realizada, foi possível observar que todos os municípios do estado de São Paulo analisados, que possuem comunidades quilombolas em seus territórios, contam com Plano Municipal de Saneamento Básico. No entanto, esses documentos ainda apresentam limitações importantes no que diz respeito à inclusão dessas populações. De modo geral, as comunidades quilombolas não são tratadas de forma específica, sendo frequentemente inseridas de maneira genérica como áreas rurais ou sistemas isolados, sem o devido detalhamento de ações, metas ou estratégias voltadas às suas realidades.

Além disso, verifica-se um distanciamento entre o que é estabelecido pela legislação e pelas diretrizes nacionais e internacionais e o que, de fato, é incorporado no planejamento municipal. Soma-se a isso a existência de certa incerteza quanto à definição de competências para o planejamento e a gestão dos territórios quilombolas, especialmente no que se refere à atuação dos diferentes entes federativos - município, estado e União. Considerando que o saneamento básico é um direito fundamental e que essas comunidades historicamente enfrentam situações de vulnerabilidade, torna-se essencial que o poder público avance na elaboração de políticas mais inclusivas, que reconheçam suas especificidades socioculturais e territoriais.

Dessa forma, os resultados deste estudo indicam que não basta apenas a existência dos planos, sendo necessário avançar na forma como essas populações são efetivamente consideradas no planejamento municipal. A inclusão das comunidades quilombolas nos PMSB deve ir além de menções pontuais, contemplando diagnósticos mais detalhados, a definição de metas específicas e a proposição de soluções compatíveis com suas realidades.

Nesse sentido, também se destaca a importância da participação dessas comunidades nos processos de elaboração, revisão e implementação dos planos, de modo a garantir que suas demandas sejam de fato compreendidas e incorporadas. Por fim, espera-se que este trabalho contribua para o fortalecimento do debate sobre o tema e incentive novas pesquisas, especialmente voltadas à interface entre planejamento, legislação e populações tradicionais, ampliando a discussão sobre a necessidade de políticas públicas mais efetivas e inclusivas no campo do saneamento básico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio concedido a esta pesquisa (Processo FAPESP nº 2024/15261-9) e à CAPES pela bolsa de mestrado concedida a Luiza dos Santos Magalhães (Processo SCBA nº 88887.214407/2025-00).

Referências Bibliográficas

BEZERRA, Roberto Araújo; HORA, Karla Emmanuela Ribeiro; SCALIZE, Paulo Sérgio. Cenário das políticas públicas de saneamento nas comunidades quilombolas do estado de Goiás. In: **Congresso Nacional de Saneamento da Assemae**. 2018. p. 27-30.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br. Acesso em: 28 jan. 2026.

BRASIL. Secom. **O que é racismo ambiental e de que forma ele impacta populações mais vulneráveis.** 2024. Disponível em:https://www.gov.br/secom/pt-br/fatos/brasil-contra-fake/noticias/2024/o-que-e-racismo-ambiental-e-de-que-forma-impacta-populacoes-mais-vulneraveis. Acesso em: 4 abr. 2026.

CANANEIA. Plano Municipal de Saneamento Básico. Cananeia, 2022.

DE SOUSA, Tânia Valéria Luz; DE ANDRADE ALVARENGA, Willyane. Quilombos: da história de resistência ao direito de existir. **Cadernos Cajuína**, v. 10, n. 2, p. e985-e985, 2025.

ELDORADO. Plano Municipal de Saneamento Básico. Eldorado, 2010.

FERREIRA, Elvis Pantaleão e PANTALEÃO Fabiana de Souza. Saneamento básico em comunidades quilombolas no estado de Alagoas. **Revista Geotemas**, v. 6, n. 2, p. 71-82, 2016.

IGUAPÉ. Produto 2 (P2): Revisão/Atualização dos Planos Municipais de Saneamento Básico dos Serviços de Abastecimento de Água Potável e Esgotamento Sanitário. Elaborado por Consórcio Engecorps-Maubertec. São Paulo, 2022. 310 p. Disponível em: https://smastr20.blob.core.windows.net/conesan/Iguape_AE_2022.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

IPORANGA. Produto 2 (P2): Revisão/Atualização dos Planos Municipais de Saneamento Básico dos Serviços de Abastecimento de Água Potável e Esgotamento Sanitário. Elaborado por Consórcio Engecorps-Maubertec. São Paulo, 2022. 310 p. Disponível em: https://smastr20.blob.core.windows.net/conesan/Iporanga_AE_2022.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

ITATIBA. LEI N.º 4.325, DE 20 DE JANEIRO DE 2011. Plano diretor. Itatiba, 2011.

ITATIBA. Plano Municipal de Saneamento Básico. Abastecimento de água e esgoto sanitário de Itatiba - SP. Itatiba, 2012. Disponível em: https://www.itatiba.sp.gov.br/secretarias/desenvolvimento-economico-e-habitacao/pmsb-ae. Acesso em: 23 jan. 2026.

ITATIBA. Plano Municipal de Saneamento Rural de Itatiba. Itatiba, 2025. Disponível em: https://ecrie.com.br/sistema/conteudos/arquivo/a_133_0_1_30092025162902.pdf. Acesso em: 5 abr. 2026.

JACUPIRANGA. Plano Municipal de Saneamento Básico. Jacupiranga, 2010. Disponível em: https://smastr20.blob.core.windows.net/conesan/Jacupiranga_AE_DU_RS_2010.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

MACHADO, Gabriel Moraes; DINIZ, Carolina Silva; GROSSI, Patrícia Krieger. POPULAÇÃO QUILOMBOLA E INFRAESTRUTURA: A INTERFACE DA SAÚDE COM O ACESSO À ÁGUA, SANEAMENTO E TRANSPORTE. **Anais do V SEPINF, 2020, Brasil.**, 2020.

MIRACATU. Produto 2 (P2): Revisão/Atualização dos Planos Municipais de Saneamento Básico dos Serviços de Abastecimento de Água Potável e Esgotamento Sanitário. Elaborado por Consórcio Engecorps-Maubertec. São Paulo, 2022. 310 p. Disponível em: https://smastr20.blob.core.windows.net/conesan/Miracatu_AE_2022.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU, 2015.

REGISTRO. Plano Municipal de Saneamento. Registro, 2014.

REGISTRO. Produto 2 (P2): Revisão/Atualização dos Planos Municipais de Saneamento Básico dos Serviços de Abastecimento de Água Potável e Esgotamento Sanitário. Elaborado por Consórcio Engecorps-Maubertec. São Paulo, 2022. 310 p. Disponível em: https://smastr20.blob.core.windows.net/conesan/Registro_AE_2022.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

SALTO DE PIRAPORA. Plano Municipal de Saneamento Básico. Salto de Pirapora, 2025. Disponível em: https://www.camarasaltodepirapora.sp.gov.br//temp/14042026094610download_lei_2076.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

Soares, W. D., Abritta, M. L. R., Freitas, D. A. **Pesquisa qualitativa e quantitativa: um estudo comparativo. Revisão Bibliográfica: o uso da metodologia para a produção de textos** [Internet], v. 1, p. 39-45, 2022.

UBATUBA. Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico do Município de Ubatuba (PMISB). Ubatuba, 2019. Disponível em:https://drive.usercontent.google.com/download?id=1kUlnUZBiwm2IJxR3dMCdIzaxcwOYc93o&authuser=0&acrobatPromotionSource=gdrive_chrome-list. Acesso em: 20 fev. 2026.

INDICADORES DE DESEMPENHO APLICADOS À ANÁLISE DA COBERTURA E OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO EM MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE DO PARANÁ

1 Heloísa Martins Brasil, 2 Mariane Kempka
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: heloisab@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: marianekempka@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: indicadores de desempenho; abastecimento de água; esgotamento sanitário.

Resumo
Indicadores de desempenho consistem em ferramentas quantitativas essenciais para a avaliação da evolução de áreas específicas, além de auxiliarem na tomada de decisões. Nesse contexto, o presente estudo utilizou-se de indicadores para a realização de uma avaliação dos serviços de saneamento básico, no estado do Paraná, especialmente no que se refere ao abastecimento de água e ao esgotamento sanitário, abordando parâmetros relacionados à cobertura e à eficiência operacional dos sistemas por meio de análises comparativas entre estratos populacionais e índices gerais estaduais e nacionais. Nessa perspectiva, verificou-se que nenhum dos estratos populacionais analisados atingiu níveis de cobertura por rede de abastecimento de água e rede coletora de esgoto superiores às médias estadual e nacional. Além disso, identificaram-se relações diretas e inversas entre os indicadores de perdas totais de água na distribuição, micromedição de água em relação ao volume disponibilizado para distribuição, volume de água disponibilizado para distribuição por economia, consumo residencial médio per capita, densidades de economias por ligações e extensão de redes de água e esgoto por ligação, revelando diferentes comportamentos de eficiência operacional entre as unidades municipais estudadas. Dessa forma, o estudo contribui para a compreensão do cenário do serviços de água e esgotamento sanitário em municípios de pequeno porte do estado do Paraná, promovendo discussões voltadas ao desenvolvimento de políticas públicas, com o intuito de promover equidade, saúde pública e melhoria da qualidade de vida, como proposto pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 6 (Água Potável e Saneamento Para Todos) e 3 (Boa Saúde e Bem-Estar) da Organização das Nações Unidas (ONU).

Introdução
A Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu, em 2015, 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), dos quais o Brasil compromissos é signatário. Entre eles, destaca-se a meta de garantir, até 2030, o acesso aos serviços de saneamento e higiene adequados e equitativos para toda população (ODS 6 – Água Potável), promovendo, assim, a saúde e o bem-estar (ODS 3 – Bem- estar). No âmbito nacional, o Novo Marco Legal do Saneamento, ordenado pela Lei Federal nº 14.026 de 2020, estabelece uma meta ainda mais ambiciosa, universalizar, até 2033, 99% do acesso à água potável e 90% da coleta e tratamento de esgoto em todo o território brasileiro (BRASIL, 2020). Com essa perspectiva, o Instituto Trata Brasil (2024) estima que, para atingir as metas estabelecidas em 13 anos (período compreendido entre 2021 e 2033), seria necessário uma média anual de investimento da ordem de R$ 36,2 bilhões.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2023), 93,4% dos domicílios urbanos são abastecidos por rede geral de água, enquanto apenas 32,3% dos domicílios rurais têm acesso ao mesmo serviço. Segundo Mota et al. (2015), há um déficit quando se compara áreas urbanas e rurais, visto que os sistemas convencionais de saneamento tendem a apresentar custos elevados. Considerando essa realidade, muitas vezes, as cidades pequenas acabam dependendo de centros urbanos mais desenvolvidos como forma compensatória à falta de infraestrutura existente, o que acaba por acentuar níveis de desigualdades sociais. Considerando o esgotamento sanitário, cerca de 98% dos domicílios brasileiros possuem banheiro de uso exclusivo, e 69,9% têm escoamento do esgoto por rede geral ou fossa séptica ligada à rede. Os dados, com base no ano de 2021 do SNIS (2022), revelam que 76,84% da população era atendida com coleta de esgoto, enquanto 55,81% possuíam tratamento de esgoto.

Segundo o instituto Trata Brasil (2023), o estado do Paraná está ranqueado como um dos estados com maiores coberturas dos serviços em serviços de água e esgotamento sanitário. No entanto, há que se destacar, que mais de 90% dos municípios do estado são de pequeno porte (IBGE,2023), fazendo-se necessária a avaliação isolada destes municípios.

A integração do saneamento básico à política de desenvolvimento urbano foi defendida pela Fundação Nacional de Saúde (Funasa), durante os debates na 6ª Conferência Nacional das Cidades. Na ocasião, a Funasa apresentou propostas para incluir o saneamento básico de maneira mais explícita nas diretrizes da política urbana, reforçando a articulação entre União, estados e municípios, a autonomia local e a participação social na formulação de políticas públicas. A proposta busca garantir que o planejamento urbano considere ações integradas de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e manejo de águas pluviais como elementos centrais para a qualidade de vida da população (FUNASA, 2026).

Frente ao exposto, a partir de dados dos órgãos oficiais, como o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico – SINISA e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o presente estudo tem como objetivo avaliar indicadores de abastecimento de água e coleta de esgoto nos municípios do estado do Paraná, com o objetivo de contribuir para

discussões e tomada de decisões voltadas ao desenvolvimento de políticas públicas, sugerindo que os municípios do analisados necessitem de suporte técnico.

Metodologia

A condução do estudo seguiu um conjunto de etapas metodológicas organizadas de forma sequencial, desde a definição dos critérios de seleção dos municípios até a análise dos indicadores de desempenho. Para facilitar a compreensão do processo, a Figura 1 apresenta um fluxograma que sintetiza as principais fases da pesquisa.

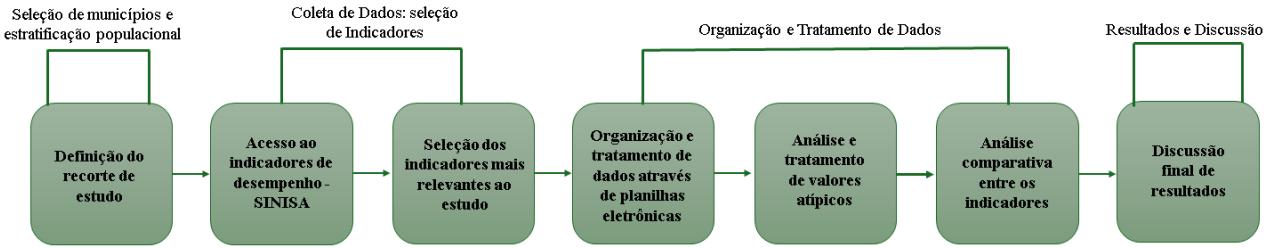


Figura 1: etapas do Procedimento Metodológico.

Seleção dos municípios com população inferior a 50 mil habitantes e estratificação populacional

Foram selecionados 364 municípios, correspondentes a 91,23% do total paranaense, distribuídos em todas as regiões do estado. A organização dos dados foi realizada mediante a estratificação populacional, conforme apresentado na Tabela 1. Na figura 2 estão assinalados, com os respectivos nomes, os municípios que não fizeram parte do rol de análises.

Tabela 1: Estratos populacionais dos municípios estudados.

Estrato Populacional	Quantidade de municípios	Faixas Populacionais (habitantes)
Estrato 1	206	0 - 10000
Estrato 2	101	10001 - 20000
Estrato 3	27	20001 - 30000
Estrato 4	18	30001 - 40000
Estrato 5	12	40001 - 50000

Fonte: IBGE (2023), adaptado pelas autoras (2026).

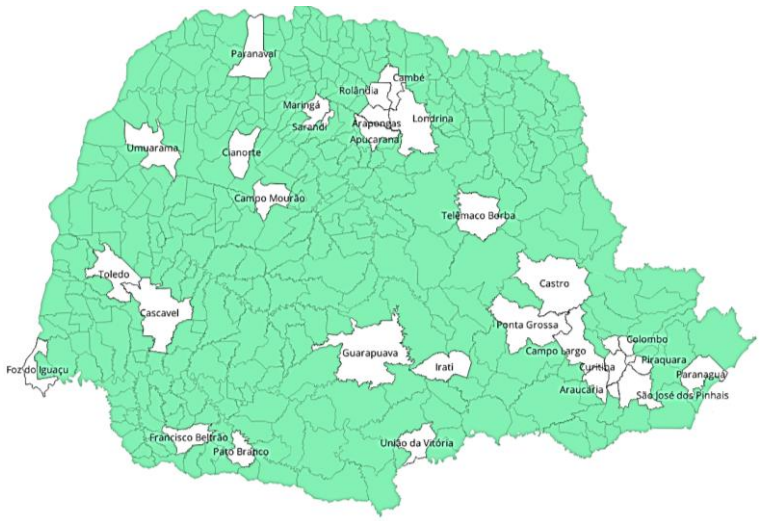


Figura 2: municípios do estado do Paraná que não fazem parte do presente estudo
Fonte: elaboração própria (2026)

Coleta de dados: seleção de indicadores

Foram analisados 13 indicadores de desempenho associados aos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, quadro 1. O objetivo principal consistiu em avaliar os níveis de cobertura e eficiência dos serviços prestados, bem como identificar possíveis contrastes entre municípios de diferentes portes populacionais.

Quadro 1: Indicadores de atendimento e operacionais selecionados para análise de sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário

Indicadores de Desempenho - Sistemas de Abastecimento de Água			
Atendimento	**Código**	**Parâmetro**	**Unidade de medida**
	IAG0001	Atendimento da população total com rede de abastecimento de água	Percentual (%)
	IAG0003	Atendimento da população rural com rede de abastecimento de água	Percentual (%)
Estruturais e Operacionais	IAG1001	Extensão de rede de distribuição de água por ligação	m/ligação
	IAG1002	Densidade de economias de água por ligação	econ./ligação
	IAG2001	Micromedição de água em relação ao volume disponibilizado para distribuição	Percentual (%)
	IAG2007	Consumo residencial médio per capita de água	l/hab/dia
	IAG2008	Volume de água disponibilizado para distribuição por economia	m³/economia/mês
	IAG2013	Perdas totais de água na distribuição	Percentual (%)
Indicadores de Desempenho - Sistemas de Esgotamento Sanitário			
Atendimento	**Código**	**Parâmetro**	**Unidade de medida**
	IES0001	Atendimento da população total com rede coletora de esgoto	Percentual (%)
	IES0003	Atendimento da população rural com rede coletora de esgoto	Percentual (%)
	IES0007	Atendimento dos domicílios totais com coleta e tratamento de esgoto	Percentual (%)
Estruturais e Operacionais	IES1001	Extensão de rede de esgoto por ligação	m/ligação

Fonte: SINISA (2023), adaptado pelas autoras (2026).

Organização e Tratamento de Dados

Os dados foram filtrados de acordo com os estratos populacionais e posteriormente organizados em planilhas eletrônicas, onde procedeu-se à verificação de valores atípicos, os quais poderiam estar relacionados a inconsistências de unidades de medida ou a erros de digitação. Assim, o tratamento dos dados consistiu na exclusão dos registros anômalos, de modo a diminuir os erros nas análises estatísticas subsequentes.

Análise de Indicadores

O processo de análise de indicadores consistiu na realização de avaliações gráficas e estatísticas, além de verificar a relação entre indicadores. Nessa etapa, foram conduzidas análises críticas dos serviços, evidenciando a presença ou ausência de relações com o porte populacional, considerando a estratificação dos municípios, bem como indicadores socioeconômicos potencialmente associados, como o PIB per capita. Nessa perspectiva, os padrões identificados possibilitaram a interpretação e a discussão das condições dos serviços, da inferência de possíveis causas associadas ao seu desempenho.

Resultados e Discussão

Distribuição da população urbana e rural por estrato populacional

Com base na Figura 3, observa-se que, embora em todos os estratos populacionais haja predominância da população residente em áreas urbanas, verifica-se uma tendência de maior participação da população rural nos estratos de menor porte populacional. Nesse sentido, no estrato 1, 29,44% da população reside em áreas rurais, enquanto no estrato 5 esse percentual é de 13,65%. Essa diferença na ocupação entre os estratos pode ser um dos fatores associados às variações nos indicadores de atendimento, estruturais e operacionais dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário, que serão discutidos nos tópicos seguintes.

Atendimento com rede de abastecimento de água e rede coletora de esgoto total e rural

No que se refere à disponibilização de informações, observa-se que, para os indicadores de abastecimento de água, apenas dois municípios, ambos pertencentes ao Estrato 1, deixaram de fornecer dados ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA). Em relação ao esgotamento sanitário, verificou-se ausência de dados de 75 municípios, o que representa 20,61% do total analisado. Dentre estes, 53 pertencem ao Estrato 1, correspondendo a aproximadamente 25% dos municípios desse grupo; 19 pertencem ao Estrato 2, representando cerca de 18,8%; e, nos Estratos 3, 4 e 5, apenas um município em cada estrato não disponibilizou informações.

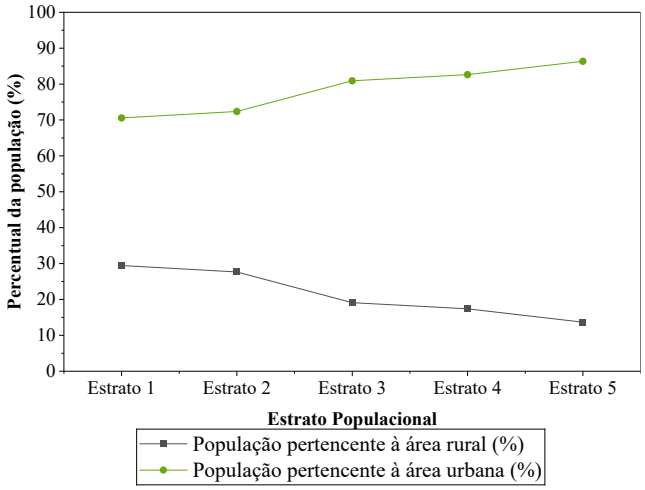


Figura 3: análise estratificada da distribuição da população residente em áreas rurais e urbanas (%).

A Figura 4 apresenta o percentual da população atendida por rede de abastecimento de água e rede coletora de esgoto, além do Produto Interno Bruto (PIB) per capita médio. Considerando o abastecimento de água, nenhum dos municípios avaliados alcançou a média estadual (89,49%) e nacional (84,14%). Já, considerando a rede coletora de esgoto, os municípios apresentaram indicadores abaixo da média estadual (77,51%), porém acima da média nacional (62,30%). Os maiores índices observados foram de 83,22% para abastecimento de água e 75,52% para coleta de esgoto, ambos significativamente inferiores às metas estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento.

Verificou-se que os maiores percentuais de atendimento se concentram nos municípios dos Estratos 4 e 5, caracterizados por maiores populações. Contudo, tais resultados não apresentam associação direta com o PIB per capita, indicando que, no estado do Paraná, a abrangência dos serviços de saneamento não está necessariamente vinculada ao nível de riqueza municipal. Mas pode estar associado ao distanciamento entre as unidades econômicas. Os municípios com menor número de habitantes, tendem a ter um maior distanciamento entre as unidades econômicas, mesmo em áreas urbanas. À medida que aumenta o número de habitantes, a tendencia é o aumento da verticalização residencial, o que permite o aumento da população atendida, sem necessariamente aumentar a rede pública. Essa avaliação vai ao encontro da análise do desvio padrão que sugere maior homogeneidade entre municípios mais populosos. Por outro lado, para os indicadores de atendimento por rede coletora de esgoto, o desvio padrão não apresenta relação clara com o porte populacional, indicando maior heterogeneidade entre as unidades municipais. Contudo, é imprescindível notar que outros aspectos, como topografia e tipo de solo influenciam na disposição das redes de saneamento.

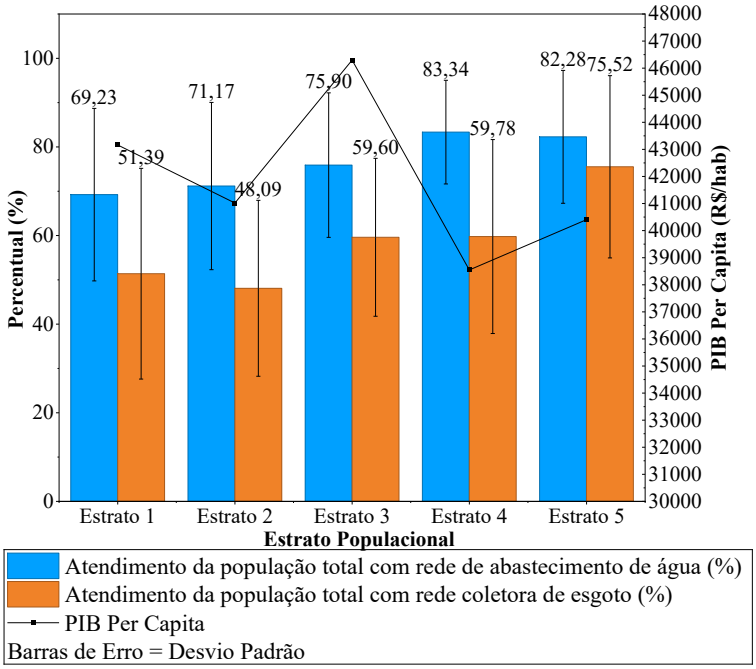


Figura 4: percentual de atendimento por rede de abastecimento de água e rede coletora de esgoto (%), por estrato populacional

Atendimento de domicílios gerais com coleta e tratamento de esgoto

A Figura 5 apresenta o percentual do atendimento domicílios com coleta e tratamento de esgoto, o PIB per capita e desvio padrão do indicador por estratos populacionais. O percentual de atendimento de com coleta e tratamento de esgotos é inferior a 50% nos municípios dos estratos 1 e 2. Esse percentual é inferior ao nível de atendimento estadual (71,74%) e superior ao nível de atendimento nacional (52,57%). Destaca-se que o maior percentual observado corresponde a 68,74% no estrato 5. No que diz respeito ao desvio padrão, observa-se menor desvio padrão nos estratos mais populosos, indicando maior homogeneidade deste indicador. Assim, é razoável inferir que os níveis de atendimento aumentam com o aumento do número de habitantes. Observa-se, ainda, que o PIB per capita não apresenta relação direta com o comportamento do indicador, uma vez que estratos com maiores valores de PIB não correspondem, necessariamente, aos maiores níveis de atendimento.

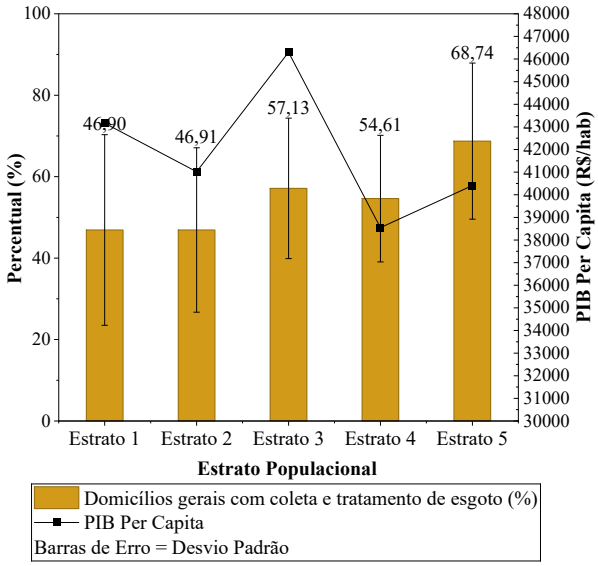


Figura 5: atendimento com coleta e tratamento de esgoto em domicílios (%), por estrato populacional

Indicadores de extensão de redes e densidade de economias por ligação

As Figuras 6a e 6b revelam uma tendência de relação inversa entre os indicadores de extensão das redes de água e esgoto e a densidade de economias por ligação. Observa-se que os estratos mais populosos apresentam sistemas mais compactos e maior densidade de economias, sugerindo menor dispersão das unidades consumidoras e maior aproveitamento da infraestrutura existente, o que corrobora a afirmação de que a construção de prédios, é diretamente associada ao maior número de habitantes, permitindo atender mais pessoas sem ampliar a rede pública.

A análise do desvio padrão das extensões de rede de água e esgoto é maior nos estratos com municípios menos populosos e menor nos estratos de maior população.

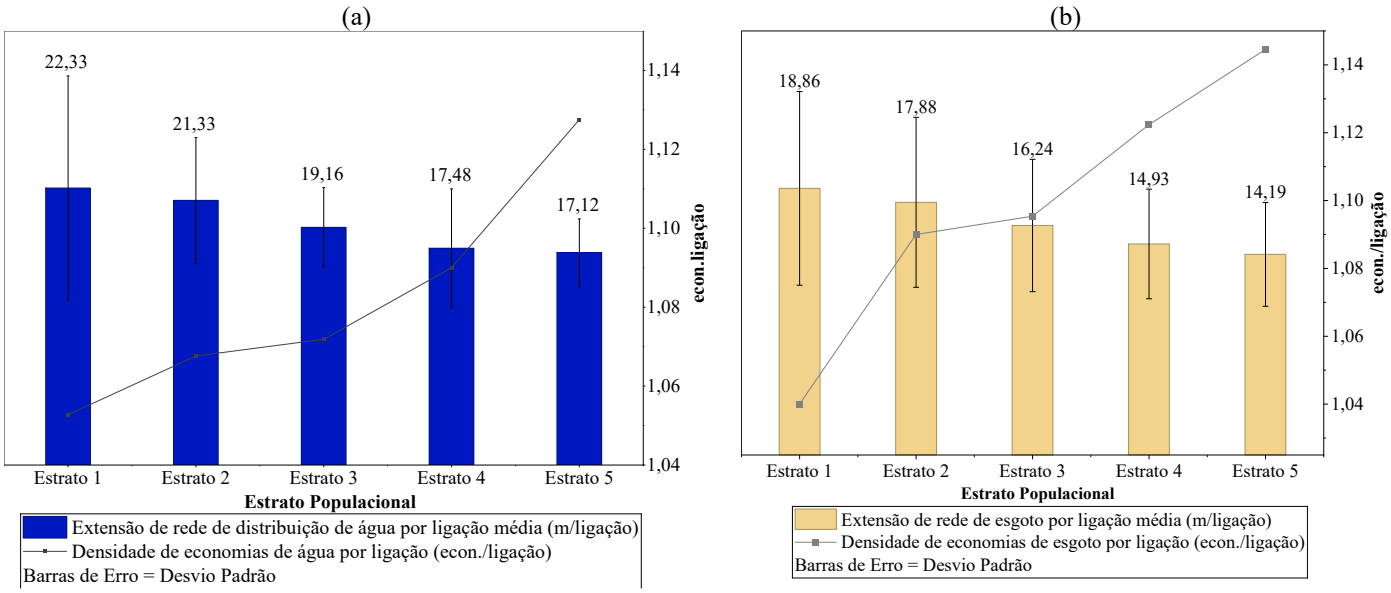


Figura 6: relação entre a extensão das redes de água (a) e esgoto (b) por ligação (m/ligação) e a densidade de economias por ligação (econ.ligação), por estrato populacional

Perdas totais de água

Análise da figura 7, permite verificar que os maiores percentuais de perdas de água no abastecimento concentram-se nos estratos correspondentes aos municípios com maior número de habitantes, mas em sistemas com menor extensão por ligação. Sob essa perspectiva, seria esperado que redes mais extensas apresentassem maior suscetibilidade às perdas. Esse achado ratifica que a magnitude das perdas não está diretamente associada ao comprimento das redes, mas sim sob a influência de outros condicionantes estruturais como tubulações antigas ou malconservadas, e operacionais, como pressões excessivas, entre outros.

A análise do desvio padrão indica heterogeneidade do indicador em todos os estratos de municípios analisados.

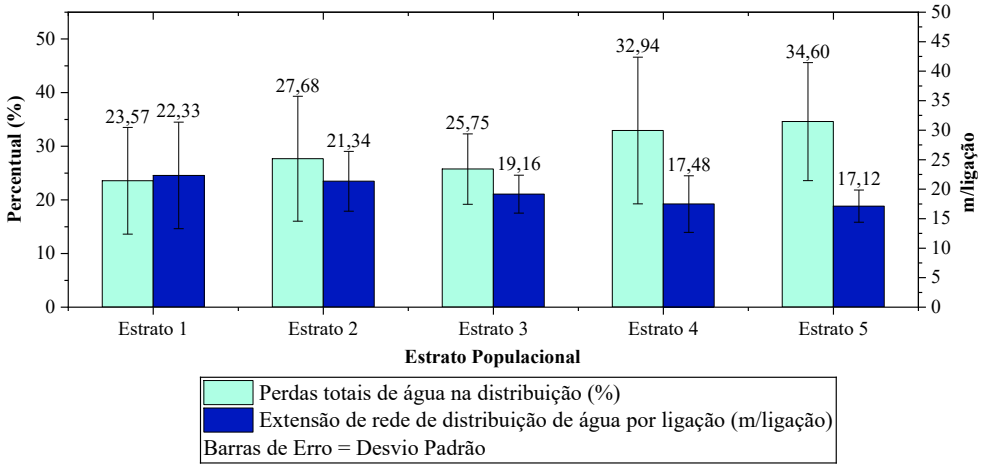


Figura 7: relação entre perdas totais de água na distribuição (%) e extensão de rede por ligação (m/ligação), por estrato populacional

A Figura 8 indica uma tendência de relação inversa entre as perdas totais de água na distribuição e os índices de micromedição em relação ao volume disponibilizado. De modo geral, observa-se que estratos com maiores níveis de micromedição tendem a apresentar menores percentuais de perdas aparentes, sugerindo maior controle operacional e financeiro do sistema.

O estrato 1, apresenta o maior nível de micromedição (73,78%) e possui também o menor percentual de perdas (23,57%), revelando que as perdas nesse extrato são, majoritariamente reais. Sugerindo que maior atenção ao controle de perdas deve estar na conservação e monitoramento da rede. O estrato 5, com menor nível de micromedição (65,00%), apresenta o maior percentual de perdas aparentes (34,60%).

A análise desse indicador permite identificar qual estratégia para diminuição das perdas deve ser empregada, maior atenção à micromedição ou à manutenção da rede. Dessa forma, os resultados reforçam a associação entre maiores níveis de micromedição e a redução das perdas aparentes. Nesse sentido, a utilização de hidrômetros obsoletos, com baixos valores de IDM, também é um fator que pode interferir no resultado das perdas aparentes.

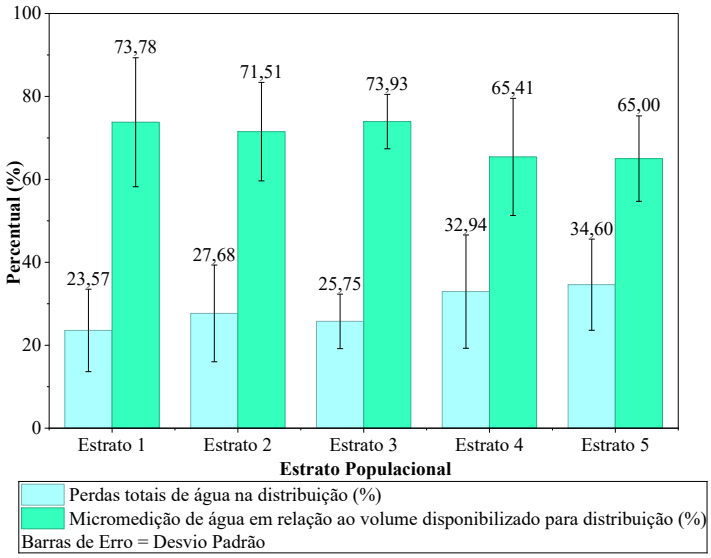


Figura 8: relação entre perdas totais de água na distribuição e índices de micromedição, por estrato populacional

A Figura 9a apresenta a relação entre as perdas totais de água na distribuição e o volume de água disponibilizado por economia. De modo geral, observa-se que estratos com maiores percentuais de perdas tendem a apresentar maiores volumes de

água disponibilizados por economia, indicando que parte do volume produzido está de fato sendo perdido. Essa conclusão é reafirmada quando se observa, na Figura 9b, uma relação inversa entre as perdas e o consumo residencial médio per capita. Importante registrar que o estrato 4 apresenta comportamento distinto deste. Sendo necessário maiores análises para uma avaliação completa do indicador.

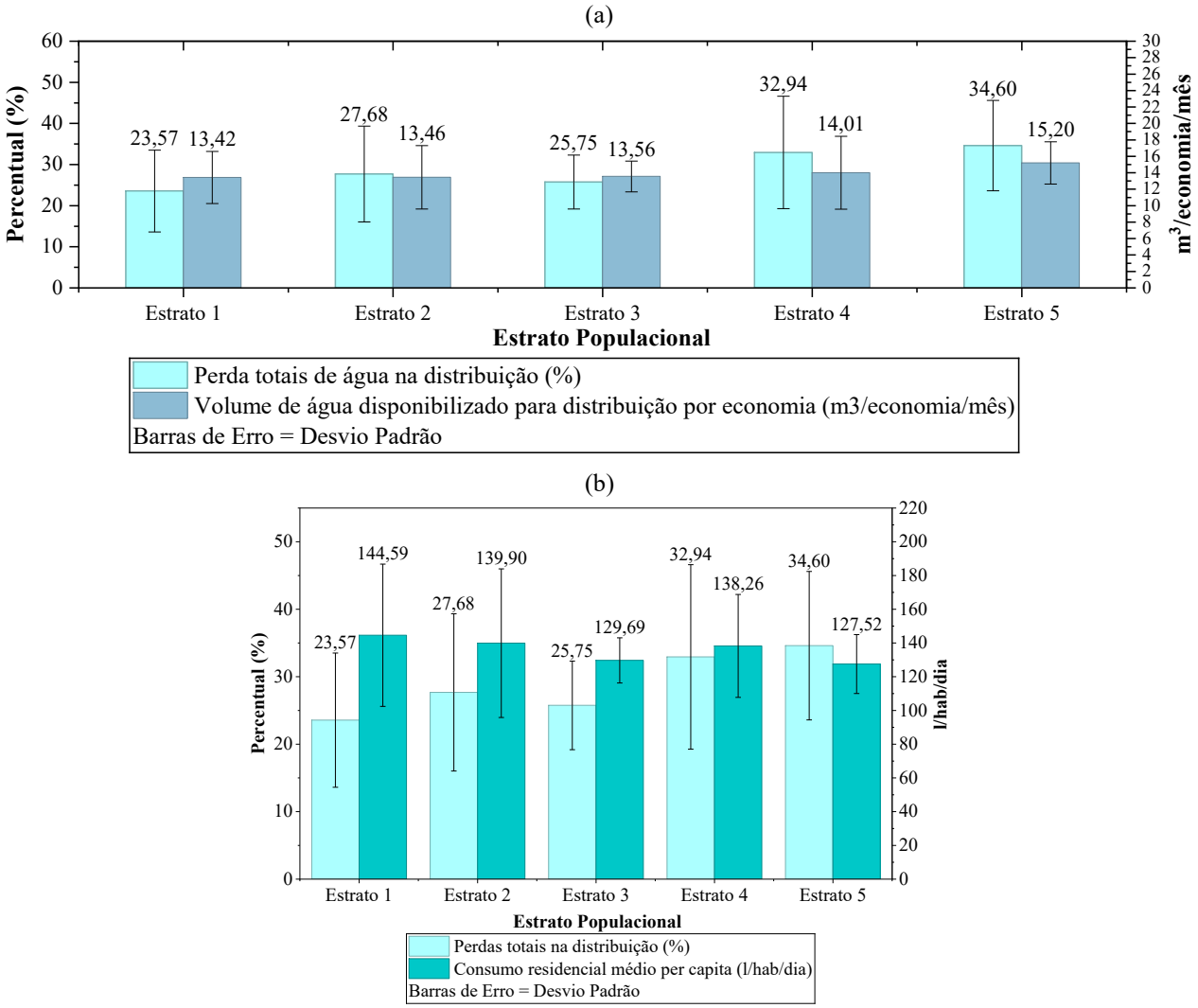


Figura 9: Relação entre perdas totais de água na distribuição, volume de água disponibilizado por economia e consumo residencial per capita, por estrato populacional

Comentários finais

A análise dos indicadores de desempenho dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário em municípios paranaenses de pequeno porte evidencia que, apesar dos avanços normativos e das metas estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento e pelos ODS, persistem desafios para a universalização e eficiência desses serviços. Os resultados demonstram que os percentuais de atendimento permanecem aquém das médias estadual e nacional, especialmente em localidades com menor número de habitantes onde a, provável, baixa verticalização e ampla espacialização territorial dificulta e encarece a expansão das redes.

Além disso, verificou-se que as perdas de água na distribuição não estão diretamente relacionadas à extensão das redes, mas sim a fatores operacionais como falhas na micromedição, conservação e manutenção e pressões excessivas na rede. Este comportamento reforça a necessidade de investimentos em modernização tecnológica e gestão eficiente, mais do que apenas na ampliação física das redes.

Portanto, o estudo contribui para a compreensão das desigualdades nos indicadores do setor de saneamento sobretudo em municípios de pequeno porte, cujas especificidades devem ser consideradas nas estratégias de universalização, eficiente, dos serviços.

Agradecimentos

Agradeço à UTFPR e à Profa.Dra.Mariane Kempka pela orientação e contribuições valiosas para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ASSIS, Aldenir Gomes de *et al.* **O saneamento básico na perspectiva de diferentes modelos de gestão: uma análise comparativa em municípios de pequeno porte no estado da Paraíba**. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). **Perdas em sistemas de abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate.** São Paulo: ABES, 2013.

BERNARDINO, Kamila Rocha *et al.* **O desafio do saneamento em comunidades rurais e a importância do monitoramento da qualidade da água**. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, v. 14, n. 2, p. 255–273, 2020.
BORGES, Elsio Júnior Bonati. **Análise da micromedição do volume de água potável domiciliar e sua influência no cálculo das perdas no sistema de distribuição**. 2007.

CALDAS, Karolyne Paulino Freire de *et al.* **Consumo per capita e perdas no sistema de distribuição de água no município de Boa Vista/RR**. 2023.

CERQUEIRA, Mônica Chagas. **Indicadores de eficiência e sustentabilidade para avaliação de desempenho de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário: estudo de caso no município de Jaru–RO**. 2024.

COSTA, Samuel Alves Barbi *et al.* **Indicadores em saneamento: avaliação da prestação dos serviços de água e de esgoto em Minas Gerais**. *Revista da UFMG*, v. 20, n. 2, p. 334–357, 2013.

SILVA, Fernando José Araújo da. **Perda de água em sistemas públicos de abastecimento no Ceará**. *Revista Tecnologia*, v. 26, n. 1, 2005.

SOUSA VIEIRA, José Moacir de; VALÉRIO FILHO, Mario; MENDES, Rodolfo Moreda. **Desigualdades no saneamento de pequenas cidades de uma região metropolitana**. *Geografia (Londrina)*, v. 34, n. 1, p. 109–129, 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Manual do saneamento básico: entendendo o saneamento básico ambiental no Brasil e sua importância socioeconômica**. 2012. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/manual-imprensa.pdf. Acesso em: 07 set. 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS. **Estudo sobre perdas de água no Brasil: 2024**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/06/Estudo-da-GO-Associados-Perdas-de-Agua-de-2024-V2.pdf. Acesso em: 05 abr. 2026.

LEITE, Danilo Martins; SOARES, Wilker Fernandes. **Indicadores de abastecimento de água potável e esgotamento sanitário: uma avaliação das cidades mais populosas do Rio Grande do Norte**. 2024.

MACEDO, Joel de Jesus. **Impactos dos investimentos em saneamento básico no Paraná sobre a saúde pública no período 2012 a 2021**. *Revista Digital do Tribunal de Contas do Estado do Paraná*, Curitiba, n. 43, p. 45–69, 2024. Disponível em: https://revista.tce.pr.gov.br/wp-content/uploads/2024/06/4Artigo-3-N43-2024.pdf. Acesso em: **9 abr. 2026**.

MOTA, João José Pessoa; SOUSA, C. D. S. S.; SILVA, Alessandro Costa da. **Saneamento básico e seu reflexo nas condições socioambientais da zona rural do baixo Munim (Maranhão)**. *Revista Caminhos de Geografia*, v. 16, n. 54, p. 140–160, 2015.
NIRAZAWA, Alyni Nomoto; OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. **Indicadores de saneamento: uma análise de variáveis para elaboração de indicadores municipais**. *Revista de Administração Pública*, v. 52, n. 4, p. 753–763, 2018.

PERTEL, Monica; AZEVEDO, José Paulo Soares de; VOLSCHAN, Isaac. **Uso de indicadores de perdas para seleção de um benchmarking entre as companhias estaduais de serviço de distribuição de água no Brasil**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 1, p. 159–168, 2016.

SINISA – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO. **Resultados SINISA**. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa. Acesso em: 04 abr. 2026.

STULP, Jéssica Régia Portilho Rezende. **Saneamento básico no Paraná: análise da eficiência das unidades da Sanepar nos anos de 2007 e 2022**. 2025.

INDICADORES PER CAPITA DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO URBANO: ESTUDO DE CASO E PROJEÇÕES PARA LIMEIRA-SP

Jonathan Lopes Pereira[1], Rosa Cristina Cecche Lintz[2], Tikara Okawada[3], Luísa Andréia Gachet[4]
[1] Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT-UNICAMP), e-mail: j289972@dac.unicamp.br
[2] Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT-UNICAMP), e-mail: rosalint@unicamp.br
[3] Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT-UNICAMP), e-mail: t720552@dac.unicamp.br
[4] Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT-UNICAMP), e-mail: gachet@unicamp.br

Palavras-chave: Gestão de RCC; Indicadores per capita; Sustentabilidade Urbana.

Resumo

O gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil (RCC) configura-se como um dos principais desafios para a promoção de cidades sustentáveis, resilientes e alinhadas aos princípios da economia circular. No contexto brasileiro, marcado por acelerado crescimento urbano e padrões construtivos intensivos em recursos, a adequada gestão desses resíduos torna-se essencial para a mitigação de impactos ambientais, redução de áreas de descarte irregular e otimização do uso de infraestruturas públicas. Neste sentido, o presente estudo analisa a dinâmica de geração de RCC no município de Limeira (SP), adotando indicadores per capita como ferramenta central para avaliação e projeção da demanda por sistemas de manejo. A pesquisa está alinhada às temáticas de planejamento ambiental, gestão integrada de resíduos sólidos e uso de tecnologias e dados para apoio à tomada de decisão. A metodologia empregada envolveu a coleta e sistematização de dados quantitativos referentes à geração de RCC no período de 2019 a 2024, obtidos por meio do Sistema de Informação ao Cidadão (e-SIC), complementados por análises estatísticas e aplicação de modelos de projeção demográfica até o horizonte de 2050. Foram considerados cenários de crescimento populacional e transição demográfica, permitindo a construção de uma análise prospectiva da geração de resíduos e suas implicações para o planejamento urbano. Os resultados evidenciam que o município apresenta um indicador médio de geração de 1,49 kg/hab.dia, valor significativamente superior às médias nacional (0,60 kg/hab.dia) e da região Sudeste (0,74 kg/hab.dia), indicando um padrão elevado de geração associado à dinâmica construtiva local e ao processo de expansão urbana. As projeções indicam um crescimento contínuo da geração até aproximadamente o ano de 2035, quando se atinge um pico, seguido por uma tendência de declínio gradual, em consonância com a estabilização populacional prevista. A análise espacial e funcional da infraestrutura existente demonstra que os atuais 11 Ecopontos apresentam capacidade potencial para atender à demanda futura. No entanto, destaca-se a necessidade de reestruturação territorial e realocação estratégica dessas unidades, considerando o espraiamento urbano e a distribuição desigual da geração de RCC. Ademais, reforça-se a importância da integração com instrumentos de planejamento urbano e ambiental, bem como da adoção de políticas públicas voltadas à redução, reutilização e reciclagem dos resíduos. Conclui-se que a gestão eficiente dos RCC em Limeira depende não apenas da capacidade instalada, mas de estratégias integradas que envolvam planejamento territorial, governança ambiental e uso de indicadores como suporte à tomada de decisão. O estudo contribui para o avanço das discussões no âmbito da engenharia ambiental ao propor uma abordagem baseada em dados e projeções, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis), reforçando a importância de políticas públicas orientadas à sustentabilidade urbana.

Introdução

A gestão dos Resíduos da Construção Civil (RCC) constitui um dos principais desafios para a sustentabilidade urbana contemporânea, devido ao elevado consumo de recursos naturais e à expressiva geração de resíduos pelo setor (SAKTHIBALA et al., 2025).

Em escala global, estima-se que a geração de RCC alcance a marca de 2,2 bilhões de toneladas por ano, e sua disposição inadequada contribui diretamente para a degradação ambiental e o aumento dos custos públicos associados à limpeza corretiva (ABREMA, 2024; SAKTHIBALA et al., 2025).

No cenário brasileiro, a média nacional de geração é estimada em 0,60 kg/hab.dia (ABRELPE, 2024), porém municípios que atravessam processos de urbanização acelerada ou espraiamento territorial apresentam indicadores significativamente superiores (ANDRADE; SANTOS, 2025).

Estrategicamente localizada a 154 km de São Paulo, na porção centro-leste do estado, (Figura 01), Limeira constitui um importante entroncamento rodoferroviário servido pelas rodovias Anhanguera, Bandeirantes e Washington Luís , integrando polos industriais e de inovação. Historicamente, o município transicionou de um polo agrícola - impulsionado pelos ciclos do café iniciado em 1828 e da citricultura que atingiu seu auge na década de 1940 - para um consolidado centro industrial e de serviços (LIMEIRA, 2015; ACIL, [s.d]). Atualmente, a cidade destaca-se nos setores de metalurgia, autopeças e como o principal polo de joias folheadas do país. Apesar da forte industrialização, o município mantém até os dias atuais as culturas de cana-de-açúcar e laranja como elementos centrais de sua economia agrícola (IBGE, 2024).

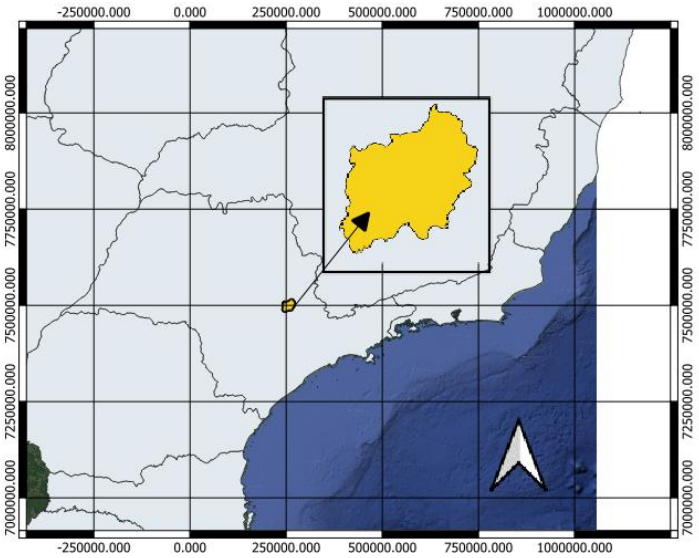


Figura 01 - Mapa de trecho do Brasil com o destaque da localização do município de Limeira. Fonte: Próprio Autor

O município de Limeira (SP), que ocupa uma área territorial total de 580,711 km² (IBGE, 2024), (Figura 02), exemplifica essa dinâmica, tendo apresentado uma expansão da mancha urbana de aproximadamente 770% entre os anos de 1970 e 2022 (IBGE, 2024; SEADE, 2024). Nesse período, a área urbanizada saltou de 9,10 km² para 79,26 km² , consolidando um intenso processo de espraiamento urbano - *urban sprawl*. O espraiamento urbano (*urban sprawl*) é definido como um fenômeno de crescimento horizontal e difuso de uma cidade, que se expande de forma muitas vezes desordenada em direção a áreas rurais ou menos urbanizadas ao redor do núcleo central (LIMA et al., 2019). Esse processo caracteriza-se por uma ocupação territorial de baixa densidade, na qual a expansão física da mancha urbana ocorre em um ritmo significativamente superior ao crescimento populacional (LIMA et al., 2021). Esse crescimento horizontal superou largamente o aumento populacional, uma assimetria que se tornou sistemática a partir da década de 1980. Entre 2010 e 2022, por exemplo, enquanto a população urbana cresceu apenas 0,56%, a mancha urbana expandiu-se a uma taxa média de 3,65% ao ano (IBGE, 2024; SEADE, 2024).

Essa ocupação difusa e de baixa densidade resulta na criação de extensos vazios urbanos e "franjas" periféricas, elevando significativamente os custos de manutenção da infraestrutura e dificultando a fiscalização efetiva do território (BRANQUINHO; SOUSA, 2024). Atualmente, o déficit estrutural do poder público é evidente: o município conta com apenas seis fiscais ativos para monitorar quase 80 km² de área urbana, o que resulta numa proporção crítica de aproximadamente 13,21 km² por fiscal (LIMEIRA, 2025). Essa fragilidade na vigilância, aliada à distância logística das novas frentes de expansão e eixos de verticalização - impulsionados por infraestruturas rodoviárias, polos de ensino e programas habitacionais -, favorece a clandestinidade e compromete a cobertura de uma infraestrutura de manejo eficiente para os resíduos sólidos e resíduos de construção civil (BRASIL, 2010; LIMEIRA, 2015).

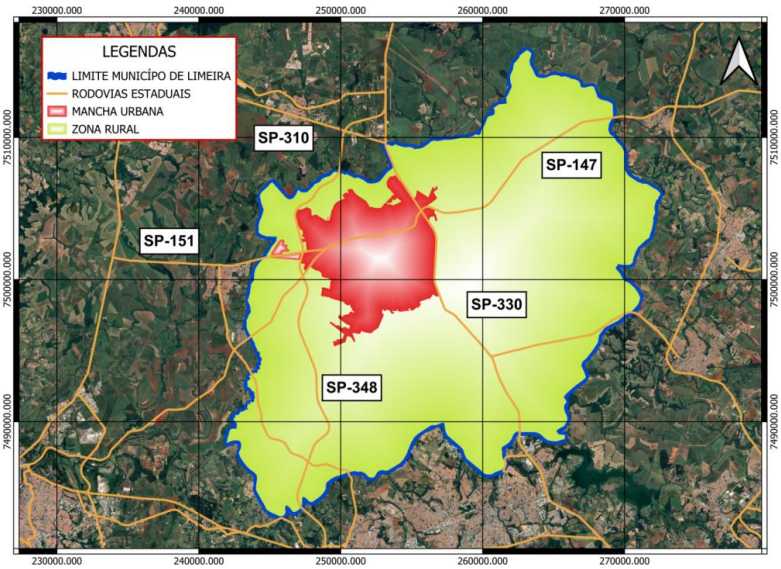


Figura 02 - Mapa do município de Limeira com destaque para os seus limites, mancha urbana e rodovias estaduais. Fonte: Próprio Autor

O arcabouço legal vigente no país, ancorado na Resolução CONAMA nº 307/2002 e na Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305/2010, preconiza a triagem na fonte e a reciclagem; contudo, a persistência do descarte irregular em áreas urbanas evidencia uma lacuna persistente entre a norma e a prática operacional (BRASIL, 2002, 2010; SILVA; MARQUES NETO, 2020).

Neste panorama, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) surgem como ferramentas essenciais para o diagnóstico espacial e o suporte à tomada de decisão baseada em evidências técnicas (DADHICH; DADHICH, 2026; SILVA et al., 2024). A utilização de indicadores per capita integrados ao ambiente SIG permite que a gestão de resíduos deixe de ser meramente reativa e passe a ser preditiva, facilitando o dimensionamento estratégico de infraestruturas resilientes (SILVA et al., 2024). Tais abordagens são fundamentais para o alcance das metas estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, 11 e 12 da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2025). Diante desse cenário, este artigo analisa a eficiência da gestão de RCC em Limeira por meio desses indicadores, fundamentando o estudo de demandas futuras e a otimização da rede logística municipal.

Materiais e Métodos

O estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada com abordagem mista. A coleta de dados secundários referente à geração de RCC em Limeira entre 2019 e 2024 foi realizada por meio do protocolo e-SIC 073/2025 (LIMEIRA, 2025). O cálculo do indicador per capita seguiu a fórmula matemática estabelecida pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), conforme equação (01):

$$I_{per\ capita} = \frac{Vol.RCC}{P\ x\ t} \quad (01)$$

Onde:
$I_{per\ capita}$ = Indicador de geração per capita (kg/hab.dia);
Vol. RCC = Massa total de RCC gerada no período (kg);
P = População total projetada para o respectivo período;
t = Período de tempo considerado (número de dias).

Para a análise comparativa, foram coletados dados de municípios vizinhos (Piracicaba, Araras e Campinas) via Lei de Acesso à Informação. As projeções de demanda futura até o ano de 2050 basearam-se no estudo técnico "Limeira em Números" da Câmara Municipal e nas estimativas populacionais do IBGE e Fundação SEADE, aplicando-se o indicador médio obtido na série histórica.

Resultados e discussões

Indicador per capita de RCC

Entre 2019 e 2024, Limeira gerou um total acumulado de 950.761,95 toneladas de RCC. A análise da origem revelou que as obras públicas são o principal vetor, respondendo por 51,8% do volume total, seguidas pelos Ecopontos (25,1%) e obras particulares (23,1%). O indicador municipal médio de 1,49 kg/hab.dia (Figura 03) situa Limeira em um patamar elevado, alinhado à média do Estado de São Paulo de 1,49 kg/hab.dia (ANDRADE; SANTOS, 2025), mas superando em 148% a média nacional.

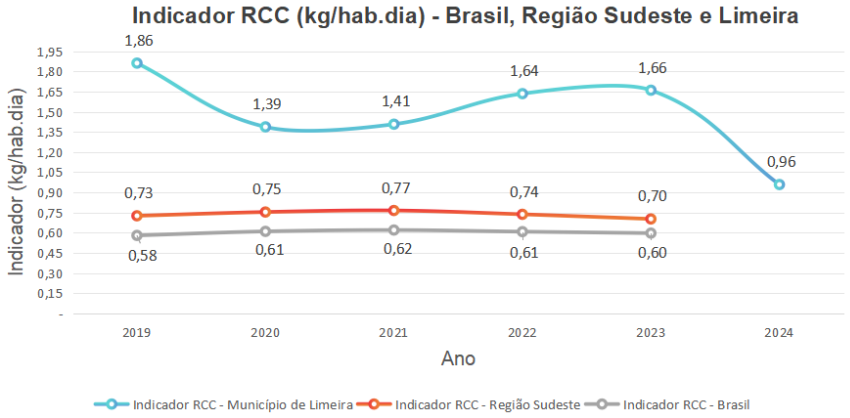


Figura 03 - Indicador Per Capita de RCC - Brasil, Região Sudeste e Limeira.
Fonte: Próprio Autor

A comparação evidencia que Limeira e Piracicaba compartilham desafios semelhantes, com indicadores muito acima da média nacional de 0,60 kg/hab.dia. O contraste mais relevante ocorre com Campinas (0,81 kg/hab.dia), que apresenta valores

mais próximos à média regional (Figura 04). Essa discrepância sugere que a gestão em Campinas pode estar mais alinhada às metas da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), possivelmente devido a sistemas de controle mais rigorosos e infraestrutura de reciclagem integrada, servindo como modelo para Limeira.

Contudo, é imperativo ressaltar que os dados analisados baseiam-se estritamente nos registros oficiais fornecidos pela municipalidade. Estima-se que, ao considerar o fluxo informal (que compreende os descartes irregulares e as movimentações não declaradas), o volume real de geração de RCC possa atingir de duas a três vezes o montante registrado nos sistemas de controle público. Essa expressiva subnotificação reforça a necessidade premente de aprimorar os mecanismos de mensuração e rastreabilidade para garantir a precisão estatística necessária ao planejamento de políticas públicas eficazes.

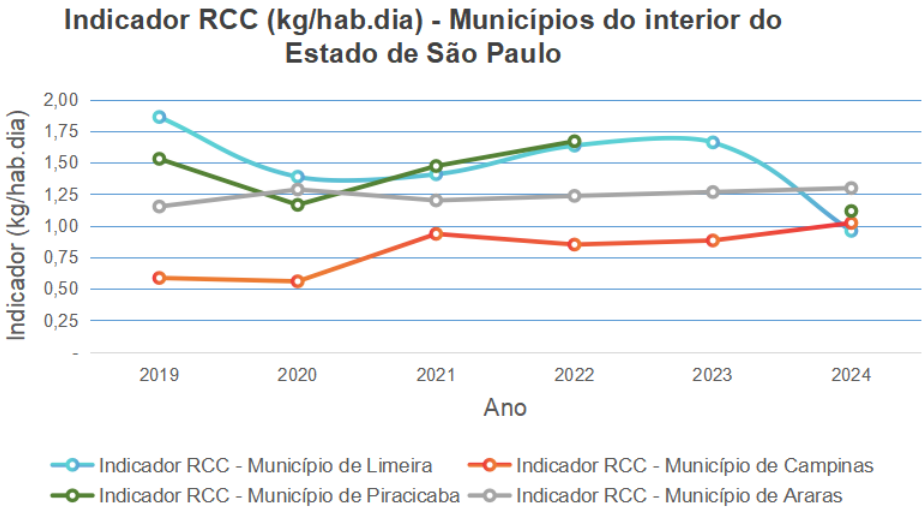


Figura 04 - Indicador Per Capita de RCC - Municípios de Limeira, Campinas, Piracicaba e Araras.
Fonte: Próprio Autor

A aplicação do indicador médio histórico (1,49 kg/hab.dia) sobre as projeções demográficas permite estimar a carga futura sobre o sistema de manejo municipal. Utilizando dados do estudo técnico "Limeira em Números" da Câmara Municipal, o volume total projetado segue a tendência apresentada na Tabela 01.

Ano	População Estimada	Indicador RCC - Limeira (kg/hab.dia)	Volume de RCC total estimado (t)
2025	301.292,00	1,49	163.857,65
2030	307.308,00	1,49	167.129,46
2035	308.536,00	1,49	167.797,30
2040	306.848,00	1,49	166.879,28
2045	303.012,00	1,49	164.793,08
2050	296.683,00	1,49	161.351,05

Tabela 01 - Projeção de Volume Total Estimado de RCC no município de Limeira (2025–2050).
Fonte: IBGE e Câmara Municipal de Limeira - adaptado pelo autor

As projeções indicam que o município atingirá o pico de geração de RCC em 2035. A partir deste marco, observa-se uma inversão da tendência, com um declínio gradual totalizando uma redução de aproximadamente 6.446,25 toneladas entre 2035 e 2050, acompanhando o envelhecimento populacional e a redução das taxas de crescimento demográfico.

Distribuição Geoespacial e Diagnóstico da Rede de Ecopontos

A rede de infraestrutura para o recebimento de pequenos volumes de RCC em Limeira é composta por 11 unidades de Ecopontos, distribuídas de forma assimétrica pelo território municipal. A análise geoespacial revela que a maior concentração de unidades ocorre na Região Oeste (04 unidades), seguida pelas Regiões Sul (03 unidades) e Leste (03 unidades). Em contraste crítico, a Região Norte é atendida por apenas uma única unidade formal (Figura 05).

Essa distribuição desigual não acompanhou integralmente a dinâmica de espraiamento urbano observada nas últimas décadas. A centralização do serviço na Região Norte impõe uma pressão operacional severa sobre o Ecoponto Anavec, que opera com uma demanda 142% superior à média municipal. Outro ponto de alta solicitação é o Ecoponto Lagoa Nova, na Região Sul, cujo volume expressivo é atribuído à facilidade de localização e acesso viário estratégico.

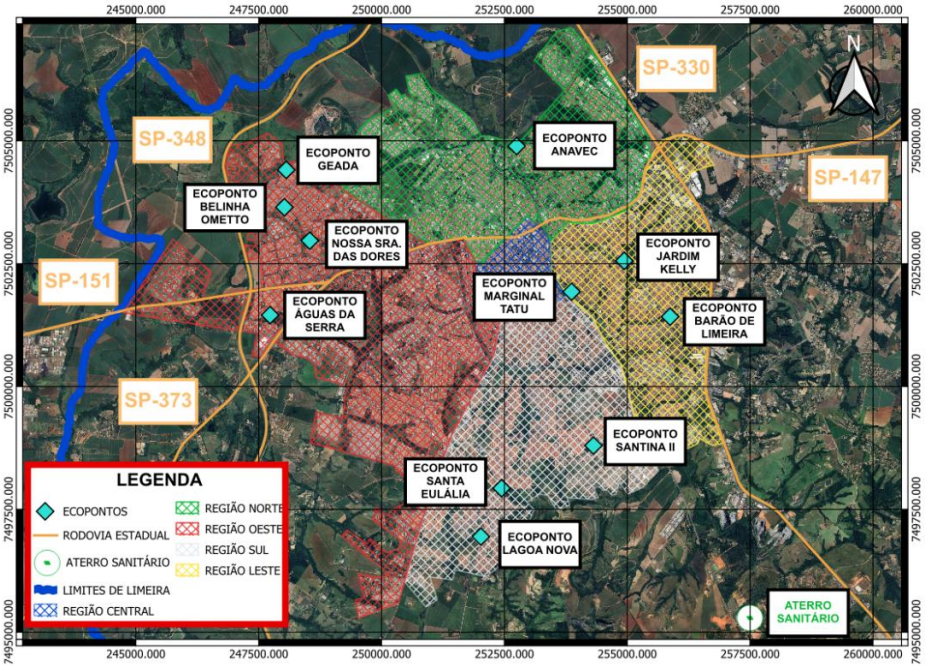


Figura 05 - Localização dos 11 Ecopontos destacados no mapa urbano do município de Limeira.
Fonte: Próprio Autor

Em oposição, observa-se um cenário de subutilização em outras áreas da cidade. A Região Oeste, apesar de possuir a maior cobertura quantitativa, apresenta a menor eficiência de coleta oficial, com uma média de recebimento por unidade 43,56% inferior à média municipal. No setor Leste, o Ecoponto Jardim Kelly também registra baixa demanda, fator associado à sua localização de difícil acesso para os pequenos geradores. Esse desequilíbrio demonstra que a suficiência da rede não é apenas numérica, mas depende da realocação estratégica para atender aos novos eixos de adensamento urbano.

A rede de Ecopontos de Limeira, destinada ao atendimento de pequenos geradores (volumes de até 1 m³), consolidou-se como o componente mais estável do sistema de gestão municipal. Enquanto os volumes oriundos de obras públicas apresentam extrema volatilidade vinculada a projetos específicos, a entrega voluntária nos Ecopontos manteve uma média constante de aproximadamente 39.800 toneladas por ano no período de 2019 a 2024, respondendo por 25,1% (238.963,20 t) do volume total de RCC destinado ao aterro de inertes.

O indicador médio de geração per capita específico para os Ecopontos foi calculado em 0,37 kg/hab.dia (Tabela 02). Embora este valor represente o fluxo oficial registrado nas balanças municipais, a realidade em campo sugere uma subnotificação expressiva. Estima-se que, devido ao descarte irregular nas "franjas" da cidade e às movimentações não declaradas, o volume real de pequenos descartes possa atingir de duas a três vezes o montante registrado nos sistemas de controle público.

Ano	População Estimada	Indicador RCC - Ecopontos de Limeira (kg/hab.dia)	Volume de RCC Ecopontos estimado (t)
2025	301.292,00	0,37	40.689,48
2030	307.308,00	0,37	41.501,95
2035	308.536,00	0,37	41.667,79
2040	306.848,00	0,37	41.439,82
2045	303.012,00	0,37	40.921,77
2050	296.683,00	0,37	40.067,04

Tabela 02- Projeção de Volume Total Estimado de RCC em Ecopontos de Limeira (2025–2050).
Fonte: IBGE e Câmara Municipal de Limeira - adaptado pelo autor

A análise técnica da infraestrutura instalada, confrontada com as projeções de geração de resíduos fundamentadas na dinâmica populacional, indica que o número total de 11 unidades de Ecopontos existentes é quantitativamente suficiente para absorver a demanda projetada para o município de Limeira até o ano de 2050. As estimativas mostram que o volume de RCC coletado nessas unidades em 2050 (aproximadamente 40.067,04 t) será muito próximo ao patamar registrado em 2025, o que dispensa a necessidade de ampliação do número total de unidades no perímetro urbano.

Contudo, embora a rede seja numericamente adequada, sua eficácia depende diretamente da realocação estratégica das unidades. O intenso fenômeno de espraiamento urbano, que resultou em um crescimento de 770% da mancha urbana, exige que

a infraestrutura acompanhe a nova morfologia da cidade. Atualmente, observa-se um descompasso geográfico: unidades em áreas de ocupação consolidada, como a Região Oeste, permanecem subutilizadas, enquanto a Região Norte enfrenta sobrecarga operacional. Portanto, a gestão futura deve priorizar a inteligência geográfica, deslocando equipamentos ociosos para as novas frentes de expansão e eixos de verticalização, garantindo que a distância logística não induza o gerador ao descarte irregular nas "franjas" urbanas.

Considerações finais

O presente estudo permitiu diagnosticar que a gestão de Resíduos da Construção Civil (RCC) em Limeira (SP) enfrenta desafios estruturais que transcendem a disponibilidade física de equipamentos. A utilização do indicador de geração per capita mostrou-se uma ferramenta de inteligência geográfica indispensável.

A análise dos indicadores revelou que o município apresenta uma taxa média de geração de 1,49 kg/hab.dia, valor substancialmente superior às médias nacional (0,60 kg/hab.dia) e da Região Sudeste (0,74 kg/hab.dia).

A análise dos resultados permitiu fundamentar as seguintes diretrizes para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS):

- Infraestrutura e Inovação (ODS 9): As projeções demográficas até o ano de 2050 confirmam que a infraestrutura atual de 11 Ecopontos é numericamente suficiente para absorver a demanda projetada. No entanto, a conformidade com o ODS 9 exige a modernização da rede por meio de inteligência geográfica, promovendo a realocação estratégica de unidades subutilizadas para os novos eixos de crescimento e áreas de intensa verticalização. Contudo, a conformidade com o ODS 9 exige a transição de um modelo reativo para uma gestão preditiva, utilizando o indicador para o dimensionamento preciso e a retomada da triagem operacional para transformar resíduos em ativos da economia circular.

- Cidades e Comunidades Sustentáveis (ODS 11): O combate ao descarte irregular nas "franjas" urbanas é um imperativo de equidade territorial. O estudo comprovou que possuir a infraestrutura não garante a eficiência se houver descompasso geográfico, como observado na Região Norte, que opera com sobrecarga de 142% acima da média municipal. A realocação é o mecanismo necessário para reduzir o impacto ambiental negativo das cidades e garantir assentamentos mais seguros.

- Consumo e Produção Responsáveis (ODS 12): A sustentabilidade sistêmica depende da exemplaridade do Poder Público, responsável por 51,8% do volume total de RCC gerado. Para atingir as metas de redução e reutilização do ODS 12, é imperativo instituir a obrigatoriedade do uso de agregados reciclados em obras públicas, revertendo o retrocesso operacional de 2025 e restabelecendo padrões de gestão ambientalmente saudáveis.

Em suma, possuir 11 Ecopontos não equivale a ter uma gestão eficiente. A sustentabilidade de Limeira depende da capacidade administrativa de integrar o planejamento territorial à gestão de resíduos, utilizando indicadores estatísticos e o geoprocessamento para transformar a conformidade ambiental de uma meta distante em uma realidade territorial palpável até 2050.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001;

Agradecimentos Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (proc.310375/2020-7 and proc. 309102/2023-5).

Os autores agradecem ao programa de Pós-graduação em Tecnologia e à equipe do Laboratório de Materiais da FT-UNICAMP.

Agradecemos à Prefeitura Municipal de Limeira pelo fornecimento dos dados e informações necessários para esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, J. F. C. e SANTOS, E. P. R. Avaliação da gestão dos resíduos da construção civil no estado de São Paulo. Urbe - Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 17, e20240161, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2175-3369.017.e20240161. Acesso em 8 de jan. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, [entre 2003 e 2023]. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: 28 nov. 2025.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: https://www.abrelpe.org.br/ Acesso em maio de 2025.

ASSOCIAÇÃO COMERCIAL E INDUSTRIAL DE LIMEIRA (ACIL). Nossa Cidade. Limeira, [s.d]. Disponível em: https://www.acillimeira.com.br/nossa-cidade. Acesso em: 14 jul. 2025.

BRANQUINHO, E. S. e SOUSA, F. O processo de expansão urbana de Limeira-SP: O ordenamento territorial e a mobilidade no período entre 1970-2020. Estudos Geográficos - Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia, v. 21 n.3, p. 66-90, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.5016/estgeo.v23i3. Acesso em 28/02/2026.

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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

FUNDAÇÃO SEADE. Perfil Municipal: Limeira. Perfil dos Municípios Paulistas, 2024. Disponível em: https://perfil.seade.gov.br/. Acesso em: 14 jul. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados: Limeira. IBGE, 2024. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/limeira/panorama. Acesso em: 14 jul. 2025.

LIMA, L. S. et al. Espraiamento urbano e seus impactos nas desigualdades socioespaciais da acessibilidade ao trabalho em Fortaleza. Transportes, v. 29, n. 1, p. 229-246, 2021. Disponível em: https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2348. Acesso 28 jul. 2025

LIMA, S. M. S. A. et al. Desafios do planejamento urbano na expansão das cidades: entre planos e realidade. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, p. e20180037, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180037. Acesso 28 de jul. 2025

LIMEIRA. PREFEITURA MUNICIPAL - Secretaria de Obras e Serviços Públicos. Resposta ao protocolo e-SIC 073/2025. Volumes de RCC entre 2019 a 2024. Disponível em: https://limeira.1doc.com.br/. Limeira, 2025.

LIMEIRA. PREFEITURA MUNICIPAL. Portal da Transparência PML - Mês de Referência 11/2025 - Recursos Humanos. Disponível em: https://transparencia.limeira.sp.gov.br/. Acesso em 25 dez. 2025.

LIMEIRA. PREFEITURA MUNICIPAL. Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil (PMGRCC) do Município de Limeira (SP). Limeira: PML, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Nações Unidas Brasil, [2025]. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 24 jul. 2025.

SAKTHIBALA, R. K. et al. A Critical review on recycling and reuse of construction and demolition waste materials. Cleaner Waste Systems, 100375, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100375. Acesso em: 28 jul. 2025.

SILVA, A. A. et al. Utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para seleção de áreas para pontos de descarte de Resíduos de Construção e Demolição (RCD): estudo de caso no município do Cabo de Santo Agostinho/PE. Revista DAE São Paulo, v. 72, n. 243, p. 101-117, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.36659/dae.2024.008. Acesso em: 28 jul. 2025.

SILVA, L. P. e MARQUES NETO, J. C. Study of the rate of generation of waste from construction in new works in the city of Ribeirao Preto-SP. Revista Gestão e Produção, 27(4), e5236, 2020. Disponível em https://doi.org/10.1590/0104-530X5236-20. Acesso em: 28 nov. 2025.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Glossário de Indicadores: Resíduos Sólidos 2022. Disponível em: https://www.gov.br/cidades. Acesso em: 28 nov. 2025.

POTENCIAL DE USO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF) COMO INSUMO AGRÍCOLA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 Giovanna Oliveira Bosqueiro, 2 Rafael Gustavo Ferreira Morales, 3 Beatriz Lima Santos Klienchen Dalari
[1] Universidade do Vale do Itajaí, e-mail: gibosque@gmail.com; [2] Centro de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), e-mail: rafael.epagri@gmail.com; [3]Escola Politécnica- Univali, e-mail: beatriz.dalari@univali.br

Palavras-chave: Reaproveitamento de resíduos industriais; normas ambientais; substratos agrícolas.

Resumo

As indústrias de fundição geram grandes volumes de areia descartada de fundição (ADF), composta por areia, pó de carvão e bentonita. No Brasil, cerca de três milhões de toneladas são produzidas anualmente, segundo a ABIFA, sendo majoritariamente destinadas a aterros. Devido ao alto custo de descarte e à escassez de espaço, torna-se urgente adotar práticas mais sustentáveis e eficientes de gestão de resíduos. Este trabalho teve como objetivo elaborar um protocolo técnico e legal para orientar o aproveitamento da ADF como insumo agrícola, enfrentando a principal barreira para essa aplicação: a ausência de regulamentação específica no Brasil. A metodologia envolveu pesquisa bibliográfica e experimental. Foram analisadas práticas adotadas em outros países, que já utilizam a ADF na agricultura com respaldo legal, e comparadas à realidade brasileira, com base em artigos técnico-científicos (2008-2024) e normas ambientais. Na etapa experimental, duas amostras de ADF foram avaliadas (moldagem e quebra de canal), com ensaios de lixiviação, solubilização e identificação de metais, conforme a NBR 10004/2024 e a Resolução CONSEMA nº 26/2013. Os resultados mostraram teores de metais dentro dos limites permitidos, com exceção do alumínio, que, embora elevado, é comum nos solos do Sul do Brasil e pode ser manejado agronomicamente. O protocolo desenvolvido organiza, em fluxograma, as etapas técnicas, analíticas e legais para avaliar o uso da ADF na agricultura. Ele também serve como base para futuras pesquisas e políticas públicas, demonstrando o potencial técnico do resíduo na formulação de substratos agrícolas. A proposta busca incentivar uma gestão de resíduos mais sustentável e apoiar a ampliação do reaproveitamento da ADF no país, com segurança ambiental e respaldo normativo.

Introdução

A gestão de resíduos sólidos industriais tornou-se uma preocupação ambiental em escala global. Diante da escassez de áreas para disposição e dos elevados custos associados ao descarte em aterros, a reutilização desses resíduos como matérias-primas alternativas tem se tornado cada vez mais atrativa. Entre os resíduos industriais, destacam-se as areias descartadas de fundição (ADF).

Nas indústrias de fundição, grandes volumes de areia são utilizados na moldagem de metais ferrosos e não ferrosos. Esse material é reciclado diversas vezes no processo produtivo, sendo classificado como ADF quando perde suas propriedades físico-químicas. A ADF pode ser dividida em dois principais tipos: areia verde, utilizada na moldagem externa de peças, e areia quimicamente ligada, empregada na produção de machos. A areia verde apresenta composição predominantemente silicosa, associada à bentonita e materiais carbonáceos, com características semelhantes às de solos naturais, o que favorece seu potencial de reaproveitamento.

A ADF pode ser aplicada em diversas áreas, como correções geotécnicas, misturas asfálticas, concretos de cimento Portland e como material de cobertura em aterros sanitários (Alves, 2012). De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), as ADF são classificadas como resíduos Classe II, em função do potencial de lixiviação de íons metálicos. Entretanto, estudos indicam que esse potencial está associado principalmente ao uso de ligantes químicos no processo de moldagem (Silva, 2020).

Nos Estados Unidos, o reaproveitamento de ADF em aplicações geotécnicas e na construção civil é uma prática consolidada, respaldada por uma vasta quantidade de estudos que atestam seu uso bem-sucedido. A USEPA (2022), implementou a Iniciativa de Areia de Fundição sob o Programa Nacional 206 (Utilização de Esterco e Subprodutos) para abordar usos agrícolas e horticulturas de ADF. Segundo a EPA (2014), as ADF apresentam potencial para uso em solos manufaturados devido à sua uniformidade e consistência. Podem ser combinadas com solos e aditivos orgânicos, como turfa, compostos orgânicos e biossólidos, sendo aplicáveis em horticultura, paisagismo e áreas esportivas, desde que atendam a critérios de qualidade e segurança ambiental, além de se tornar um substituto de areias virgens contribuindo para a conservação de recursos naturais, reduzindo a extração de matérias-primas e as emissões atmosféricas, além de gerar benefícios econômicos ao otimizar custos de produção e gestão de resíduos. Em otros países como Espanha e Finlândia também desenvolveram estudos envolvendo a compostagem de residuos ALQ ((fenólicas, furânicas e de silicato) e de ADF em diferentes taxas ao resíduo sólido orgânico, obtendo resultados com potencial para aplicação da ADF em geoengenharia e na agricultura.

No Brasil a utilização da ADF na agricultura ainda é limitada, sobretudo devido à complexidade da legislação ambiental e à ausência de regulamentação específica. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a elaboração de um protocolo técnico, em formato de fluxograma, para orientar o aproveitamento da ADF em aplicações agrícolas, com base na comparação de análises físico-químicas com os parâmetros estabelecidos pelas normas ambientais vigentes. O protocolo visa validar a segurança ambiental do uso da ADF e fornecer suporte técnico para sua aplicação, contribuindo para a ampliação do reaproveitamento desse resíduo de forma sustentável e em conformidade com a legislação.

Materiais e Métodos

O presente estudo foi desenvolvido em duas etapas: revisão bibliográfica e análise experimental.

A revisão bibliográfica teve como objetivo reunir e analisar publicações técnico-científicas sobre o reaproveitamento de resíduos industriais, com foco na Areia Descartada de Fundição (ADF) aplicada como substrato agrícola. Inicialmente, foram identificados 65 artigos por meio de critérios de inclusão. Após a aplicação de critérios de exclusão e verificação de acesso integral, foram selecionados 35 estudos, incluindo artigos científicos, legislações ambientais (âmbito federal, estadual de Santa Catarina e municipal de Joinville), livros e fontes institucionais. Esses dados subsidiaram a base teórica e normativa para a elaboração do protocolo técnico proposto.

Na etapa experimental, foram analisadas duas amostras de ADF provenientes de uma indústria de fundição em Joinville (SC), identificadas como ADF II (areia de moldagem) e ADF III (areia de quebra de canal), oriundas de processo com areia verde. As amostras foram submetidas a ensaios de lixiviação e solubilização conforme a ABNT NBR 10004/2024, ABNT NBR 10005/2004 e Resolução CONSEMA nº 26/2013, com o objetivo de identificar os principais constituintes químicos e verificar a conformidade com os limites estabelecidos para compostos orgânicos e metais, visando avaliar o potencial de ꓶhꓤꓰꓶização da ADF como insumo agrícola.

Para a elaboração do protocolo, foram consideradas legislações nos âmbitos nacional, estadual e municipal. O protocolo foi estruturado desde a triagem inicial da ADF até o atendimento às exigências legais, sendo representado por meio de fluxograma.

A classificação da ADF foi realizada com base na ABNT NBR 10004/2024, que estabelece critérios de periculosidade. As análises laboratoriais seguiram métodos da USEPA (SW-846) ou normas equivalentes da ABNT, incluindo a ABNT NBR 10005/2004 (lixiviação) e a ABNT NBR 10007/2004 (amostragem). A avaliação ecotoxicológica foi considerada conforme a Lei Estadual nº 17.479/2018, utilizando os organismos *Vibrio fischeri* (ABNT NBR 15411/2021) e *Daphnia magna* (ABNT NBR 12713/2022). Foram adotados como referência os limites estabelecidos pela Resolução CONSEMA nº 26/2013 e pela ABNT NBR 10004/2024. Também foram avaliados a composição química, o potencial de lixiviação, a interação da ADF com o solo e os possíveis impactos ambientais, incluindo alterações na qualidade do solo e o risco de contaminação de águas superficiais e subterrâneas (ABNT, 2004; CONAMA, 2009; EMBRAPA, 2017).

Resultados e Discussão

Os resultados das análises químicas das amostras ADF II e ADF III indicaram que as concentrações dos elementos avaliados estão abaixo dos valores orientadores estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009, evidenciando conformidade com os limites de prevenção da qualidade do solo (Tabela 1).

Adicionalmente, ao comparar os dados obtidos com a Portaria SDA/MAPA nº 811/2023, verificou-se que os teores de metais como cobre, cádmio, chumbo e mercúrio também atendem aos limites estabelecidos para materiais utilizados na agricultura. Esses resultados indicam que, sob o ponto de vista químico, a ADF apresenta potencial para uso como insumo agrícola, desde que submetida a processos adequados de estabilização e monitoramento ambiental.

A caracterização das amostras evidenciou predominância de sílica (SiO_2), alumínio (Al), ferro (Fe) e magnésio (Mg), além da presença de matéria orgânica e traços de metais como zinco (Zn), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) e chumbo (Pb). Elementos potencialmente tóxicos, como cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e arsênio (As), foram identificados em concentrações inferiores aos limites estabelecidos pela legislação vigente.

Compostos químicos	Resultado – ADF II (mg/Kg)	Resultado – ADF III (mg/Kg)	CONAMA 420/2009 Valor. Prevenção - Solo (mg.kg-1)
Ag (Prata)	<1,00	<1,00	2,0
Al (Alumínio)	1990,05	2933,96	-
Arsênio	<1,00	<1,00	15,0
Cu (Cobre)	4,24	12,36	60,0
Ba (Bário)	41,23	19,57	150,0
CD (Cádmio)	<0,05	<0,05	1,30
Co (Cobalto)	<1,00	<1,00	25,0
Cr (Cromo)	3,15	4,10	75,0
Fe (Ferro)	21115,93	2506,26	-
Fluoretos	10,99	109,57	-
Hg (Mercúrio)	<0,020	<0,020	0,50
Mg (Magnésio)	599,66	324,30	-
Mn (Manganês)	27,56	36,07	-
Mo (Molibdênio)	<1,00	<1,00	30,0
Ni (Níquel)	3,13	3,70	30,0
Pb (Chumbo)	<1,00	<1,00	72,0
Sb (Antimônio)	<1,00	<1,00	2,0
Se (Selênio)	<1,00	<1,00	5,0
V (Vanádio)	3,54	3,79	-
Zn (Zinco)	19,48	37,82	300,0

Matéria Orgânica	1,173	0,690	-
Óleos e Graxas totais	6385,9	1197,6	-
Sílica	531,32	629,76	-
Sólidos totais fixos	19240,029	19723,695	-

Tabela 1 – Análise do ADF e Parâmetros CONAMA 420/2009

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização são apresentados nas Tabelas 2 e 3, em comparação com os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 10004/2024 e pela Resolução CONSEMA nº 26/2013.

Compostos químicos	**Resultado - ADF II Lixiviado** (mg/L)	**Resultado – ADF III Lixiviado** (mg/L)	**ABNT NBR 10004/2004 Máx. permitido (mg/L)**	**CONSEMA SC nº26/2013 Máx. permitido (mg/L)**
Ag (Prata)	<0,0050	<0,0050	5,0	-
Arsênio	<0,0080	<0,0080	1,0	0,5
Ba (Bário)	0,0208	0,2409	70,0	10,0
Cd (Cádmio)	<0,0010	<0,0010	0,50	0,10
Cr (Cromo)	<0,005	0,0226	5,0	0,50
Fluoretos	0,73	0,63	150,0	-
Hg (Mercúrio)	<0,00100	<0,00100	0,10	0,02
Pb (Chumbo)	<0,0100	<0,0100	1,0	0,50
Piridina	<0,001	<0,001	5,0	-
Se (Selênio)	< 0,0070	<0,0070	1,0	0,10
Zn (Zinco)	0,5180	0,6905	-	-
Fenóis totais	<0,100	<0,100	-	-

Tabela 2 - Análise de lixiviação do ADF

Todos os componentes analisados nos testes de lixiviação apresentaram concentrações dentro dos limites permitidos em ambas as normas.

Compostos químicos	**Resultado - ADF II Lixiviado** (mg/L)	**Resultado – ADF III Lixiviado** (mg/L)	**ABNT NBR 10004/2004 Máx. permitido (mg/L)**	**CONSEMA SC nº26/2013 Máx. permitido (mg/L)**
Ag (Prata)	<0,0050	<0,0050	5,0	-
Arsênio	<0,0080	<0,0080	1,0	0,5
Ba (Bário)	0,0208	0,2409	70,0	10,0
Cd (Cádmio)	<0,0010	<0,0010	0,50	0,10
Cr (Cromo)	<0,005	0,0226	5,0	0,50
Fluoretos	0,73	0,63	150,0	-
Hg (Mercúrio)	<0,00100	<0,00100	0,10	0,02
Pb (Chumbo)	<0,0100	<0,0100	1,0	0,50
Piridina	<0,001	<0,001	5,0	-
Se (Selênio)	< 0,0070	<0,0070	1,0	0,10
Zn (Zinco)	0,5180	0,6905	-	-
Fenóis totais	<0,100	<0,100	-	-

Tabela 3 - Análise de lixiviação do ADF

Para os parâmetros de solubilização, alguns elementos apresentaram concentrações acima dos limites orientadores. O alumínio, cujo valor máximo estabelecido pela ABNT NBR 10004/2024 é de 0,2 mg/L, apresentou concentração de 17,8387 mg/L na amostra ADF II, indicando elevada solubilidade e a necessidade de processos de estabilização para viabilizar seu uso.

O bário apresentou concentração de 0,8611 mg/L, cerca de 20% acima do limite de 0,7 mg/L. O ferro registrou 25,83 mg/L, excedendo tanto o limite da Resolução CONSEMA nº 26/2013 (15,0 mg/L) quanto o da ABNT NBR 10004/2024 (3,0 mg/L). Para o manganês, a concentração (0,4423 mg/L) atendeu à CONSEMA nº 26/2013, mas superou o limite da ABNT NBR 10004/2024 (0,1 mg/L). O zinco apresentou 7,8320 mg/L, dentro do limite da CONSEMA nº 26/2013, porém acima do valor de 5,0 mg/L da ABNT NBR 10004/2024. Esses resultados indicam a necessidade de tratamentos prévios, como estabilização ou neutralização, para redução da mobilidade desses elementos e adequação aos padrões mais restritivos.

Apesar das excedências, elementos como ferro, manganês e zinco são essenciais à nutrição vegetal quando presentes em concentrações adequadas, podendo contribuir para a fertilidade do solo. Estudos indicam que resíduos industriais com

composição semelhante podem ser utilizados na agricultura sem efeitos tóxicos, desde que submetidos a controle e monitoramento adequados.

No contexto regulatório, a aplicação agrícola da ADF ainda enfrenta limitações no Brasil, principalmente devido à ausência de normativas específicas e à sua classificação como resíduo. Em contrapartida, experiências internacionais demonstram maior flexibilidade regulatória baseada em avaliação de risco, evidenciando a necessidade de avanços na legislação brasileira.

Com base nos resultados obtidos e no levantamento técnico-normativo, foi elaborado um protocolo para orientar a avaliação e aplicação da ADF na agricultura. O fluxograma proposto está estruturado em três etapas: (I) identificação e análise de risco ambiental (Figura 1); (II) ensaios agronômicos e tratamento do resíduo (Figura 2); e (III) encaminhamentos legais e técnicos para aplicação segura (Figura 3).

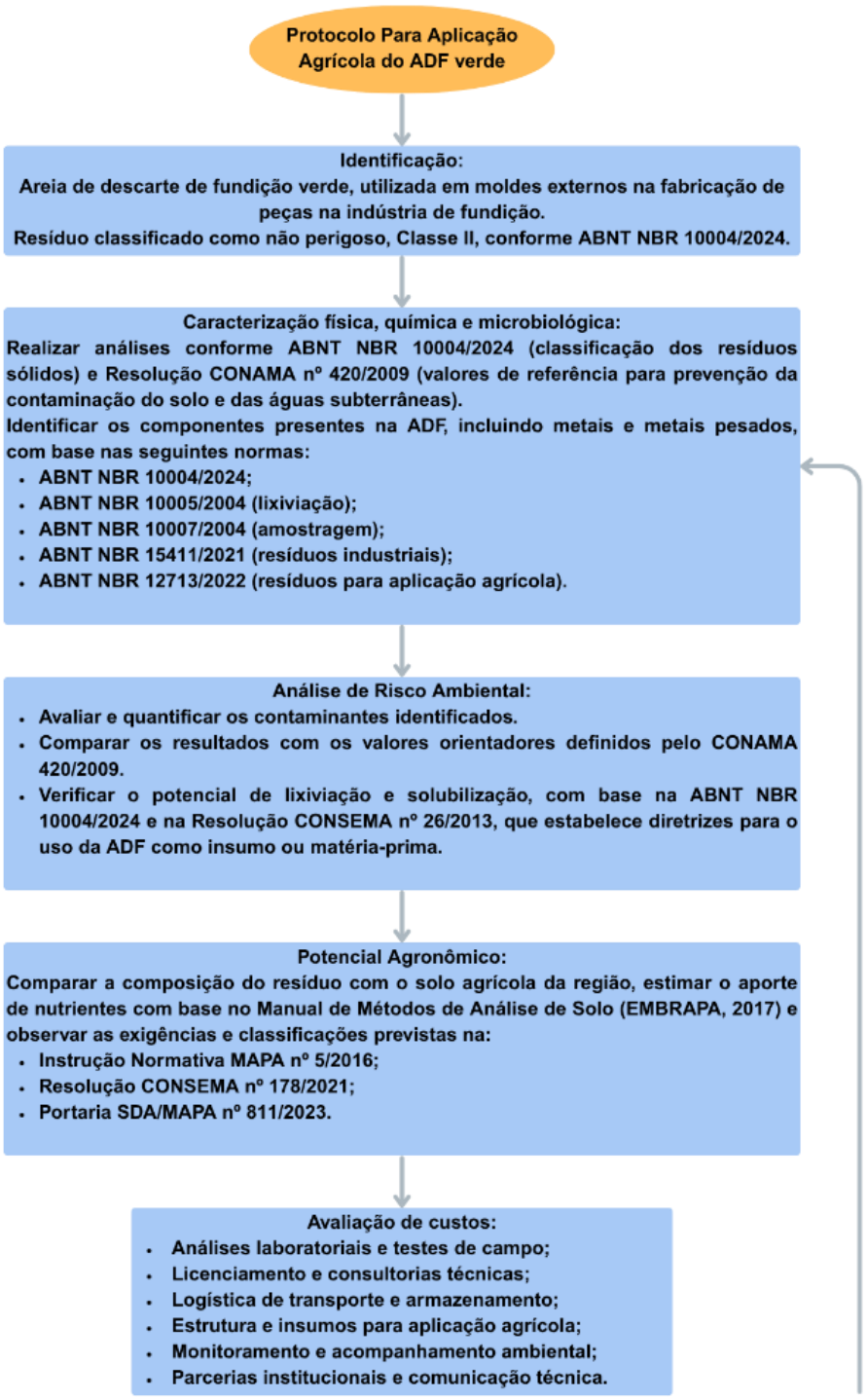


Figura 1 – Parte I do protocolo: Identificação, caracterização e avaliação do resíduo.

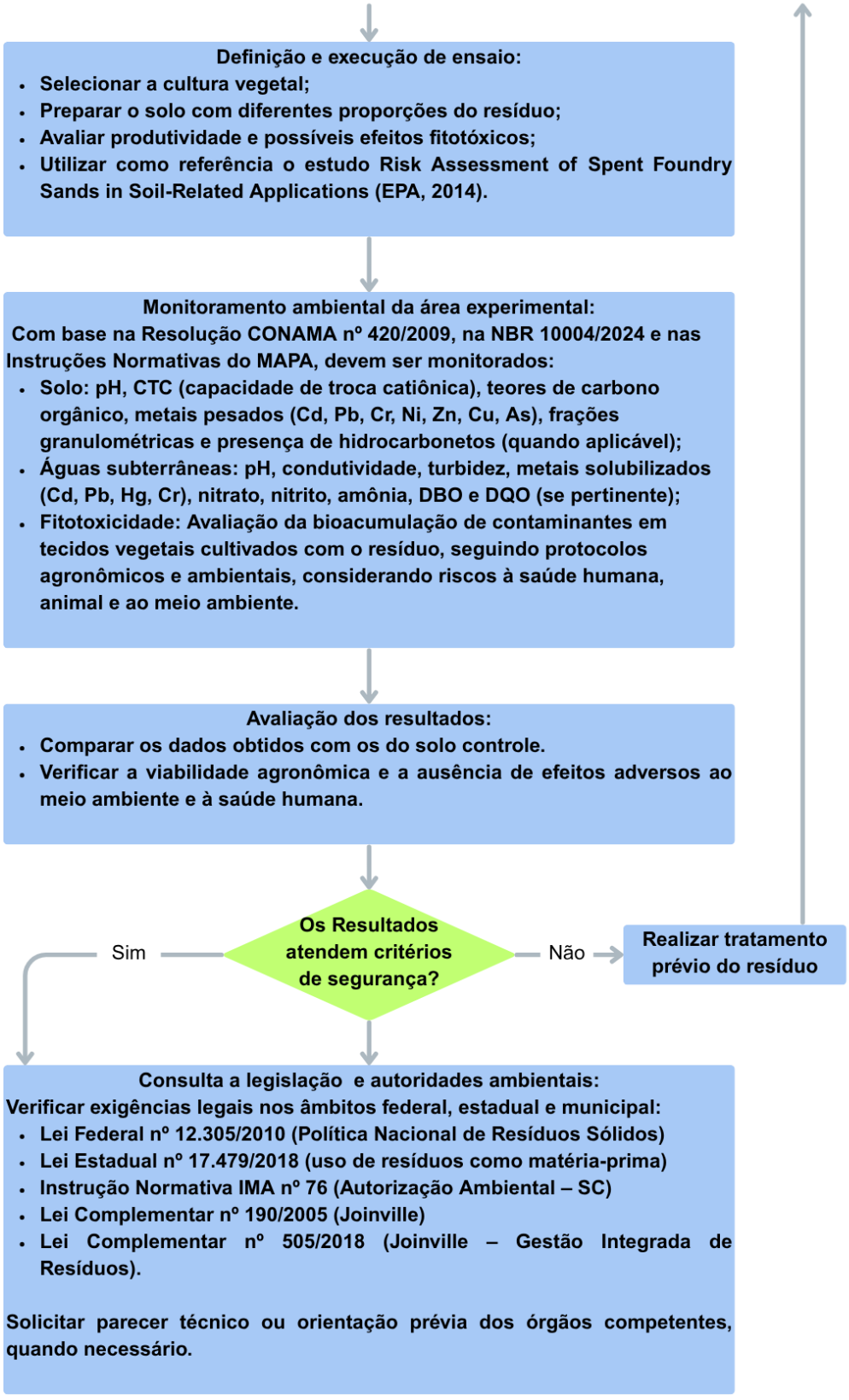


Figura 2 – Parte II do protocolo: Ensaio agronômico, avaliação de resultados e tratamento prévio.

O protocolo busca facilitar o entendimento e a organização do processo necessário para o uso da ADF como insumo agrícola, considerando as exigências legais vigentes. Sua finalidade é contribuir para a redução da insegurança técnica e jurídica, frequentemente enfrentada por produtores e pesquisadores diante da ausência de normativas específicas e da complexidade dos trâmites ambientais.

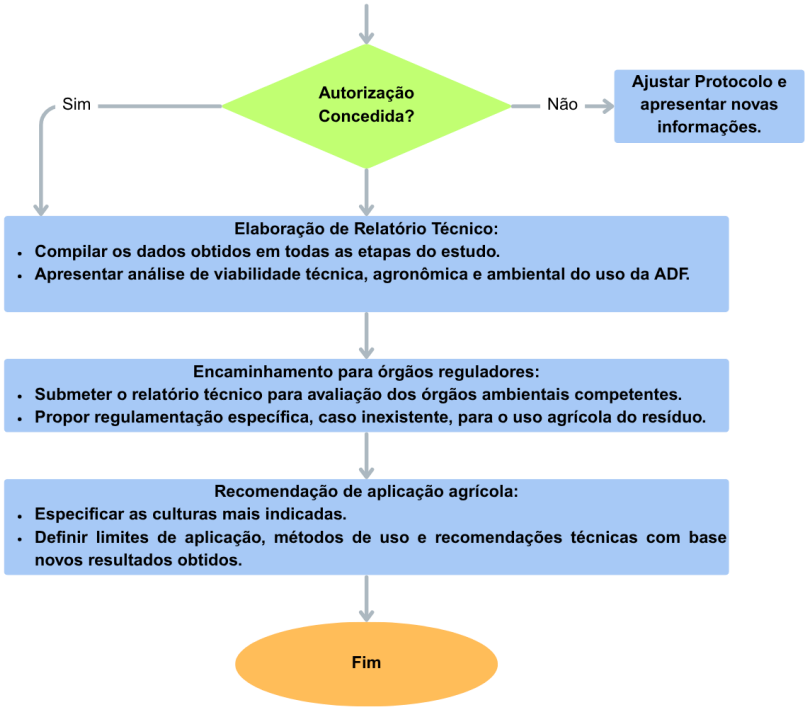


Figura 3 – Parte III do protocolo: Encaminhamentos legais, elaboração de relatório técnico e recomendações finais

Dessa forma, o protocolo proposto atua como um instrumento facilitador para a avaliação e possível aplicação da areia descartada de fundição (ADF) na agricultura, promovendo o uso responsável e ambientalmente seguro de resíduos industriais. Ao sistematizar critérios técnicos e legais, contribui para ampliar as possibilidades de reaproveitamento de materiais, incentivando práticas alinhadas aos princípios da economia circular e ao desenvolvimento sustentável do setor agrícola.

Considerações Finais

Os resultados obtidos indicam que as amostras de ADF apresentam concentrações de elementos abaixo dos valores de prevenção para solos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009, bem como atendem aos limites da Portaria SDA/MAPA nº 811/2023 para uso agrícola. Esses dados reforçam o potencial de aplicação da ADF como insumo agrícola, desde que observados critérios de controle e monitoramento ambiental.

Em relação à lixiviação, os resultados indicam, de modo geral, baixos níveis de metais, sugerindo reduzido risco ambiental quando o material é adequadamente manejado. Ainda assim, recomenda-se a realização de ensaios ecotoxicológicos para uma avaliação mais abrangente dos impactos ambientais.

Estudos como EPA (2014), Dungan et.al (2012), Hijazi (2024) e Borgulat (2023) confirmam a viabilidade do uso da ADF em combinação com matéria orgânica como substrato agrícola, ressaltando o potencial sustentável desse reaproveitamento. Essa prática contribui para a redução da geração de resíduos em aterros, preservação dos recursos naturais e promoção da economia circular.

Atualmente, o Brasil não possui regulamentação direta que permita o uso da ADF como insumo agrícola. Diante disso, este trabalho propôs um protocolo orientador para garantir que estudos e aplicações futuras sejam realizadas de forma segura e em conformidade com a legislação vigente, alinhando-se à PNRS (Lei 12305/2010), que incentiva o reaproveitamento de resíduos e o desenvolvimento sustentável.

As agências reguladoras brasileiras deveriam focar na definição clara dos riscos ambientais e à saúde humana relacionados aos resíduos, em vez de legislar isoladamente sobre cada possível aplicação. Essa fragmentação dificulta a reutilização integral da areia descartada de fundição (ADF). Embora não haja normas específicas, existe uma base legal indireta que pode apoiar a valorização ambiental e jurídica da ADF na agricultura. A articulação dessas normas permite o desenvolvimento de protocolos que auxiliem o setor produtivo a seguir critérios seguros e adequados.

Adicionalmente, a consideração das características edáficas da região de origem da ADF, como no caso de Joinville, Santa Catarina, reforça o potencial regional para o reaproveitamento deste resíduo. O solo predominante na área, composto por Argissolos Amarelos, Neossolos Litólicos e Cambissolos Háplicos, aliado à forte representatividade do setor de fundição no estado e sua extensa atividade agrícola, cria um cenário favorável para a aplicação sustentável da ADF como insumo agrícola. Com tratamento adequado, a ADF pode melhorar a estrutura física do solo e favorecer a retenção de nutrientes, destacando a importância de promover pesquisas específicas para validar e ampliar essa prática em Santa Catarina.

Os principais obstáculos para a reutilização da ADF no Brasil estão relacionados a questões econômicas, falta de informação, ausência de um mercado estruturado e políticas públicas ineficazes, e não à viabilidade técnica ou ambiental.

Portanto, é fundamental ampliar pesquisas para aprofundar o conhecimento e consolidar uma base sólida que suporte decisões futuras, promovendo o reaproveitamento seguro e sustentável da ADF na agricultura.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade do Vale do Itajaí e a EPAGRI, pelo apoio e parceria para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido.

Referências Bibliográficas

ALVES, Bárbara Samartini Queiroz. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição**. 2012. 239 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10005: **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10007 **Amostragem de resíduos**. Rio de Janeiro, 2004.
BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

BORGULAT, Anna. et al. **Avaliação da segurança de substitutos do solo produzidos a partir de resíduos orgânicos e de fundição**. Jornal de Engenharia Ecológica, n25,v1 p. 327-335, 04 dezembro 2023. Semanal.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 dez. 2009.**

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. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL**.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA**).** Instrução Normativa nº 5, de 2016. **Regulamenta os critérios para formulação de substratos agrícolas.** Diário Oficial da União, Brasília, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Portaria SDA/MAPA nº 811, de 2023. **Regulamenta o uso de resíduos orgânicos na agricultura orgânica**. Diário Oficial da União, Brasília, 2023.

CUNHA, K. P. V. et al. **Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 25, n. 1, p. 3–9, jan. 2021.

DUNGAN, Robert S. et al. **Uso de uma abordagem integrada para caracterizar as propriedades físico-químicas de areias verdes de fundição.** Elsevier B.V, s. l., p. 150-155, maio 2012.

HIJAZIN, C.A.H. , Marques, T.G. , Vasquez, B.A.F. y Tubino, R.M.C. 2024. **Análise da viabilidade técnica e ambiental da adição de diferentes taxas de resíduos de areia verde de fundição a composto maturado obtido de um processo automatizado**. Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. 17, 1 (abr. 2024), 306–325. DOI:https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2024.17.1.86820.

JUNQUEIRA, A. A. S. **Avaliação agronômica de biocarvões modificados com cloreto de alumínio como fertilizantes fosfatados**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

JUNQUEIRA, Victor Gonçalves. **Desempenho agronômico de biocarvões tratados com al ou mg**. 2023. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agronômica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

SILVA, A. B. et al. **Iron and Manganese in Industrial By-Products: Phytoremediation and Plant Nutrition Potential.** Journal of Hazardous Materials, v. 430, p. 128345, 2022.

SILVA, Gabriel et al. **Areia de Fundição como uma Alternativa Sustentável: Influência nas Propriedades do Concreto pela substituição parcial do Agregado Miúdo**. Encontro de Sustentabilidade: Unisul, Palhoça. Departamento de Engenharia Civil.2020.

SILVA, Karine Dias da. **Reutilização do resíduo de areia de fundição no brasil e no mundo o contexto do estado de minas gerais**. 2010. 67 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency – EPA**. Apostila sobre parâmetros de avaliação de resíduos sólidos**. Washington, D.C., 2014.

AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA (ISH) EM MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE DA MICRORREGIÃO DE ÁGUA E ESGOTO DO LITORAL NO ESTADO DA PARAÍBA

1 Daniel Franklin Batista Santiago, 2 Dayse Luna Barbosa, 3 Andréa Carla Lima Rodrigues, 4 Maressa Brandão Ribeiro, 5 Maria Emília de Freitas Sousa, 6 José Matheus da Silva Miranda, 7 Igor Antônio de Paiva Brandão, 8 João Lucas Oliveira Soares

1 UFCG, e-mail: danielbatistasanti@gmail.com; 2 UFCG, e-mail: dayseluna@yahoo.com.br; 3 UFCG, e-mail: andreaufcg@gmail.com; 4 UFCG, e-mail: maressa.bribeiro@gmail.com; 5 UFCG, e-mail: emilia.freitas@estudante.ufcg.edu.br; 6 UFCG, e-mail: matheus45sm@gmail.com; 7 UFCG, e-mail: igorantonio.eng@gmail.com; 8 UFCG, e-mail: joaolucasoliveirasoares@gmail.com

Palavras-chave: Regionalização; Saneamento Básico; Índice de Desenvolvimento Humano.

Resumo

De acordo com a Resolução 64/292, aprovada pela ONU em 2010, o acesso à água potável é indispensável para a vida com dignidade. No Brasil, a Lei n.º 11.445/2007, atualizada pela Lei nº 14.026/2020, estabelece como um dos objetivos a universalização dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário, propondo, para isso, a regionalização da prestação desses serviços. No estado da Paraíba, essa diretriz foi incorporada por meio da Lei Complementar n.º 168/2021, que instituiu quatro microrregiões: Alto Piranhas, Borborema, Espinharas e Litoral. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar as condições hídricas de cinco municípios de pequeno porte localizados na microrregião do Litoral, utilizando a metodologia do Índice de Segurança Hídrica (ISH), proposta pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que avalia as dimensões humana, econômica, de resiliência e ecossistêmica, além de relacionar os resultados ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Os resultados indicaram que o município de Alhandra apresentou o melhor desempenho no ISH, possivelmente em função do seu maior porte populacional, melhores condições de atendimento do abastecimento maior capacidade de reservação hídrica. Os demais municípios apresentaram valores finais semelhantes, porém com fragilidades específicas em diferentes dimensões, como Caiçara, com menor desempenho em resiliência, e Cuité de Mamanguape, com destaque negativo na dimensão econômica, evidenciando vulnerabilidades locais distintas. De forma geral, todos os municípios foram classificados com baixo nível de segurança hídrica, revelando um cenário de vulnerabilidade hídrica comum entre os municípios de pequeno porte da microrregião. Embora a análise tenha contemplado apenas parte dos municípios, os resultados sugerem uma tendência regional que demanda atenção, especialmente no contexto da regionalização dos serviços de saneamento. Assim, os achados reforçam a importância de diagnósticos técnicos como suporte à gestão e à formulação de políticas públicas, contribuindo para a priorização de investimentos e para o planejamento de ações mais eficazes, além de subsidiar estudos futuros em maior escala.

Introdução

A disponibilidade e o acesso à água potável constituem elementos essenciais para a manutenção da vida, da saúde pública e do desenvolvimento socioeconômico. Apesar de sua relevância, a escassez hídrica ainda representa um desafio global significativo. Estima-se que cerca de 4 bilhões de pessoas enfrentam períodos de escassez de água por pelo menos um mês ao ano, evidenciando a persistência de déficits na provisão de serviços básicos (Madani, 2026). Esse cenário reforça que o saneamento básico, especialmente o abastecimento de água, ainda não foi universalizado, comprometendo a qualidade de vida de grande parcela da população mundial.

No contexto brasileiro, essa problemática também se manifesta expressivamente. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (BRASIL, 2024) indicam que aproximadamente 84,14% da população possui acesso à rede de abastecimento de água, o que implica que cerca de 33 milhões de brasileiros ainda não são atendidos por esse serviço essencial. Essa lacuna evidencia desigualdades estruturais e regionais, mais acentuadas em municípios de pequeno porte, que frequentemente enfrentam limitações técnicas, financeiras e institucionais para a adequada prestação dos serviços de saneamento.

Com o intuito de enfrentar esses desafios, foi instituída a Lei Federal nº 14.026/2020, conhecida como Novo Marco Legal do Saneamento, que estabelece metas de universalização até o ano de 2033, prevendo o atendimento de 99% da população com água potável e 90% com esgotamento sanitário. Entretanto, o alcance dessas metas requer não apenas a ampliação da infraestrutura, mas também o aprimoramento da gestão, com base em planejamento estratégico, eficiência operacional e tomada de decisão orientada por dados.

Nesse contexto, a regionalização da prestação dos serviços surge como uma estratégia fundamental. O Decreto nº 11.599/2023 reforça esse modelo ao estabelecer a organização dos serviços em unidades regionais, visando ganhos de escala, maior capacidade de investimento e redução de desigualdades entre municípios. Em consonância com essa diretriz, o estado da Paraíba instituiu, por meio da Lei Complementar nº 168/2021, quatro microrregiões de saneamento básico: Alto Piranhas, Espinharas, Borborema e Litoral, promovendo uma nova configuração para o planejamento e gestão dos serviços no estado.

Diante desse cenário, torna-se fundamental a utilização de ferramentas capazes de diagnosticar e monitorar as condições de acesso e disponibilidade hídrica. Entre essas, destaca-se o Índice de Segurança Hídrica (ISH), desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que avalia a segurança hídrica a partir de quatro dimensões: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência (ANA, 2019). Esse índice integra variáveis socioeconômicas, ambientais e de infraestrutura, permitindo uma análise sistêmica e subsidiando a formulação de políticas públicas mais eficazes.

Nesse sentido, a análise da segurança hídrica em municípios de pequeno porte inseridos em microrregiões de saneamento torna-se especialmente relevante, uma vez que essas localidades tendem a apresentar maior vulnerabilidade a eventos críticos, limitações de infraestrutura e fragilidades na gestão dos recursos hídricos. Mesmo em regiões consideradas estratégicas, como a microrregião do Litoral da Paraíba, persistem desafios relacionados à distribuição equitativa dos serviços e à efetividade das políticas públicas.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o Índice de Segurança Hídrica em municípios de pequeno porte pertencentes à microrregião do Litoral do estado da Paraíba, buscando compreender as condições de disponibilidade e acesso à água, bem como identificar vulnerabilidades e padrões regionais. A partir da aplicação da metodologia proposta pela ANA, são analisados aspectos ambientais, econômicos e de infraestrutura, com o intuito de contribuir para o diagnóstico da segurança hídrica local e subsidiar estratégias de gestão mais eficientes e integradas.

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e natureza exploratória, com o objetivo de avaliar a segurança hídrica em municípios de pequeno porte da microrregião do Litoral do estado da Paraíba. A análise foi realizada com base na metodologia do Índice de Segurança Hídrica (ISH), proposta pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019). A Figura 01 apresenta o fluxograma metodológico adotado, contemplando as etapas de definição da área de estudo, seleção dos municípios, coleta de dados, cálculo das dimensões do ISH e análise dos resultados.

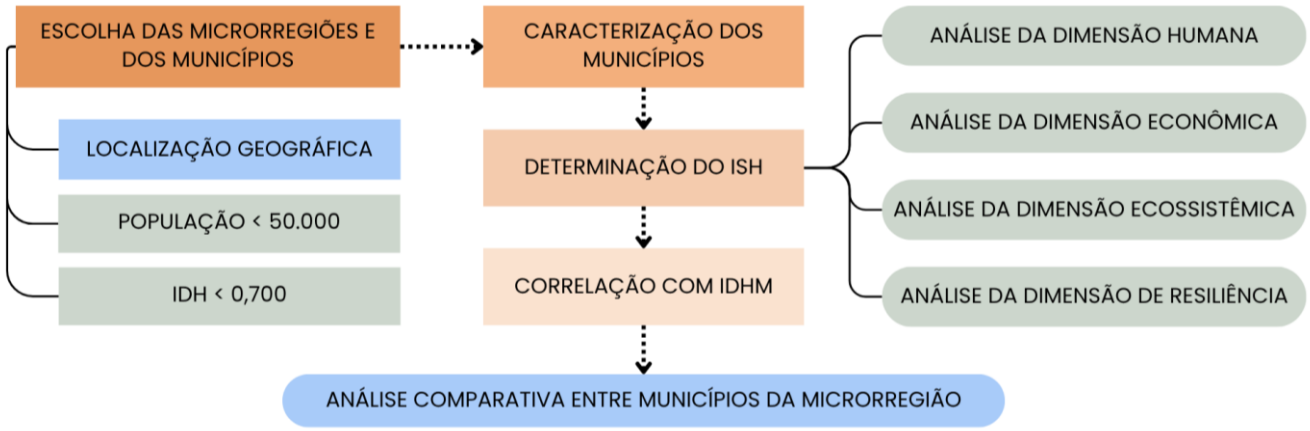


Figura 01: Fluxograma metodológico.
Fonte: Autoria própria (2026).

A microrregião do Litoral paraibano foi selecionada como área de estudo devido à sua relevância estratégica no processo de regionalização dos serviços de saneamento no estado, além de apresentar maior sustentabilidade financeira em relação às demais microrregiões, por concentrar a capital João Pessoa. Para a definição da amostra, foram estabelecidos critérios de seleção dos municípios. Inicialmente, considerou-se a participação no Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 03/2019, responsável pela elaboração de Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) em cinquenta municípios da Paraíba, assegurando maior disponibilidade de dados atualizados.

Adicionalmente, foram selecionados municípios com Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) inferior a 0,700 e população total inferior a 50.000 habitantes, caracterizando-os como municípios de pequeno porte. Como critério complementar, adotou-se a distribuição geográfica dos municípios na microrregião, visando garantir maior representatividade espacial. A partir desses critérios, foram selecionados os municípios de Alhandra, Caiçara, Cuité de Mamanguape, Marcação e São José dos Ramos, conforme ilustrado na Figura 02.

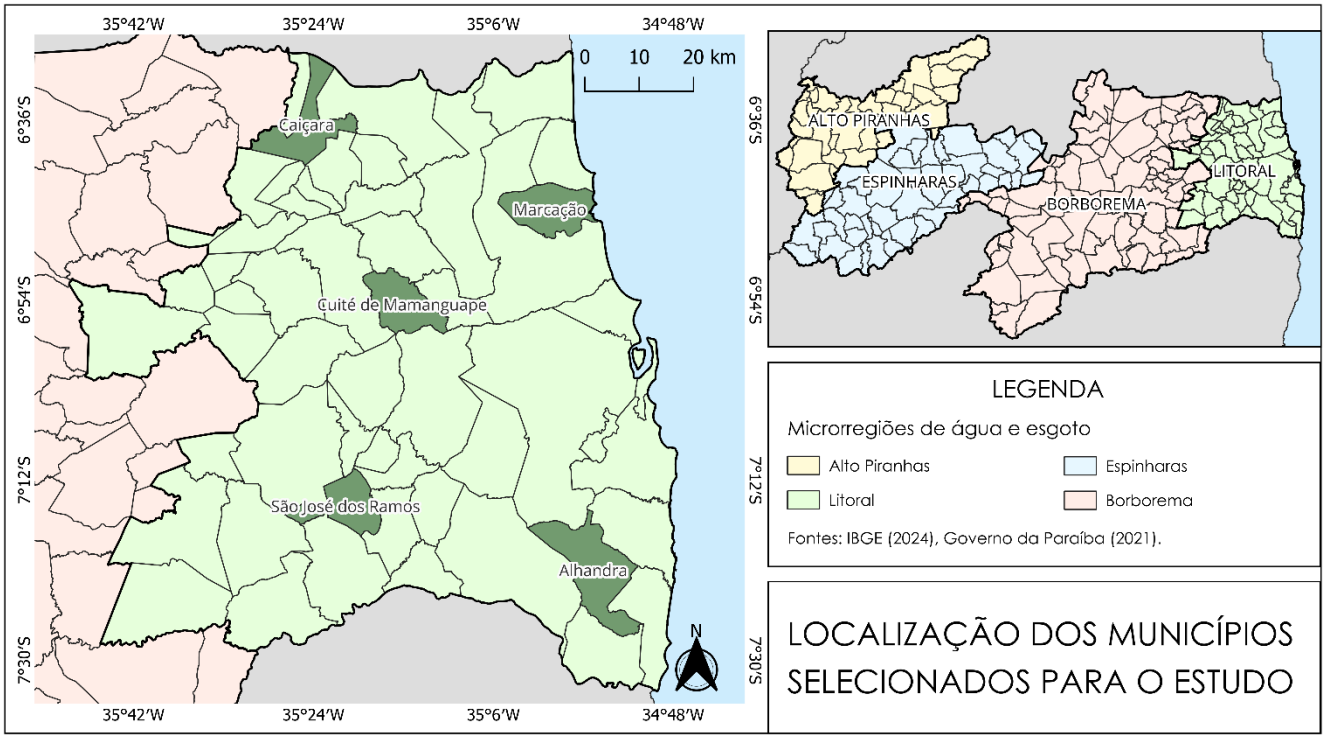


Figura 02: Mapa de localização dos municípios selecionados para o estudo
Fonte: Autoria própria (2026).

Os dados utilizados foram obtidos a partir de fontes secundárias, incluindo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB), a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA) e outras bases institucionais relacionadas aos recursos hídricos e ao saneamento. Alguns dos principais dados coletados estão dispostos abaixo, na Tabela 01.

Município	Habitantes	Área territorial (km²)	Densidade demográfica (hab/km²)	PIB per capita (2021)	Bacia hidrográfica	Principais cursos d'água
Alhandra	21.730	183,97	118,11	R$ 171.143,98	Rios Gramame e Abiái	Rios Gramame, Abiái, Mamuaba, Garaú, Aterro e Taperubus
Caiçara	7.292	128	57	-	Rio Curimataú	Rios Curimataú e Pitomba
Cuité de Mamanguape	6.251	107,68	58,05	R$ 11.652,59	Rio Mamanguape	Rio Mamanguape
Marcação	8.999	123	73,36	R$ 10.938,70	Rio Mamanguape	Rios Grupiúna, da Estuva e do Jacaré
São José dos Ramos	5.891	98	60,6	R$ 14.343,99	Rio Paraíba	Rio Paraíba

Tabela 01: Dados utilizados.
Fonte: IBGE (2024).

O cálculo do Índice de Segurança Hídrica (ISH) seguiu o Manual Metodológico da ANA (2019), que considera quatro dimensões principais: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência. Cada dimensão é composta por indicadores relacionados ao acesso à água, disponibilidade hídrica, condições ambientais e capacidade de adaptação a eventos de escassez.

O valor final do ISH foi obtido por meio da média ponderada das quatro dimensões analisadas, conforme estabelecido pela metodologia da ANA. Para valores não inteiros, foi aplicada a regra de arredondamento prevista no manual, conforme a classificação apresentada na Tabela 02.

Símbolo	Intervalo	Grau
	1,00 – 1,5	Mínimo - 1
	1,51 – 2,5	Baixo - 2
	2,51 – 3,5	Médio - 3
	3,51 – 4,5	Alto - 4
	4,51 – 5,0	Máximo - 5

Tabela 02: Classificação do Índice de Segurança da Água (ISH) correlacionado a faixa de cores. Fonte: ANA (2019).

Destaca-se que foram realizadas adaptações metodológicas em relação à proposta original da ANA, que utiliza unidades hidrográficas (ottobacias) como base de análise. Neste estudo, optou-se pela utilização da unidade territorial municipal, em função da disponibilidade e organização dos dados, o que possibilitou maior compatibilidade com as fontes utilizadas.

A dimensão humana considera o fator de risco hídrico, que analisa o balanço hídrico, a relação entre a demanda e a disponibilidade de água. O índice desta dimensão é uma média ponderada entre o abastecimento da população urbana em risco (peso 7) e o percentual de cobertura da rede de abastecimento da cidade (peso 3).

A dimensão econômica avalia os riscos que a escassez hídrica traz para os setores produtivos. Considerando o risco financeiro da produção da agricultura (peso 7) e pecuária (peso 3), e a garantia de água para a atividade industrial. O grau de segurança da dimensão econômica adota sempre o menor valor encontrado entre esses indicadores.

A dimensão ecossistêmica é obtida a partir da média simples de três indicadores ambientais: quantidade de água medida pela vazão remanescente do rio, qualidade da água medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a segurança de barragens de rejeitos de mineração locais.

Por fim, a dimensão de Resiliência que mede a capacidade da região de suportar eventos críticos de seca. Seus indicadores cruzam a condição artificial, o volume de água em reservatórios artificiais/açudes num raio de 50 km, com três condições naturais, o volume potencial de reservatórios naturais, variabilidade de chuvas nos últimos 20 anos e o potencial de armazenamento de água subterrânea/infiltração do solo.

Por fim, realizou-se uma análise comparativa da segurança hídrica entre os municípios, com o objetivo de identificar padrões, semelhanças e diferenças. Adicionalmente, os resultados do ISH foram comparados com o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), buscando verificar possíveis relações entre segurança hídrica e desenvolvimento humano.

Resultados e Discussão

O Índice de Segurança Hídrica (ISH) foi avaliado para cinco municípios da microrregião do Litoral paraibano, considerando as dimensões humana, econômica e de resiliência. Ressalta-se que a dimensão ecossistêmica não foi incluída na análise devido à indisponibilidade de dados.

Dimensão Humana

Os resultados do balanço hídrico indicaram que apenas o município de Alhandra apresentou superávit (1,276), enquanto os demais municípios apresentaram déficit hídrico (Tabela 03), evidenciando um cenário de vulnerabilidade hídrica predominante na microrregião. A população em risco de desabastecimento variou entre 1.200 e 3.300 habitantes, com destaque negativo para Marcação.

Município	Disponibilidade (m³/ano)	Demanda (m³/ano)	Balanço hídrico	Déficit
Alhandra	4.067,70	3.188,92	1,276	Não
Caiçara	618,08	889,89	0,695	Sim
Cuité de Mamanguape	420,00	659,40	0,637	Sim
Marcação	822,00	1.876,00	0,438	Sim
São José dos Ramos	471,04	661,29	0,712	Sim

Tabela 03: Verificação do déficit hídrico para os municípios do estudo. Fonte: Autoria própria (2026).

O ISH da dimensão humana variou entre os níveis baixo e médio (Tabela 04), com pior desempenho para Caiçara (ISH = 2), influenciado pela elevada população em risco e menor cobertura da rede de abastecimento. De modo geral, os municípios apresentaram desempenho intermediário, indicando avanços no atendimento às demandas básicas, porém ainda com limitações estruturais relevantes.

Município	Grau de segurança em relação à população em risco	Grau de segurança em relação à rede de abastecimento	ISH final - dimensão humana
Alhandra	4	2	3
Caiçara	3	1	2
Cuité de Mamanguape	4	1	3
Marcação	3	2	3
São José dos Ramos	4	1	3

Tabela 04: Índice de Segurança Hídrica para a dimensão humana.
Fonte: Autoria própria (2026).

Dimensão Econômica

A dimensão econômica evidenciou elevada vulnerabilidade associada ao risco hídrico, especialmente no setor agrícola, que apresentou maior peso na composição do índice. O município de Cuité de Mamanguape apresentou o pior desempenho (ISH = 1), em função do elevado valor da produção agrícola por hectare associado a um alto risco hídrico, indicando maior suscetibilidade a perdas econômicas em períodos de escassez.

Nos demais municípios, os resultados variaram entre níveis baixo e médio (Tabela 05), refletindo vulnerabilidade moderada. Destaca-se a dependência das atividades agropecuárias e as limitações relacionadas à sustentabilidade econômica dos sistemas de abastecimento.

Município	Grau de segurança em função da pecuária	Grau de segurança em função da agricultura	Grau de segurança em função da produção industrial	Grau de segurança com pesos da agricultura e pecuária	ISH final - dimensão econômica
Alhandra	3	3	2	3	2
Caiçara	2	3	2	3	2
Cuité de Mamanguape	2	1	2	1	1
Marcação	3	1	2	2	2
São José dos Ramos	2	2	2	2	2

Tabela 05: Índice de Segurança Hídrica para a dimensão econômica.
Fonte: Autoria própria (2026).

Dimensão de Resiliência

A dimensão de resiliência foi avaliada a partir de indicadores naturais (variabilidade pluviométrica e infiltração) e artificiais (capacidade de reservação hídrica). Os resultados indicaram baixos níveis de resiliência na maioria dos municípios.

Os valores de ISH obtidos variaram entre mínimo e baixo, com Alhandra e Cuité de Mamanguape apresentando melhores resultados (ISH = 2), porém por fatores distintos: no primeiro caso, devido às condições naturais, e no segundo, pela maior disponibilidade de reservatórios próximos. Os demais municípios apresentaram baixa capacidade de adaptação a eventos críticos (Tabela 06).

Município	Grau de segurança para condição natural	Grau de segurança para condição artificial	ISH final – dimensão de resiliência sem correção	ISH final – dimensão de resiliência com correção
Alhandra	2,00	1	2,00	2
Caiçara	1,50	1	1,50	1
Cuité de Mamanguape	1,50	2	1,75	2
Marcação	1,50	1	1,50	1
São José dos Ramos	1,50	1	1,50	1

Tabela 06: Índice de Segurança Hídrica para a dimensão de resiliência.
Fonte: Autoria própria (2026).

Índice de Segurança Hídrica Final

O ISH final evidenciou um cenário crítico e relativamente homogêneo entre os municípios analisados, todos classificados com nível baixo de segurança hídrica (Tabela 07). Mesmo após correções metodológicas, os valores permaneceram próximos de 2,0, indicando fragilidades estruturais comuns.

A dimensão humana apresentou os melhores desempenhos, com valores entre aproximadamente 2,5 e 3,5, refletindo avanços no atendimento à população. Em contrapartida, as dimensões econômica e, principalmente, de resiliência apresentaram os menores valores, evidenciando limitações na sustentabilidade dos sistemas e na capacidade de adaptação a eventos críticos, como secas e variabilidade climática.

Município	Índice de segurança por dimensão			Índice de segurança final sem correção	Índice de segurança final com correção	Classificação
	Humana	Econômica	Resiliência			
Alhandra	3,40	2,00	2,00	2,47	2	Baixo
Caiçara	2,40	2,00	1,00	1,80	2	Baixo
Cuité de Mamanguape	3,10	1,00	1,88	1,99	2	Baixo
Marcação	2,70	2,00	1,00	1,90	2	Baixo
São José dos Ramos	3,10	2,00	1,00	2,03	2	Baixo

Tabela 07: Índice de Segurança Hídrica Final.
Fonte: Autoria própria (2026).

A ausência da dimensão ecossistêmica no cálculo final representa uma limitação importante, indicando lacunas no monitoramento ambiental da região.

A análise individual dos municípios revela comportamentos distintos entre as dimensões. Caiçara apresenta relativo equilíbrio entre as dimensões humana e econômica, porém com baixo desempenho em resiliência. Já Cuité de Mamanguape, Marcação e São José dos Ramos apresentam maior disparidade entre as dimensões, com melhores resultados na dimensão humana e desempenho inferior nas demais.

Por outro lado, Alhandra apresentou maior equilíbrio entre as dimensões analisadas, embora ainda com necessidade de melhoria nos aspectos econômicos e de resiliência.

De forma geral, os resultados indicam um descompasso entre o atendimento atual à população e a sustentabilidade dos sistemas, sugerindo riscos à manutenção dos serviços no médio e longo prazo. A homogeneidade dos resultados reforça que essas limitações são estruturais e recorrentes em municípios de pequeno porte da microrregião.

Relação entre ISH e IDHM

A comparação entre o ISH e o IDHM indicou correspondência parcial entre os indicadores, evidenciando convergências e limitações (Tabela 08).

Município	ISH	IDHM	Correlação
Alhandra	3,40	0,778	Humana + Longevidade
Caiçara	2,40	0,733	
Cuité de Mamanguape	3,10	0,683	
Marcação	2,70	0,691	
São José dos Ramos	3,10	0,738	
Alhandra	2,00	0,544	Econômica + Renda
Caiçara	2,00	0,580	
Cuité de Mamanguape	1,00	0,529	
Marcação	2,00	0,525	
São José dos Ramos	2,00	0,527	
Alhandra	2,00	0,465	Resiliência + Educação
Caiçara	1,00	0,488	
Cuité de Mamanguape	1,88	0,398	
Marcação	1,00	0,408	
São José dos Ramos	1,00	0,406	

Tabela 08: Comparação dos resultados ISH e IDHM conforme classe vinculada.
Fonte: Autoria própria (2026).

Observou-se que a dimensão humana do ISH apresenta maior relação com o componente de longevidade do IDHM, sugerindo influência direta das condições de abastecimento na saúde e qualidade de vida. De forma semelhante, a dimensão econômica mostrou associação com o componente renda, indicando impactos indiretos sobre as atividades produtivas. Por outro lado, a dimensão de resiliência apresentou menor correlação com o componente educação, sugerindo que a capacidade de adaptação a eventos críticos está mais associada a fatores estruturais e institucionais.

As divergências observadas, especialmente em Cuité de Mamanguape, podem ser explicadas pela defasagem temporal dos dados do IDHM em relação aos dados utilizados no ISH.

De modo geral, os resultados indicam que, embora exista relação entre segurança hídrica e desenvolvimento humano, essa relação não é linear. O ISH se mostra, portanto, uma ferramenta complementar relevante, permitindo uma análise mais específica das condições de infraestrutura, gestão e capacidade de resposta dos sistemas hídricos.

Considerações Finais

O presente estudo possibilitou a análise comparativa do Índice de Segurança Hídrica (ISH) em cinco municípios de pequeno porte da microrregião do Litoral paraibano, contribuindo para a compreensão das condições hídricas no contexto da regionalização dos serviços de saneamento. Os resultados evidenciaram um padrão consistente de baixa segurança hídrica entre os municípios analisados, indicando que as vulnerabilidades identificadas não são pontuais, mas refletem limitações estruturais comuns à realidade local.

Observou-se que, embora a dimensão humana apresente melhores desempenhos, as dimensões econômica e, principalmente, de resiliência revelam fragilidades significativas. Esse descompasso sugere que os avanços no atendimento à população não são acompanhados por condições adequadas de sustentabilidade e capacidade de adaptação dos sistemas, o que pode comprometer a manutenção dos serviços no médio e longo prazo, especialmente diante da variabilidade climática.

A análise integrada com o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) indicou a existência de relação entre segurança hídrica e desenvolvimento humano, porém de forma não linear. Tal resultado evidencia que indicadores agregados não são suficientes para captar, com precisão, as condições de infraestrutura, gestão e resiliência dos sistemas hídricos. Nesse contexto, o ISH se destaca como uma ferramenta complementar relevante para o diagnóstico e planejamento no setor.

Adicionalmente, verificou-se que a proximidade geográfica com a capital do estado não garante, necessariamente, melhores condições de segurança hídrica, sugerindo desigualdades na distribuição de investimentos e na efetividade das políticas públicas.

Com implicações práticas, destaca-se a necessidade de fortalecimento da gestão integrada dos recursos hídricos, ampliação da capacidade de investimento e incorporação de estratégias voltadas à resiliência hídrica, especialmente em municípios de pequeno porte. Por fim, ressalta-se que o estudo apresenta limitações relacionadas à indisponibilidade de dados para a dimensão ecossistêmica, o que pode influenciar a avaliação global do índice. Ainda assim, a pesquisa se configura como uma contribuição inicial relevante para o diagnóstico da microrregião, podendo subsidiar a formulação de políticas públicas mais eficazes e orientar futuras investigações que ampliem a escala de análise e aprofundem a compreensão das dinâmicas regionais de segurança hídrica.

Referências Bibliográficas

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DA PARAÍBA. Mapa – bacias hidrográficas da Paraíba. João Pessoa: AESA, 2021. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesawebsite/wp-content/uploads/2021/09/3-Mapa-Bacias-Hidrogr%C3%A1ficas-daPara%C3%ADba.pdf. Acesso em: 03 abr. 2025.

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DA PARAÍBA. Volume de açudes. João Pessoa: AESA, s.d. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/volume-acude/?id_acude=5771. Acesso em: 20 jun. 2025.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Manual Metodológico da Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2019.

BRASIL. Decreto nº 11.599, de 25 de outubro de 2023. Institui o Plano Nacional de Segurança Hídrica e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed. 206-A, seção 1, p. 1, 25 out. 2023. Edição extra. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/decreto-n-11.599-de-25-de-outubro-de-2023-519308732. Acesso em: 22 abr. 2025.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000; a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003; a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005; e a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Diário Oficial da União, Brasília, DF, seção 1, p. 1, 16 jul. 2020.

BRASIL. Ministério das Cidades. Painel de Indicadores SINISA 2024 (ano de referência 2023). Brasília: Ministério das Cidades, 2024. Disponível em: https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=agua. Acesso em: 5 abr. 2025.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Paraíba: Panorama. 2024. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/panorama. Acesso em: 13 abr. 2025.

MADANI, K. Global Water Bankruptcy: Living Beyond Our Hydrological Means in the Post-Crisis Era. United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH), Richmond Hill, Ontario, Canada, 2026. doi: 10.53328/INR26KAM001

ONU – Organização das Nações Unidas. Assembleia Geral. Resolução nº 64/292: O direito humano à água e saneamento. Nova York: UN, 2010.

PARAÍBA. Lei Complementar nº 168, de 22 de junho de 2021. Institui as Microrregiões de Água e Esgoto do Alto Piranhas, do Espinharas, da Borborema e do Litoral e suas respectivas estruturas de governança. Diário Oficial do Estado da Paraíba, João Pessoa, 23 jun. 2021.

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de Alhandra. Produto C – Prognóstico do Saneamento Básico. Alhandra, [2022].

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de Caiçara. Produto C – Prognóstico do Saneamento Básico. Caiçara, [2022].
PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de Cuité de Mamanguape. Produto C – Prognóstico do Saneamento Básico. Cuité de Mamanguape, [2022].

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de Marcação. Produto C – Prognóstico do Saneamento Básico. Marcação, [2022].

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de São José dos Ramos. Produto C – Prognóstico do Saneamento Básico. São José dos Ramos, [2022].

PNUD. Painel IDHM – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal. 2021. Disponível em: https://www.undp.org/pt/brazil/desenvolvimento-humano/painel-idhm. Acesso em: 18 mar. 2025.

ASSOREAMENTO DAS CAIXAS DE CAPTAÇÃO PLUVIAL NA DRENAGEM URBANA: ESTUDO DE CASO EM CANOINHAS SANTA CATARINA

1 Tiago Murbach, 2 Adilson Eduardo Sobczack, 3 Leandro Nizer, 4 Sidney Eiselt, 5 Maristela Povaluk, 6 Maurício Rodrigo Schmitt,7 Luana Cechin, 8 Luiz Carlos Weinschutz

1 Universidade do Contestado (UNC), e-mail: tiagomurbach@gmail.com; 2 Universidade do Contestado (UNC), e-mail: aesobczack@gmail.com; 3 Universidade do Contestado (UNC) e-mail : leandro.nizer@aluno.unc.br 4 Universiade do Contestado (UNC) e-mail : sidney.eiselt@aluno.unc.br , 5 Universidade do Contestado (UNC) e-mail maristela@unc.br; 6 Universidade do Contestado (UNC) e mail mauricio.schmitt@unc.br; 7 Universidade do Contestado (UNC) e-mail luana.cechin@professor.unc.br, 8 Universidade do Contestado (UNC), e-mail luizw@unc.br.

Palavras-chave: Assoreamento; Drenagem urbana; Urbanização; Sustentabilidade ambiental.

Resumo

Esta pesquisa teve por finalidade analisar o estado físico e funcional das caixas de captação integrantes do sistema de drenagem pluvial urbana no município de Canoinhas, Santa Catarina. O estudo correlaciona o estado de conservação destas estruturas com a eficiência hidráulica do escoamento superficial em áreas sob pressão de crescimento populacional. A fundamentação teórica ancora-se nas diretrizes normativas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e na literatura clássica e contemporânea sobre hidrologia e microdrenagem. A metodologia adotada consistiu num levantamento exploratório e quantitativo realizado em 13 bairros distintos, abrangendo zonas de uso residencial e industrial, durante o ano de 2025 , sendo analisadas 4337 caixas de captação .Através da análise dos dados constatou-se, que a densidade urbana e a manutenção preventiva insuficiente potencializam o assoreamento severo das redes, elevando substancialmente o risco de inundação e alagamentos localizados. Conclui-se que a adequação estrita às normas de referência vigentes é crucial para assegurar a sustentabilidade hídrica municipal e a resiliência da infraestrutura urbana face aos desafios impostos pela urbanização e por eventos climáticos extremos.

Introdução

A urbanização acelerada e a subsequente impermeabilização do solo constituem um dos maiores desafios contemporâneos para a gestão sustentável das águas pluviais no perímetro urbano. A substituição de áreas de infiltração natural por pavimentos e telhados altera drasticamente o ciclo hidrológico local, resultando num aumento significativo dos caudais de pico e numa redução acentuada do tempo de concentração das águas nas bacias hidrográficas. Conforme postulado por Tucci (2004), o crescimento desordenado das cidades sem o devido planejamento das infraestruturas de microdrenagem sobrecarrega o sistema de galerias pluviais, transformando o que seriam escoamentos controlados em potenciais riscos de desastre. Complementando esta visão, Baptista *et al*. (2011) ressaltam que a concepção tradicional de higienismo, baseada na rápida evacuação das águas, tem se mostrado insuficiente diante da magnitude da expansão urbana atual. Cardoso *et al.* (2024) reforçam que mecanismos compensatórios e soluções baseadas na natureza são alternativas viáveis, mas dependem de infraestrutura básica conservada. Neste contexto, o transporte de sólidos e o carreamento de sedimentos assumem um papel crítico na manutenção da eficiência hidráulica. O fenômeno do assoreamento das caixas de captação e passagens pluviais compromete a secção útil de escoamento, criando pontos de estrangulamento que, conforme salientado por Canholi (2014), reduzem drasticamente a vida útil das obras de engenharia e favorecem a ocorrência de inundações recorrentes. Silva (2021) acrescenta que o carreamento de solo em vias pavimentadas sem sarjetas adequadas é o principal vetor de obstrução em cidades médias. O embasamento técnico para a compreensão destes processos físicos e sedimentológicos é amplamente discutido por Poleto (2012), que destaca a influência direta da dinâmica de uso e ocupação do solo na carga de sedimentos carreada para o sistema de drenagem. No cenário jurídico brasileiro, o ordenamento evoluiu significativamente com a Lei Federal nº 9.433/1997, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos, e foi consolidado pela Lei nº 11.445/2007, que define a drenagem e o manejo de águas pluviais como serviço público integrante do saneamento básico. O Novo Marco Legal do Saneamento, Lei nº 14.026/2020, integrado às Normas de Referência da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021), exige dos gestores municipais padrões de eficiência operacional e protocolos de manutenção preventiva. O arcabouço é complementado pelo Decreto nº 7.217/2010, que regulamenta a obrigação de diagnóstico da drenagem no Plano Municipal de Saneamento, e pela Lei nº 12.651/2012, Código Florestal, que tutela as Áreas de Preservação Permanente urbanas impactadas por falhas de microdrenagem, como as margens do arroio Monjolo, na cidade de Canoinhas/SC. Em Santa Catarina, a Lei Estadual nº 9.748/1994 determina a compatibilização entre plano diretor e gestão de bacia hidrográfica. No âmbito local, a Lei Complementar nº 052/2011, Plano Diretor de Canoinhas, estabelece diretrizes de infraestrutura que incluem a manutenção do sistema pluvial. O conjunto normativo impõe ao gestor municipal dever legal de conservação preventiva, conforme Resolução CONAMA 357/2005, que veda o lançamento de efluentes que alterem a classe do corpo receptor. Desta forma, a investigação em Canoinhas justifica-se pela necessidade premente de diagnosticar as condições físicas da rede para

alinhar a gestão municipal às exigências regulatórias e ambientais, garantindo a segurança da infraestrutura e a preservação dos corpos hídricos receptores. O presente trabalho teve como objetivo geral analisar o estado físico e funcional das caixas de captação do sistema de drenagem pluvial urbana de Canoinhas, estabelecendo uma correlação entre as condições de conservação e os impactos na eficiência do escoamento municipal. Para tanto, os objetivos específicos compreendem: Classificar as unidades amostradas quanto às suas características geométricas e materiais constituintes; Avaliar o grau de conservação estrutural e o nível de assoreamento por sedimentos e resíduos sólidos.

Metodologia

O referido estudo caracterizou-se com uma abordagem baseada em métodos quantitativos, descritivos e exploratórios para realizar um diagnóstico integral das infraestruturas pluviais. Utilizou-se também pesquisa documental junto à Secretaria Municipal de Planejamento de Canoinhas para obtenção do cadastro técnico da rede. A área de estudo compreende o perímetro urbano do município de Canoinhas, Santa Catarina, onde se realizou um estudo de caso focado em 13 bairros com diferentes características socioeconômicas e de ocupação. O levantamento de campo foi executado entre janeiro e agosto de 2025, utilizando o mapeamento técnico das redes de drenagem municipal para a identificação e localização das unidades de amostragem. A seleção dos bairros contemplou tanto áreas residenciais consolidadas quanto zonas industriais, permitindo uma análise comparativa sobre o impacto de diferentes atividades no aporte de sedimentos e resíduos para o sistema pluvial. Os bairros analisados foram: Água Verde, Alto da Tijuca, Alto das Palmeiras, Boa Vista, Campo da Água Verde, Centro, Industrial I, Industrial II, Jardim Esperança, Marcílio Dias, Piedade, Sossego e Tricolin. Para a pesquisa de campo com verificação in loco, procedeu-se à inspeção visual direta e técnica de cada caixa de captação selecionada, totalizando 4637 unidades da respectiva amostragem. Os parâmetros avaliados incluíram a classificação geométrica da estrutura, a identificação dos materiais constituintes, sendo eles concreto, alvenaria ou materiais poliméricos, a integridade física das tampas e grelhas e, fundamentalmente, a medição do nível de colmatação ou assoreamento por sedimentos finos e resíduos sólidos. Os dados foram integrados em sistemas de informação geográfica para permitir a correlação entre a localização das obstruções e a proximidade com as áreas de descarga na bacia do arroio Monjolo, seguindo os fundamentos de hidrologia urbana propostos por Tucci (2004). A Tabela 01 apresenta os dados descritivos que foram coletados para as estruturas de microdrenagem. A Figura 01 apresenta a área urbana do Município de Canoinhas/SC e respectivos bairros de estudo.

Nome do ponto	NNN	NNN = número do ponto rastreado
Material	Material da tampa do PV	F = ferro
		C = concreto
		G = grelha de aço estrutural
Condição	Se a estrutura está em boas condições de conservação	1 = boa
		2 = ruim (danificada)
Obstrução Superfície	Se há obstrução superficial na estrutura de drenagem	N = não
		P = obstruído parcialmente
		O = obstruído totalmente

Tabela 01: Características dos elementos de microdrenagem coletados.
Fonte: Os autores (2026)

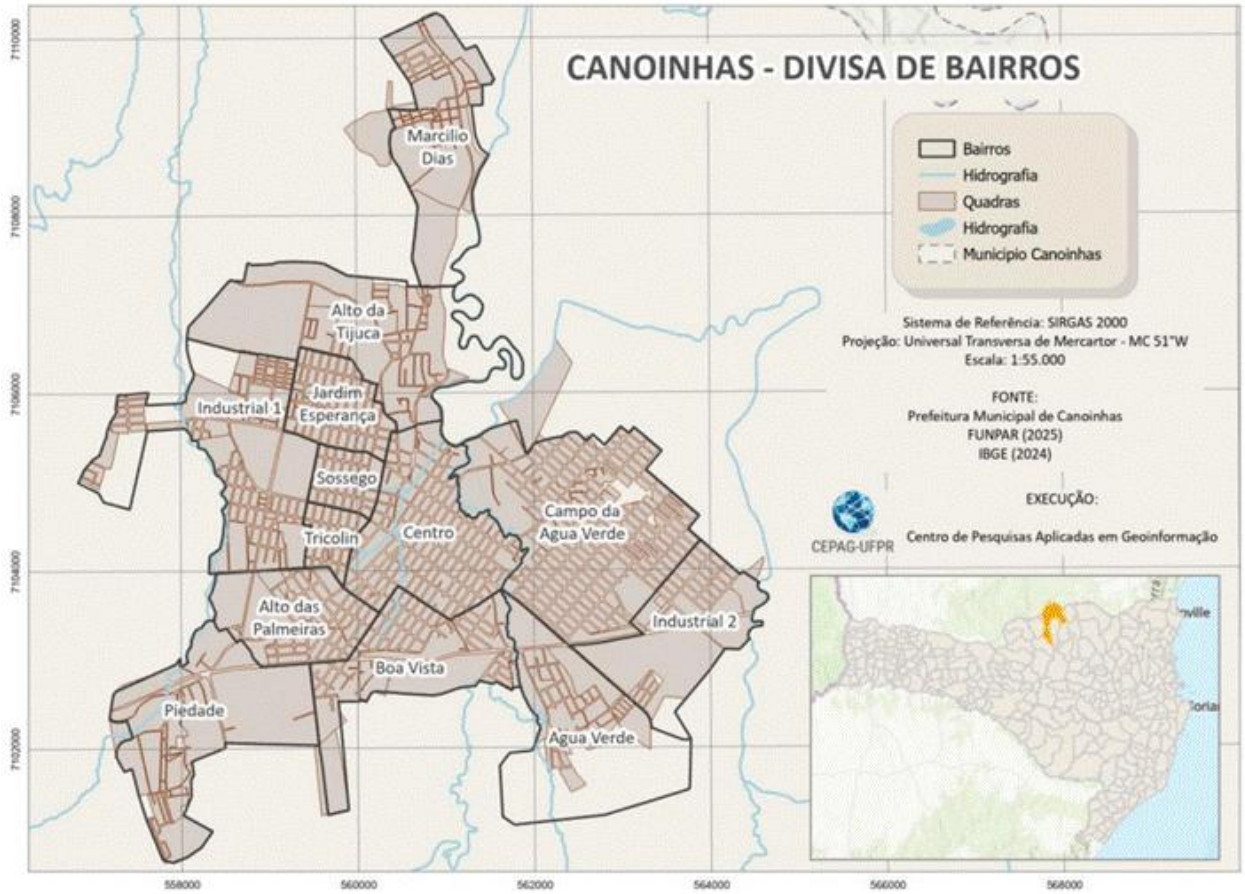


Figura 01: Mapa dos bairros no município de Canoinhas.
Fonte: CEPAG (2026)

Resultados e discussões

Foram coletadas 4637 estruturas do tipo Caixas de Coleta. Sua distribuição por bairro encontra-se na tabela a seguir:

Bairro	Quantidade	%
Água Verde	281	6.0
Alto da Tijuca	204	4.3
Alto das Palmeiras	358	7.7
Boa Vista	342	7.3
Campo da Água Verde	913	19.6
Centro	987	21.3
Industrial 1	326	7.0
Industrial 2	140	3.0
Jardim Esperança	430	9.2
Marcílio Dias	70	1.5
Piedade	188	4.0
Sossego	227	4.8
Tricolin	171	3.6

Tabela 02: Quantidade de caixas de coleta por bairro.
Fonte: CEPAG (2026)

Em relação às principais características das estruturas levantadas, foi verificado que o material para tampas das caixas de coleta é predominantemente de Ferro (43%) e Concreto (52%), conforme indicado na Tabela 03 e na Figura 02. Apenas 1% das estruturas não apresentam tampa ou grade.

Tipo de material da Tampa	Quantidade
Concreto	2413
Concreto e ferro (combinada)	204
Ferro	1967
Sem tampa ou grelha	53

Tabela 03: Material da tampa – caixas de coleta.
Fonte: CEPAG (2026)

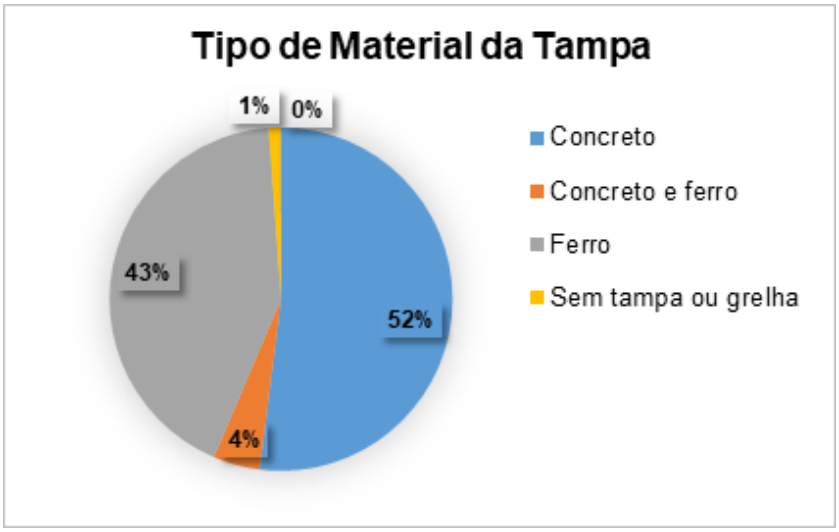


Figura 02: Material da tampa – caixas de coleta.
Fonte: CEPAG (2026)

Do total de caixas de coleta verificadas, 86% encontram-se em boa condição e 14% encontram-se em condição ruim (danificadas). A tabela 04 e a Figura 03 apresentam estes quantitativos.

Situação	Quantidade
Boa	4004
Ruim (danificada)	633

Tabela 04: Situação das caixas de coleta.
Fonte: CEPAG (2026)

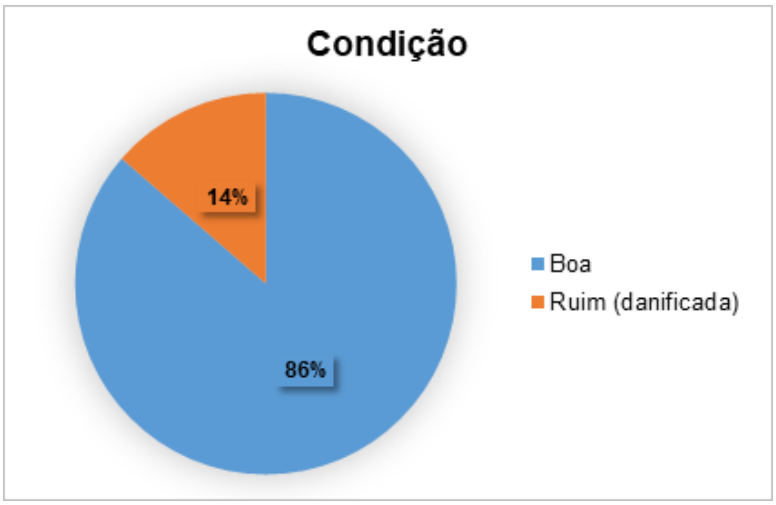


Figura 03: Situação das caixas de coleta.
Fonte: CEPAG (2026)

Foi coletada também a informação sobre a obstrução da superfície das caixas de coleta. Do total das estruturas medidas, 20% apresentam obstrução parcial e somente 3% obstrução total. A tabela 05 e a Figura 04 indicam estes quantitativos.

Obstrução da superfície	Quantidade
Sem obstrução	3573
Obstruído parcialmente	904
Obstruído totalmente	160

Tabela 05: Obstrução da superfície das caixas de coleta.
Fonte: CEPAG (2026)

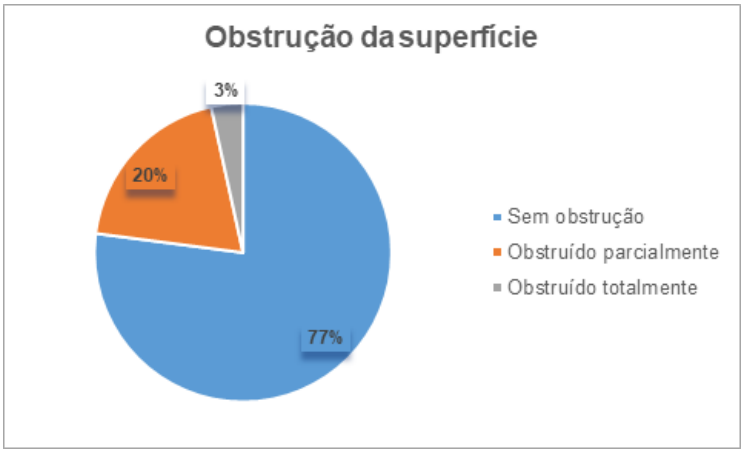


Figura 04: Existência de obstrução da superfície das caixas de coleta.
Fonte: CEPAG (2026)

Por fim, ao realizar a confrontação das caixas com obstrução total em relação às bacias hidrográficas do município, foi verificado que 54% destas encontram-se na Bacia do Arroio Monjolo, a qual apresenta maior susceptibilidade a alagamentos/enchentes em precipitações elevadas, ressaltando a necessidade de acompanhamento e intervenções pelo poder público na manutenção de dispositivos de drenagem. As figuras 05 e 06 apresentam o mapa das bacias hidrográficas e caixas coletoras com obstrução total. A tabela 06 e a Figura 07 apresentam os quantitativos informados.

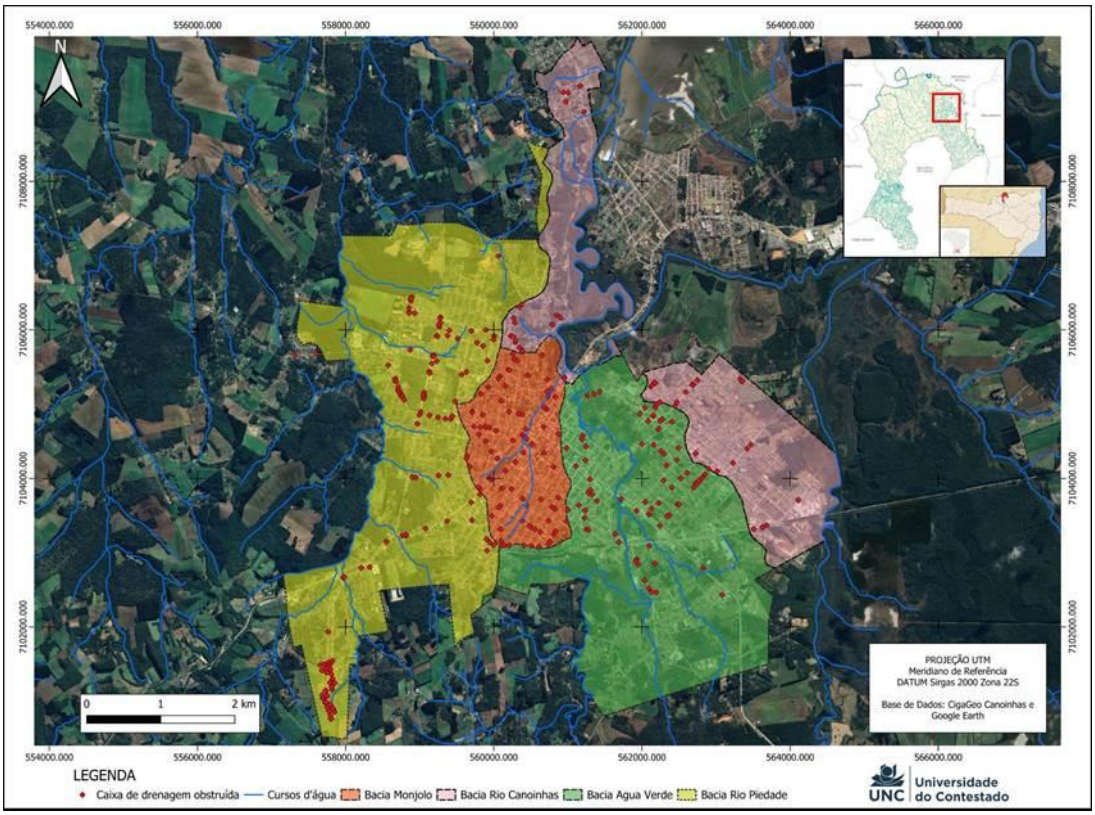


Figura 05: Mapa das bacias hidrográficas e caixas de drenagem obstruídas.
Fonte: Adaptado CEPAG (2026)

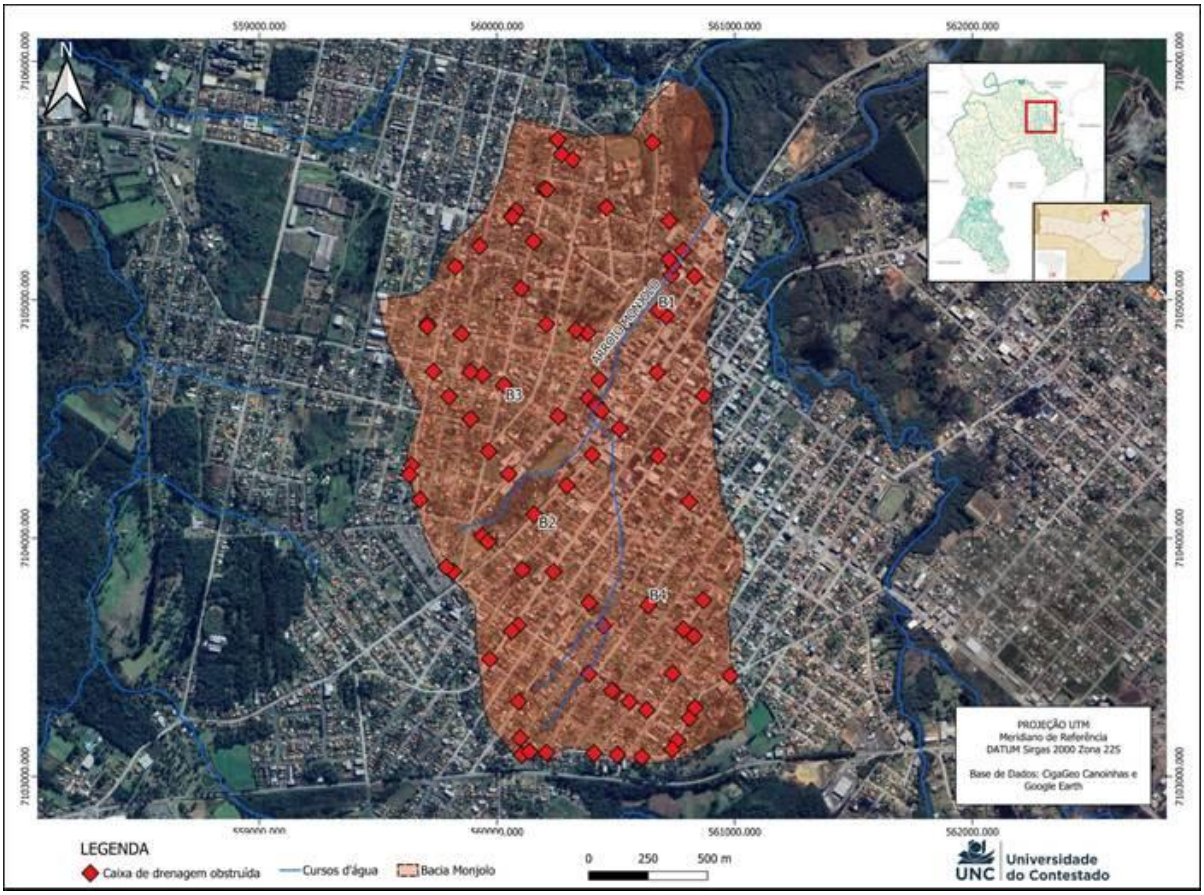


Figura 06: Caixas de drenagem obstruídas na bacia do arroio monjolo.
Fonte: Os autores (2026)

Bacia Hidrológica	Quantidade
Bacia Arroio Monjolo	87
Demais bacias	73

Tabela 06: Obstrução de caixas coletoras por bacia hidrológica.
Fonte: Os autores (2026)

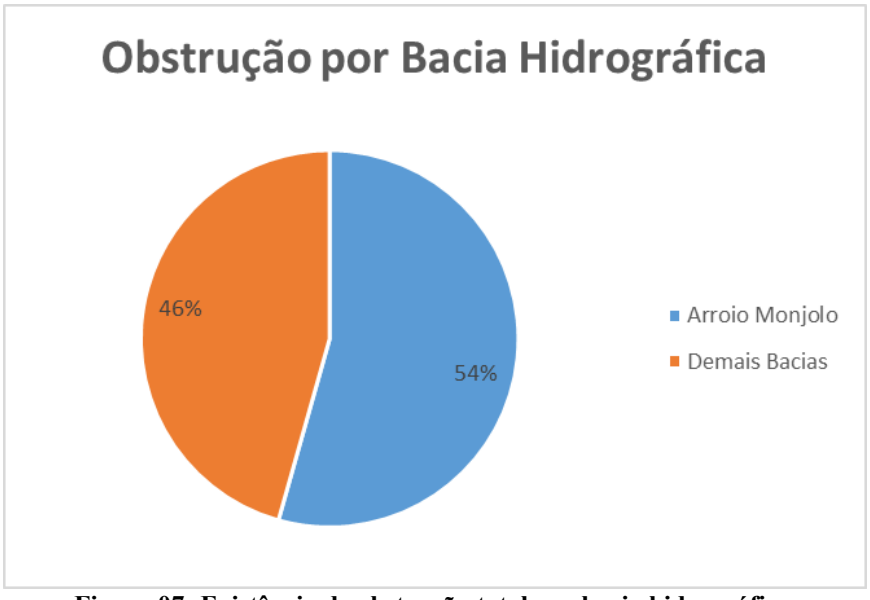


Figura 07: Existência de obstrução total por bacia hidrográfica.
Fonte: Os autores (2026)



Figura 08: Exemplo de caixas de passagem obstruídas. B1 imagem superior esquerda, B2 superior direita, B3 inferior esquerda e B4 inferior direita.
Fonte: CEPAG (2026)

Considerações finais

Esta pesquisa analisou o estado físico e funcional das caixas de captação do sistema de drenagem pluvial urbana do município de Canoinhas, Santa Catarina. No que tange aos objetivos específicos, os resultados permitem concluir que as unidades amostradas apresentam variações significativas quanto às características geométricas e materiais constituintes, refletindo distintas fases de implantação do sistema e ausência de padronização. O grau de conservação estrutural revelou que 86% das caixas de coleta verificadas encontram-se em boa condição, enquanto 14% encontram-se em condição ruim (danificadas). No que se refere à obstrução superficial, 20% das estruturas apresentam obstrução parcial e 3% obstrução total. A pesquisa demonstra que, mesmo diante de um percentual majoritário de caixas em boas condições estruturais, os 14% de unidades danificadas e os 23% com obstrução superficial (parcial ou total) comprometem o desempenho do sistema de drenagem, agravando os riscos de alagamentos e sobrecarga da rede pública, especialmente em eventos pluviométricos intensos.A análise espacial demonstrou que a Bacia do Arroio Monjolo concentra a maior parcela das obstruções totais (87 unidades). A colmatação dessas caixas atua como um fator agravante para cheias, transformando problemas de manutenção em riscos de desastre. Conclui-se, portanto, que a adequação estrita às normas de referência vigentes, aliada à implementação de programas regulares de limpeza, desobstrução, substituição de unidades danificadas e remoção de resíduos sólidos das superfícies de captação, é condição essencial para assegurar a sustentabilidade hídrica municipal. Recomenda-se, ainda, o fortalecimento da governança colaborativa entre poder público e sociedade civil, com ênfase em campanhas educativas sobre o descarte adequado de resíduos, para o enfrentamento dos desafios impostos pela urbanização acelerada e por eventos climáticos extremos.

Referências Bibliográficas

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Norma de Referência nº 1/2021/ANA**. Brasília: ANA, 2021.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2. ed. Porto Alegre: Editora ABRH, 2011.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, DF: Presidência da República, 1997.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, DF: Presidência da República, 2007.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CANOINHAS. **Lei Complementar nº 052, de 15 de dezembro de 2011**. Institui o Plano Diretor do Município de Canoinhas. Canoinhas: Câmara Municipal, 2011.

CARDOSO, Ricardo Terenzi *et al*. Mecanismos de drenagem urbana e soluções sustentáveis para áreas urbanizadas. In: **Dinâmicas Socioambientais em Brasília-DF**. Editora Científica Digital, 2024. p. 153-168.

CEPAG - CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS AMBIENTAIS E GEOPROCESSAMENTO. **Base cartográfica digital do município de Canoinhas-SC**. Canoinhas: CEPAG, 2026.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água. Brasília: CONAMA, 2005.

POLETO, C. **Sedimentologia Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2012.

SANTA CATARINA. **Lei nº 9.748, de 30 de novembro de 1994**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos. Florianópolis: ALESC, 1994.

SILVA, R. M. **Drenagem Urbana e Sustentabilidade**. São Paulo: Editora Técnica, 2021.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2004.

O PAPEL DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO NEXO ÁGUA-ENERGIA-INOVAÇÃO: BENEFÍCIOS SOCIOAMBIENTAIS DE UM ARRANJO MULTI-INSTITUCIONAL PARA O ODS 6 – ESTUDO DE CASO NO OESTE DO PARANÁ

1Eduardo Borges Lied, 2Diego Santos de Oliveira, 3Eduardo Figueira, 4Daniel Bartiko, 5Gustavo Rafael Collere Possetti

[1] Itaipu Parquetec, e-mail: eduardobl@bolsista.itaipuparquetec.org.br; [2] Itaipu Parquetec, e-mail: diego.oliveira@itaipuparquetec.org.br; [3] Itaipu Parquetec, e-mail: eduardomatheusfigueira@gmail.com; [4] Itaipu Binacional, e-mail: bartiko@itaipu.gov.br; [5] Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), e-mail: gustavorcp@sanepar.com.br

Palavras-chave: esgotamento sanitário; valoração econômica; benefícios socioambientais.

Resumo

O presente estudo analisa a implementação de um modelo de arranjo territorial fundamentado no Nexo Água–Energia–Inovação, estruturado a partir de uma cooperação técnico-financeira entre a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), a Itaipu Binacional e o Itaipu Parquetec, com foco no avanço do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6). O estudo de caso foi desenvolvido na região Oeste do Paraná, Brasil, na área de influência do Reservatório de Itaipu, abrangendo seis municípios: Santa Helena, Medianeira, Itaipulândia, Missal, Ramilândia e Serranópolis do Iguaçu. A iniciativa contempla a construção de três novos sistemas de esgotamento sanitário (SES) e a modernização de três sistemas existentes, incluindo estações de tratamento de esgoto (ETEs), redes coletoras, estações elevatórias e soluções tecnológicas sustentáveis. O estudo adotou abordagem integrada de avaliação socioeconômica e ambiental. A valoração socioeconômica foi realizada a partir de indicadores relacionados à geração de emprego, renda, saúde pública, produtividade do trabalho, valorização imobiliária, com base em dados secundários e coeficientes derivados da literatura. A valoração ambiental considerou a redução de cargas poluidoras, nutrientes, sólidos suspensos, emissões de gases de efeito estufa e os benefícios associados à melhoria da qualidade da água. Os resultados demonstram que o investimento de aproximadamente R$ 184 milhões possui elevado potencial de retorno econômico e socioambiental. Sob a perspectiva socioeconômica, estima-se a geração de mais de 3.300 empregos diretos, indiretos e induzidos, além de um retorno agregado de R$ 3,16 para cada real investido, totalizando aproximadamente R$ 598 milhões em benefícios econômicos. Do ponto de vista ambiental, os resultados indicam benefícios monetários anuais superiores a R$ 17 milhões, associados principalmente à economia em práticas de conservação do solo, ao aumento da provisão hídrica e à mitigação das mudanças climáticas. Em termos físicos, destaca-se a redução de mais de 3 mil toneladas anuais de carga orgânica expressas na forma de DBO, além da diminuição das cargas de fósforo e nitrogênio lançadas no reservatório. Tais resultados reforçam o papel do saneamento para a proteção da segurança hídrica e energética regional. Conclui-se que o modelo proposto transcende a abordagem tradicional do saneamento, consolidando-se como modelo de gestão integrada do território, capaz de articular infraestrutura, inovação e desenvolvimento regional.

Introdução

O Brasil destaca-se mundialmente pela abundância de recursos hídricos, os quais desempenham papel estratégico na transição do país para modelos de desenvolvimento mais sustentáveis. Entretanto, conforme destacado por Farjalla et al. (2021), para concretizar esse potencial, é necessário primeiro superar desafios significativos de gestão e conservação, portanto o desenvolvimento de estratégias inovadoras para o uso, a gestão e a conservação dos recursos hídricos são fundamentais.

Entre essas estratégias, as ações de saneamento têm ganhado relevância por sua capacidade de produzir efeitos que transcendem a dimensão sanitária. Hofmann et al. (2025) destacam as conexões entre ações de saneamento e o atingimento de múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) proporcionadas pelas múltiplas sinergias entre saneamento e outros setores. Em especial, o ODS 6, relacionado ao acesso à água potável e ao saneamento, mantém interfaces diretas com o ODS 3 (Saúde e Bem-estar), ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e ODS 17 (Parcerias e Meios de Implementação).

Apesar dessa relevância, muitos países de baixa e média renda ainda enfrentam dificuldades significativas para universalizar os serviços de saneamento (Rajendrakumar et al., 2025). No Brasil, esse desafio é expressivo em pequenos municípios: mais de 4.300 cidades possuem menos de 30 mil habitantes e apresentam déficits de saneamento, o que evidencia a necessidade de modelos técnicos e administrativos que sejam replicáveis e economicamente viáveis.

Nesse cenário, o referencial analítico do nexo água–energia tem se consolidado como importante referencial analítico para compreender as interdependências entre recursos naturais, infraestrutura e desenvolvimento territorial. Por exemplo, conforme discutido por Brown et al. (2025) e Bortoleto et al. (2021), água e energia são sistemas conectados: a produção de energia depende da disponibilidade hídrica, ao passo que a captação, tratamento e distribuição de água demandam energia. Assim, intervenções em saneamento passam a ter implicações diretas não apenas na qualidade ambiental, mas também na segurança hídrica e energética. Adicionalmente, a inovação emerge como o elemento catalisador capaz de mitigar as tensões entre essas demandas crescentes e a escassez de recursos. Essa dimensão não se limita apenas a novas tecnologias, abrangendo também a criação de novos modelos colaborativos, de governança e de economia circular. Ao incorporar tal pilar, consolida-se

a perspectiva do nexo água-energia-inovação. Sob essa ótica, a inovação atua como o motor que permite o desacoplamento entre o crescimento econômico e o consumo intensivo de recursos naturais. Em vez de setores isolados, o nexo propõe uma infraestrutura integrada, fechando ciclos produtivos com maior eficiência sistêmica. Portanto, a tríade água-energia-inovação torna-se o pilar fundamental para a resiliência urbana e a sustentabilidade do desenvolvimento territorial frente às incertezas das mudanças climáticas.

Essa perspectiva é relevante em territórios estratégicos, como a área de influência do Reservatório de Itaipu, cuja capacidade de armazenamento, próxima de 29 bilhões de m³, sustenta uma das maiores infraestruturas de geração de energia renovável do mundo. A proteção da qualidade da água desse reservatório contribui diretamente para a manutenção da geração de energia elétrica em escala nacional, reforçando a importância do saneamento como instrumento de proteção de ativos energéticos críticos. Em números, a proteção do reservatório contribui diretamente para a salvaguarda da geração de mais de 3,1 bilhões de MWh de energia elétrica, o que corresponde a cerca de 10% do consumo de energia do Brasil e a aproximadamente 88% do consumo do Paraguai. Em termos comparativos, esse volume de energia seria suficiente para suprir a demanda elétrica global por cerca de 40 dias.

A literatura recente tem demonstrado que estações de tratamento de esgoto (ETEs), tradicionalmente concebidas como infraestruturas de controle da poluição, passaram a ser reconhecidas como unidades estratégicas para eficiência energética, recuperação de recursos, mitigação das mudanças climáticas e fortalecimento dos serviços ecossistêmicos. Soluções como wetlands construídos, sistemas modulares e geração energética in loco têm ampliado o papel dessas infraestruturas na promoção da resiliência territorial (Farjalla et al., 2021).

Apesar dos avanços conceituais e tecnológicos, um desafio persistente refere-se à mensuração objetiva dos benefícios gerados por essas iniciativas. As análises tradicionais de custo-benefício acabam subestimando os ganhos líquidos dos investimentos em saneamento por não incorporarem adequadamente externalidades ambientais, sociais e econômicas. Estudos como os de Molinos-Senante et al. (2010) e Hernández-Sancho et al. (2010) evidenciam a necessidade de abordagens integradas capazes de internalizar custos evitados, benefícios ecossistêmicos e efeitos associados à redução de impactos ambientais.

Diante desse contexto, o presente estudo propõe analisar um modelo multi-institucional baseado no Nexo Água–Energia–Inovação, desenvolvido na região Oeste do Paraná, como estratégia para fortalecimento da resiliência regional e implementação do ODS 6. O trabalho busca demonstrar como investimentos em esgotamento sanitário, articulados a parcerias estratégicas entre setor de saneamento, setor energético e instituições de pesquisa, podem gerar benefícios para a qualidade da água, segurança energética, saúde pública e desenvolvimento socioeconômico.

Material e métodos

Delimitação do estudo

O presente estudo está inserido no âmbito do convênio institucional denominado Cooperação Técnica e Financeira para Implementação de Sistemas Sustentáveis de Esgotamento Sanitário, o qual representa um investimento total de aproximadamente R$ 184 milhões. Essa cooperação foi estabelecida por meio de uma parceria estratégica entre a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), a Itaipu Binacional (IB) e o Itaipu Parquetec, centro de pesquisa e inovação vinculado à IB.

Essa parceria tem como escopo a implementação, a otimização e a expansão de sistemas de esgotamento sanitário e de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) em seis municípios da Região Oeste do Paraná, localizados na área de influência direta do Reservatório de Itaipu. O projeto contemplou a construção de três novos sistemas completos de saneamento nos municípios de Missal, Ramilândia e Serranópolis do Iguaçu, bem como a modernização e ampliação de três sistemas já existentes nos municípios de Santa Helena, Medianeira e Itaipulândia. A iniciativa foi concebida para alcançar reduções de carga orgânica expressas na forma de DBO e descarga de nutrientes, incluindo fósforo e nitrogênio.

No âmbito da Sanepar, o convênio possibilita, principalmente, avanços para atendimento dos compromissos de universalização dos serviços de esgotamento sanitários, notadamente em municípios de pequeno porte. Além disso, a implementação de processos avançados e replicáveis de tratamento assegura que o lançamento dos efluentes tratados em corpos d'água sensíveis atenda aos padrões cada vez mais restritivos estabelecidos pelos órgãos ambientais. Para a IB, a iniciativa assume relevância estratégica para a segurança operacional da usina, uma vez que a redução das cargas de nutrientes responsáveis pela eutrofização sazonal do reservatório contribui para a proteção da produção de energia, além de favorecer o uso múltiplo da água, principalmente nos braços do reservatório, contribuindo para a segurança hídrica. Para o Itaipu Parquetec, a iniciativa atende ao objetivo de fomentar a pesquisa e inovação para o desenvolvimento energético e tecnológico, com ênfase na sustentabilidade.

Valoração socioeconômica

A valoração dos benefícios socioeconômicos resultantes das ações do convênio foi baseada na análise integrada de indicadores socioeconômicos, permitindo estimar os efeitos potenciais dos investimentos em saneamento sobre variáveis relacionadas à saúde pública, geração de emprego, renda, educação e desenvolvimento regional.

De forma geral, a metodologia envolveu: (i) levantamento bibliográfico e definição dos indicadores socioeconômicos associados ao saneamento; (ii) coleta e padronização de dados provenientes de bases oficiais, como SINISA, DATASUS e IPEADATA; (iii) construção de coeficientes de impacto baseados em evidências empíricas da literatura especializada; e, (iv) aplicação de ferramentas analíticas para estimar os efeitos potenciais dos investimentos sobre os indicadores selecionados.

Valoração ambiental

A valoração dos benefícios ambientais associadas às intervenções foi realizada com base na metodologia proposta por Lied et al. (2025). Essa abordagem fundamenta-se na identificação de indicadores ambientais associados à melhoria da qualidade ambiental, na quantificação das respectivas métricas físicas e na aplicação de fatores de conversão (ou extrapolação) que permitem traduzir os benefícios ambientais em valores econômicos.

Em resumo, a metodologia consiste em: (i) identificar os benefícios ambientais gerados pelas intervenções; (ii) definir indicadores capazes de quantificar esses benefícios em termos físicos; (iii) selecionar fatores de conversão monetária baseados em evidências da literatura; e, (iv) estimar o valor econômico dos benefícios a partir da multiplicação entre as métricas quantificadas e os respectivos fatores de conversão.

Os indicadores utilizados refletem, principalmente, a redução de cargas poluidoras, a diminuição de nutrientes e sólidos nos corpos hídricos, a mitigação de emissões de gases de efeito estufa e a proteção de recursos hídricos. Os fatores de conversão monetária adotados baseiam-se em abordagens de custos evitados, consequências econômicas e disposição a pagar.

Resultados e Discussão

Perfil das ações de intervenção

Diagnósticos ambientais realizados em 2020 revelaram que 23% da carga de fósforo responsável pela eutrofização sazonal do Reservatório de Itaipu tinha origem no esgoto doméstico de pequenos municípios. Para mitigar esse impacto, o projeto desenvolveu um escopo de engenharia de alto desempenho, concebido para atingir metas de universalização conforme o prazo nacional de 2033 (Lei 10.032/2020).

O Quadro 1 resume os cenários anterior e posterior às intervenções do projeto, apresentando a população atendida e o Índice de Atendimento com Rede Coletora de Esgoto (IARCE) nos municípios contemplados.

Quadro 1: Resumo das ações do convênio em termos de índices de atendimento de esgotamento sanitário para os municípios contemplados.

Município	População atendida (antes)	População atendida (depois)	IARCE (antes)	IARCE (depois)
Santa Helena	16.783	16.783	86%	86%
Medianeira	21.330	36.636	40%	68%
Itaipulândia	6.301	7.398	69%	81%
Ramilândia	0	1.612	0%	61%
Missal	0	7.166	0%	99,8%
Serranópolis do Iguaçu	0	2.306	0%	69%

Os dados apresentados no Quadro 1 indicam que os resultados das ações implementadas contribuem de forma significativa para o cumprimento das metas de universalização do saneamento estabelecidas pela Lei nº 10.033/2020, especialmente ao se considerar que a gestão e a melhoria dos indicadores de saneamento representam um dos maiores desafios enfrentados pelos pequenos municípios. O Quadro 2 descreve melhor as principais intervenções realizadas e alcance das respectivas obras para cada município.

Quadro 2: Descrição das intervenções realizadas no âmbito do convênio.

Município	Descrição das obras	
	Principal característica	Escopo de engenharia
Santa Helena	Complementação dos processos de tratamento com sistema de remoção de fósforo e desinfecção do efluente final. Implementação de sistema físico-químico para remoção adicional de fósforo e para desinfecção do efluente final visando melhorar o tratamento realizado com lodos ativados SBR.	Implementação de tanques de armazenamento de produtos químicos, sistema de dosagem, tanque de mistura e/ou câmara de contato na área da ETE.
Medianeira	Ampliação e melhorias da ETE e adição de processo complementar para nitrificação. Implementação de processo unitário biológico aeróbio e *retrofit* geral da ETE para realização de nitrificação e para remoção de fósforo visando melhorar o tratamento. Tratamento anaeróbio do lodo com geração de biogás, o qual é convertido em energia elétrica e biometano.	Projeto de engenharia para implementação de sistema de tratamento aeróbio e aprimoramento dos processos unitários existentes visando a máxima eficiência possível na reduzida área disponível para obras de ampliação.
Integração Missal/ Itaipulândia	Inovação na Gestão Integrada de Esgoto entre Municípios: Encaminhamento da vazão do SES Missal para a ETE Itaipulândia por meio da implementação de um interceptor ligando Missal e Itaipulândia.	Implementação de 41 km de RCE na malha urbana de Missal, coletores, linhas de recalque, estações elevatórias de esgoto e interceptores. Obras para adequação e modernização da ETE Itaipulândia visando à interligação entre os municípios.
Ramilândia	Tratamento de esgoto por meio de sistemas wetlands construídos e energia limpa. Utilização de conceitos de infraestrutura verde para concepção de uma ETE composta por wetlands construídos, sendo a energia necessária para operação gerada in loco por sistema fotovoltaico.	Implementação de 11 km de RCE na malha urbana de Ramilândia, coletores, linhas de recalque, estações elevatórias de esgoto, interceptores e estação de tratamento de esgoto.

Serranópolis do Iguaçu	Implementação de ETE modular que oferece agilidade e vantagens técnicas e ambientais de obra e de instalação e alta eficiência de tratamento. O lodo é tratado em wetlands construídos, os quais visam a mineralização do material.	Implementação de 22 km de RCE na malha urbana de Serranópolis do Iguaçu, coletores, linhas de recalque, estações elevatórias de esgoto, interceptores e estação de tratamento de esgoto.

Em resumo, as intervenções descritas no Quadro 2 envolvem a construção de três novos sistemas de saneamento e modernização de três redes existentes, incluindo 10 estações elevatórias de alta eficiência e mais de 230 km de redes coletoras de esgoto. O projeto conta com um ponto de inovação na proposta de um modelo de gestão municipal integrada, a partir da implementação de um modelo de "Gestão Integrada de Esgotamento Sanitário", conectando diretamente a rede de esgoto de Missal à ETE de Itaipulândia por meio de um interceptor de alta capacidade, otimizando custos operacionais e a lógica regional do sistema. A recuperação de recursos, por meio da transformação lodo em biogás e, posteriormente, em energia elétrica e biometano é um ponto de destaque na perspectiva da economia circular. A adoção de soluções baseadas na natureza para tratamento do esgoto e do lodo reforça o caráter inovador da iniciativa.

Essa iniciativa priorizou soluções de engenharia sustentáveis e de baixo impacto para minimizar interferências urbanas e maximizar a velocidade de execução. Um diferencial técnico fundamental foi o uso de metodologias não destrutivas para implantação de redes, especialmente a Perfuração Horizontal Direcional (HDD), para instalação de coletores. Essa tecnologia permitiu implantar infraestrutura com mínima escavação superficial, reduzindo o impacto social nas comunidades locais e preservando a paisagem urbana. Além disso, o programa utilizou ETEs modulares de alta eficiência, que oferecem grande versatilidade, permitindo rápida implantação e flexibilidade para ampliação da capacidade conforme a demanda. Ao combinar instalação não destrutiva com unidades modulares de tratamento, o projeto estabeleceu um arranjo tecnológico validado e pronto para replicação em larga escala em outros territórios.

As ETEs foram projetadas para produzir efluentes com qualidade superior aos padrões regulatórios, visando DBO < 15 mg/L, DQO < 70 mg/L, SST < 20 mg/L e remoção avançada de nutrientes com Fósforo Total < 1 mg/L. Esses sistemas são resilientes às variações de vazão induzidas pelo clima, garantindo remoção consistente de nutrientes antes que atinjam o ecossistema do reservatório.

A iniciativa promove o conceito de "ETEs Sustentáveis", cada uma com características próprias, integrando wetlands construídos, desinfecção por ultravioleta e produtos químicos verdes, recuperação de biogás e painéis solares fotovoltaicos para autossuficiência energética, promovendo a transição de uma lógica tradicional de tratamento para uma cadeia de valor baseada nas economias circular e de baixo carbono.

Valoração socioeconômica

Nesta seção reportam-se os potenciais benefícios socioeconômicos, monetários e não monetários, decorrentes das ações previstas no âmbito da cooperação em questão. Para tanto, utilizaram-se os dados combinados com os coeficientes extraídos do estudo do Instituto Trata Brasil (2024).

Inicialmente, avaliaram-se os retornos agregados com base no montante total investido (Quadro 3). Em seguida, apresentam-se estimativas de impacto relacionadas ao aumento percentual da cobertura de coleta de esgoto (Quadro 4).

Quadro 3: Benefícios socioeconômicos provenientes do investimento em esgotamento sanitário no âmbito do convênio.

Indicador	Retorno a cada R$ 1,00 investido	Valor estimado do benefício
Empregos diretos	7,6 x 10 $^{-6}$ empregos	1.398 empregos
Empregos indiretos	3,7 x 10 $^{-6}$ empregos	680 empregos
Empregos induzidos	6,7 x 10 $^{-6}$ empregos	1.232 empregos
Empregos totais	18 x 10 $^{-6}$ empregos	3.312 empregos
Salários totais	30%	R$ 52.514.848,66
Consumo de insumo	70%	R$ 110.400.000,00
Redução dos custos com saúde	R$ 0,05	R$ 9.200.000,00
Aumento da produtividade do trabalho	R$ 1,00	R$ 184.000.000,00
Renda da valorização imobiliária	R$ 0,09	R$ 16.560.000,00
Renda do turismo	R$ 0,17	R$ 31.280.000,00
Renda gerada pelo próprio investimento	R$ 1,19	R$ 218.960.000,00
Renda gerada pelo aumento da operação	R$ 0,45	R$ 82.800.000,00
Impostos ligados à produção	R$ 0,20	R$ 36.800.000,00
Benefícios por R$ 1,00 investido	**R$ 3,16**	**R$ 581.440.000,00**

Quadro 4: Estimativas de impacto relacionadas ao aumento percentual da cobertura de coleta de esgoto.

Município	+ % cobertura	Escolaridade média	Atraso escolar	Salário médio	Valor imobiliário	Taxas de internação (casos/ mil hab.)
Santa Helena	24%	+ 4,34%	- 1,18%	+ 1,18%	+ 0,77%	- 2,21
Medianeira	26%	+ 4,71%	- 1,27%	+ 1,27%	+ 0,83%	- 2,40
Itaipulândia	6,6%	+ 1,19%	- 0,32%	+ 0,32%	+ 0,21%	- 0,61
Ramilândia	43,5%	+ 7,87%	- 2,13%	+ 2,13%	+ 1,39%	- 4,01
Missal	75,8%	+ 13,72%	- 3,71%	+ 3,71%	+ 2,43%	- 6,99
Serranópolis do Iguaçu	60,9%	+ 11,02%	- 2,98%	+ 2,98%	+ 1,95%	- 5,61

A parceria aportou um investimento total de R$ 184.452.853,74 em ações de saneamento na região Oeste do Paraná. Com base na ferramenta de simulação desenvolvida a partir dos coeficientes do Instituto Trata Brasil (2024), estimaram-se os retornos socioeconômicos associados a esse aporte, especialmente em termos de geração de renda, emprego e melhoria de indicadores sociais. Os resultados apontam impactos significativos, incluindo a criação de 1.398 empregos diretos na construção civil, 680 empregos indiretos na cadeia produtiva do setor e 1.232 empregos induzidos pelo aumento da renda, totalizando 3.312 postos de trabalho. Além disso, estimou-se a geração de R$ 52.514.848,66 em salários, R$ 110.400.000,00 em renda na cadeia de insumos e R$ 218.960.000,00 em renda total na economia.

Considerando o efeito multiplicador do investimento em saneamento, cada real investido pode retornar R$ 3,16 para a economia no território avaliado. Nesse contexto, o investimento de aproximadamente R$ 184 milhões resulta em um retorno estimado de R$ 582 milhões (Quadro 3).

Os resultados evidenciam que a expansão da cobertura de esgoto possui potencial para gerar benefícios em várias dimensões, incluindo saúde, educação, emprego, renda e valorização imobiliária. Tais achados corroboram com a literatura que associa o saneamento básico à melhoria da qualidade de vida e ao desenvolvimento socioeconômico (Pearson e McPhedran, 2008; Scriptore, 2016; Fenwick et al., 2018).

Do ponto de vista da avaliação econômica, os achados também encontram respaldo em estudos clássicos da área, que estimam razões benefício-custo entre US$ 5 e US$ 11 para cada dólar investido em intervenções de saneamento (Hutton e Haller, 2004). O presente estudo identificou um retorno de R$ 3,16 por real investido, valor mais conservador, porém que confirma a viabilidade econômica das intervenções. Em consonância com Hutton e Haller (2004), os principais benefícios observados estão relacionados à redução dos custos com saúde, ao aumento da produtividade decorrente da diminuição de dias perdidos por doenças e à geração de renda. Além disso, é possível destacar que os ganhos de produtividade e tempo configuram fatores centrais dos benefícios econômicos, evidenciando que os impactos do saneamento extrapolam a dimensão sanitária e se traduzem em melhorias no desempenho econômico e social.

Os resultados obtidos reforçam, ainda, aqueles apresentados por Adegoke et al. (2023) acerca da relação entre saneamento e saúde pública. Enquanto esses autores demonstram uma correlação negativa entre o acesso ao saneamento e a incidência de doenças de veiculação hídrica, evidenciando que a precariedade dos serviços está associada ao aumento de enfermidades, o presente estudo traduz essa mesma relação em termos monetários e de desenvolvimento regional. A redução dos custos com saúde, aliada ao aumento da produtividade do trabalho, à geração de empregos e à valorização econômica observados neste trabalho, pode ser interpretada como consequência direta da mitigação da carga de doenças associadas à expansão dos sistemas de esgotamento sanitário. Dessa forma, os resultados de Adegoke et al. (2023) fornecem a base epidemiológica que explica os mecanismos pelos quais o saneamento impacta a saúde, ao passo que este estudo avança ao demonstrar que tais melhorias se materializam em ganhos econômicos concretos, evidenciando o saneamento como investimento estratégico com potencial de retorno socioeconômico.

Por fim, os resultados econômicos relacionados à geração de empregos, renda e valorização imobiliária mostram-se significativos. O investimento em saneamento não apenas impulsiona a criação de empregos diretos na construção e operação dos sistemas, mas também promove um importante efeito multiplicador sobre a economia, com a geração de empregos indiretos e induzidos. O fato de a renda total estimada superar o investimento inicial evidencia o potencial do saneamento como investimento de retorno econômico positivo, além de seus reconhecidos benefícios sociais. Em paralelo, a valorização imobiliária reflete a melhoria das condições de vida e o aumento da atratividade das áreas contempladas por infraestrutura sanitária adequada.

Valoração ambiental

Em relação aos benefícios ambientais gerados a partir da inédita parceria interinstitucional, o Quadro 5 resume os principais grupos de indicadores que foram identificados e mensurados de forma monetária.

Quadro 5: Benefícios ambientais monetários provenientes do investimento em sistemas de esgotamento sanitário sustentáveis.

Indicador	Retorno a cada R$ 1 investido	Retorno a cada R$ 10 investidos	Valor estimado do benefício
Benefícios com a redução do consumo de oxigênio nos corpos d'água	0,0037	0,0367	R$ 674.600,64
Benefícios com a economia em práticas de conservação do solo	0,0745	0,7450	R$ 13.706.035,47
Benefícios com aumento de provisão de água para agropecuária	0,0003	0,0032	R$ 212.543,97
Benefícios com aumento de provisão de água para abastecimento humano urbano	0,0012	0,0116	R$ 59.012,79
Benefícios com prevenção dos impactos das mudanças climáticas	0,0095	0,0953	R$ 1.753.275,52
Ganho de bem-estar com balneabilidade	0,0047	0,0473	R$ 870.543,85
Total	**R$ 0,094**	**R$ 0,94**	**R$ 17.276.012,24**

Os resultados evidenciam que os investimentos em esgotamento sanitário produziram benefícios ambientais que totalizaram R$ 17.276.012,24, o que corresponde a um retorno aproximado de R$ 0,94 para cada R$ 10 investidos. Entre os indicadores avaliados, destacam-se os benefícios associados à economia em práticas de conservação do solo, que representam a maior parcela do retorno ambiental estimado.

O nexo água–energia-inovação apresenta relação direta com esses benefícios, uma vez que o Reservatório de Itaipu é diretamente impactado pelo aporte de sólidos e nutrientes provenientes da bacia hidrográfica. Nesse sentido, a qualidade da água constitui fator estratégico para a preservação da vida útil do reservatório e, consequentemente, para a manutenção da capacidade de geração de energia. As estimativas realizadas indicam que os investimentos na melhoria do tratamento de esgoto resultaram em economia aproximada de R$ 14 milhões por ano em práticas de conservação do solo.

A premissa adotada para esse indicador é fundamentada na abordagem dos custos evitados, segundo a qual a ampliação do saneamento reduz a carga de poluentes lançada nos corpos hídricos, diminuindo a necessidade de intervenções voltadas ao controle desses contaminantes. Dessa forma, a menor demanda por práticas mitigadoras pode ser contabilizada como benefício econômico.

A utilização da economia em práticas de conservação do solo como proxy para valorar os benefícios associados à redução do aporte de nutrientes possui coerência metodológica. Isso porque o fósforo e o nitrogênio presentes nos corpos d'água decorrem não apenas de fontes pontuais, como os sistemas de esgotamento sanitário, mas também de fontes difusas relacionadas ao uso e manejo do solo. Tais processos, por vezes, demandam intervenções corretivas (práticas conservacionistas). Portanto, ao reduzir a carga de nutrientes por meio da melhoria do tratamento de esgoto, é reduzida a pressão sobre os recursos hídricos e a necessidade dessas ações mitigadoras.

Por exemplo, Sena et al. (2020) demonstram que os nutrientes apresentam valor econômico significativo, estimado entre US$ 8,41/kg e US$ 30,41/kg de fósforo, além de destacarem que os custos de remediação podem ser bastante onerosos. De forma complementar, Ahmad et al. (2025) estimaram custos ambientais associados à eutrofização da ordem de 3,90 €/kg PO_4^{3-}-eq, reforçando o ganho econômico obtido a partir da redução do aporte de fósforo aos corpos hídricos. Nesse sentido, ao utilizar os custos de conservação do solo como referência, este estudo mensura de forma indireta o custo marginal necessário para evitar ou compensar a descarga de nutrientes.

Essa estratégia amplia o escopo tradicional da valoração econômica ao incorporar uma perspectiva territorial integrada, alinhada ao conceito de gestão de bacias hidrográficas, na qual as interações entre saneamento, uso do solo e qualidade da água devem ser consideradas.

Com base em estudos de disposição a pagar (DAP) e na aplicação de técnicas de transferência de benefícios, estimaram-se ganhos da ordem de R$ 870 mil por ano para o contexto local. O método adotado encontra respaldo em diversos estudos internacionais que utilizam a DAP para mensurar benefícios recreacionais associados à melhoria da qualidade da água. Relatórios aplicados a áreas balneáveis na Escócia, por exemplo, estimam valores médios de aproximadamente £8,90 por visita, evidenciando a relevância econômica da balneabilidade para os usuários. De forma semelhante, Paola et al. (2018) estimaram benefícios recreacionais de projetos de saneamento e reúso de água na ordem de milhões de euros por meio de valoração contingente.

Em relação aos benefícios relacionados à prevenção dos impactos das mudanças climáticas, destaca-se que a parceria em questão estabeleceu metas de redução da pegada de carbono por meio da autogeração energética, com uso de biogás e sistemas fotovoltaicos, bem como pela adoção de tecnologias biológicas para tratamento de esgoto. Como resultado, os benefícios climáticos mensurados foram da ordem de R$ 1.753.275,52, valores esses monetizados por meio do Custo Social do Carbono.

No presente estudo, a adoção de sistemas biológicos aerados resultou em redução estimada de 25 ton CO_2e por ano, o que corresponde a um benefício econômico aproximado de R$ 1,8 milhão anuais. De acordo com Qi e Feng (2025), análises de custo-benefício de políticas climáticas dependem da monetização dos custos do aquecimento global ou dos benefícios associados à sua mitigação, constituindo ferramenta essencial para a tomada de decisão por formuladores de políticas públicas.

Por fim, os resultados obtidos alinham-se à perspectiva apresentada por Maziotis et al. (2025), segundo a qual o setor de tratamento de águas residuárias encontra-se em transição para operações de baixo carbono. Nesse contexto, compreender as implicações econômicas da redução das emissões de gases de efeito estufa em estações de tratamento torna-se fundamental para o planejamento efetivo de estratégias de descarbonização do setor.

O Quadro 6 exibe uma análise comparativa de esforços econômicos de outros setores realizam para reduzir a pegada de carbono em seus processos e instalações.

Quadro 6: Comparativo de esforços de outros setores para reduzir pegada de carbono.

Medidas de equivalência	Valor
Custo de abatimento de carbono equivalente (Termelétrica a gás natural)	R$ 36.222.072,80
Custo de abatimento de carbono equivalente (Termelétrica a carvão natural)	R$ 14.488.829,12
Custo de abatimento de carbono equivalente (Pecuária bovina)	R$ 33.807.267,94
Custo de abatimento de carbono equivalente (Indústria do cimento)	R$ 14.488.829,12
Custo de abatimento de carbono equivalente (Agropecuária brasileira)	R$ 1.448.882,91

A redução estimada de 24.148,05 toneladas de CO_2 equivalente, obtida a partir da melhoria do sistema de esgotamento sanitário, pode ser interpretada em termos dos custos de abatimento de carbono observados em diferentes setores da economia. Essa comparação permite dimensionar o benefício ambiental alcançado, relacionando-o ao esforço financeiro que seria necessário para atingir a mesma mitigação de emissões por outras vias.

Considerando valores médios de referência, o abatimento equivalente alcançado corresponderia a R$ 36,22 milhões caso fosse realizado no setor de termeletricidade a gás natural, R$ 14,49 milhões se comparado às termelétricas a carvão natural, R$ 33,81 milhões no âmbito da pecuária bovina, R$ 14,49 milhões na indústria do cimento e cerca de R$ 1,45 milhão na agropecuária brasileira em geral.

Esses resultados evidenciam que o benefício climático decorrente do uso de outras tecnologias de tratamento de esgoto possui magnitude comparável a setores de alta intensidade de carbono, reforçando o papel do saneamento básico como uma medida complementar de mitigação, sendo uma alternativa que contribui com a descarbonização da economia e com o cumprimento das metas de redução de emissões estabelecidas em políticas climáticas.

Por fim, o Quadro 7 reúne os resultados não monetários dos benefícios ambientais providos pelas melhorias do esgotamento sanitário dos 6 municípios contemplados.

Quadro 7: Benefícios ambientais não monetários provenientes do investimento em esgotamento sanitário sustentáveis.

Indicador	Unidade	Benefício (un.)
Carga poluidora evitada	kg	3.165.616
Fósforo evitado	kg P	43.530
Nitrogênio evitado	kg N	182.593
Sólidos evitados	kg S	364.493
DBO evitada	kg DBO	2.575.000
Economia de oxigênio pela redução de carga orgânica	kg O_2	2.575.000
Produtividade na piscicultura pelo uso de oxigênio economizado	ton peixe	979,83
Remoção de macrófitas como medida compensatória	ton macrófita	973,33
Economia de energia em processos de aeração da água	MWh	822,68
Volume de recurso hídrico liberado para atividades econômicas	piscina olímpica	44.525
Impacto equivalente evitado de dejetos da suinocultura	suíno	3.194
Impacto equivalente evitado de dejetos da bovinocultura	bovino	682
Impacto equivalente evitado de dejetos da piscicultura	kg peixe	572.320
Impacto equivalente evitado de dejetos da avicultura	ave	336
Emissão de CO_2e evitada	ton CO_2e	24.148,05
Área equivalente de vegetação para captura de carbono (pastagens)	hectares	6.371,52
Área equivalente de vegetação para captura de carbono (eucalipto)	hectares	1.341,56
Área de mata ciliar equivalente	hectares	4.507,53
Proteção de águas subterrâneas em volume de esgoto evitado	piscina olímpica	228,43

Os resultados apresentados no Quadro 7 evidenciam os benefícios ambientais decorrentes da melhoria do sistema de esgotamento sanitário, expressos em termos de indicadores físicos da dimensão ambiental. Esses indicadores permitem quantificar a magnitude dos ganhos ambientais alcançados com a redução das cargas poluidoras lançadas aos corpos hídricos e com os efeitos positivos associados à mitigação da poluição.

O principal benefício observado corresponde à carga poluidora total evitada, estimada em 3.165.616 kg, o que representa o somatório das reduções nas frações de matéria orgânica, sólidos suspensos e nutrientes (nitrogênio e fósforo). Esse resultado reflete diretamente a eficiência do tratamento de esgoto e a diminuição do potencial de assoreamento, depleção de oxigênio e eutrofização dos corpos d'água.

Entre os nutrientes, destacam-se o fósforo evitado (43.530 kg P) e o nitrogênio evitado (182.593 kg N), cuja redução contribui para conter o crescimento excessivo de algas e macrófitas aquáticas. A mitigação dessas cargas reduz a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), estimada em 2.575.000 kg DBO, o que representa uma economia equivalente de 2.575.000 kg de oxigênio anteriormente consumido na decomposição da matéria orgânica.

Essa economia de oxigênio pode ser mais bem compreendida quando traduzida em termos de produtividade pesqueira. Considerando que a produção de peixes está diretamente relacionada à disponibilidade de oxigênio dissolvido na água, é possível estimar qual seria a produção potencial associada à quantidade de oxigênio economizada. De acordo com os cálculos realizados, essa economia equivale a uma produtividade de aproximadamente 980 toneladas de peixe.

A redução de fósforo representa também a diminuição da necessidade de medidas compensatórias, como a remoção mecânica de macrófitas aquáticas, estimada em cerca de 973 toneladas. Essas plantas acumulam fósforo em sua biomassa, de modo que o controle de seu crescimento por meio do manejo mecânico seria equivalente ao benefício obtido pela redução desse nutriente.

Outros efeitos relevantes estão associados à economia de energia elétrica em processos artificiais de aeração da água (822,7 MWh) e à liberação de 44.525 piscinas olímpicas de recursos hídricos para usos econômicos, representando um ganho em disponibilidade hídrica.

No contexto das emissões atmosféricas, observa-se uma redução equivalente de 24.148 toneladas de CO_2e, o que corresponde a uma área de vegetação equivalente de aproximadamente 6.371 hectares de pastagens ou 1.342 hectares de eucalipto, considerando a capacidade de sequestro de carbono dessas coberturas vegetais. Além disso, a proteção das águas subterrâneas, associada à diminuição do volume de esgoto lançado sem tratamento, foi estimada em 228 piscinas olímpicas, reforçando o papel do saneamento na preservação dos recursos hídricos subterrâneos.

Considerações finais

Os resultados do estudo demonstram que o investimento de aproximadamente R$ 184 milhões no arranjo territorial fundamentado no Nexo Água–Energia–Inovação gerou retornos socioeconômicos e ambientais. Do ponto de vista econômico, cada real investido retornou R$ 3,16 à economia, totalizando cerca de R$ 581 milhões em benefícios, com geração de mais de 3.300 empregos diretos, indiretos e induzidos, redução de custos com saúde pública e aumento da produtividade do trabalho. Do ponto de vista dos benefícios ambientais, as ações permitiram evitar mais de 3 mil toneladas de DBO, 43,5 toneladas de fósforo e 182,6 toneladas de nitrogênio lançadas no Reservatório de Itaipu, resultando em benefícios monetários anuais superiores a R$ 17 milhões, com destaque para a economia em práticas de conservação do solo e a mitigação das mudanças climáticas.

Além dos ganhos mensurados, o estudo evidencia que esse modelo articulado entre Sanepar, Itaipu Binacional e Itaipu Parquetec é replicável em pequenos e médios municípios brasileiros, contribuindo simultaneamente para o avanço dos ODS 6 (água e saneamento), 3 (saúde), 7 (energia limpa) e 17 (parcerias). A pesquisa também demonstra o papel estratégico do saneamento na proteção da segurança hídrica e energética, uma vez que a redução de nutrientes no reservatório preserva a qualidade da água, bem como a eficiência operacional da usina hidrelétrica de Itaipu e, principalmente, favorece os usos múltiplos da água, contribuindo de forma decisiva para a segurança hídrica. Sob a ótica da universalização do saneamento, os resultados do arranjo interinstitucional aqui abordado demonstram que o cumprimento das metas nacionais não deve ser visto apenas como uma obrigação legal ou um custo social, mas como um investimento de alto retorno para o desenvolvimento territorial. A expansão dos serviços de esgoto para a população no entorno do Reservatório de Itaipu é o caminho mais eficiente para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Sem a universalização, as pressões sobre o corpo hídrico continuam a existir de forma difusa, tornando as soluções pontuais menos eficazes e encarecendo a gestão da segurança hídrica no longo prazo. Por fim, a abordagem metodológica de valoração socioambiental adotada auxilia na fundamentação de critérios técnicos voltados para a formulação de políticas públicas, consolidando o saneamento como vetor estruturante de desenvolvimento territorial sustentável. Ao escalar esse modelo, o Brasil não apenas avança nos indicadores de saúde e dignidade humana, mas também fortalece sua matriz energética e sua competitividade econômica.

Referências bibliográficas

PEARSON, Joanna; MCPHEDRAN, Kate. A literature review of the non-health impacts of sanitation. Waterlines, v. 27, n. 1, p. 48–61, jan. 2008. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24684955>. Acesso em: 22 jan. 2025.

SCRIPTORE, Juliana Souza. Impactos do saneamento sobre saúde e educação: uma análise espacial. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12138/tde-02082016-165540/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FENWICK, Crystal et al. Overview and meta-analysis of global water, sanitation, and hygiene impact evaluations. Washington, DC, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/29856>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ADEGOKE, Hussein Adedoyin; SOLIHU, Habeeb; BILEWU, Solomon Olakunle. Analysis of sanitation and waterborne disease occurrence in Ondo State, Nigeria. Environment, Development and Sustainability, v. 25, p. 11885–11903, 2023. DOI: 10.1007/s10668-022-02558-2.

BORTOLETO, Ana Paula et al. A water-energy nexus analysis to a sustainable transition path for Sao Paulo State, Brazil. Journal of Cleaner Production, v. 319, 128697, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128697.

BROWN, Adrienne R. et al. Governing the nexus: Lessons from water governance in the United States. Environmental Science and Policy, v. 172, 104214, 2025. DOI: 10.1016/j.envsci.2025.104214.

FARJALLA, Vinicius F. et al. Turning water abundance into sustainability in Brazil. Frontiers in Environmental Science, v. 9, 727051, 2021. DOI: 10.3389/fenvs.2021.727051.

HOFMANN, Pascale et al. “So connected yet so distant”: Integrated sanitation action in Campinas to meet the SDGs. Urban Planning, v. 10, 9739, 2025. DOI: 10.17645/up.9739.

HUTTON, Guy; HALLER, Laurence. Evaluation of the costs and benefits of water and sanitation improvements at the global level. Geneva: World Health Organization, 2004. (WHO/SDE/WSH/04.04).

MAZIOTIS, Alexandros et al. The economic impact of reducing greenhouse gas emissions in wastewater treatment plants: An inverse optimization approach. Journal of Industrial Ecology, 2025. DOI: 10.1016/j.indc.2025.101003. (no prelo).

PAOLA, Verlicchi et al. Recreational benefits of a reclaimed water reuse project: A contingent valuation study in Ferrara, Italy. Water, v. 10, n. 7, 908, 2018. DOI: 10.3390/w10070908.

QI, Zhuangzhou; FENG, Rui. Global natural and anthropogenic methane emissions with approaches, potentials, economic costs, and social benefits of reductions: Review and outlook. Journal of Environmental Management, v. 123568, 2025. (no prelo – dados incompletos no arquivo).

RAJENDRAKUMAR, Selvaraj et al. Drivers and barriers towards achieving SDG 6 on clean water and sanitation for all - an Indian perspective. World Development Sustainability, 2025. (no prelo).

HERNÁNDEZ-SANCHO, Francesc; MOLINOS-SENANTE, Maria; SALA-GARRIDO, Ramon. Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: an empirical approach for Spain. Science of the Total Environment, v. 408, p. 953–957, 2010. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.028.

MOLINOS-SENANTE, María; HERNÁNDEZ-SANCHO, Francesc; SALA-GARRIDO, Ramón. Economic feasibility study for wastewater treatment: a cost–benefit analysis. Science of the Total Environment, v. 408, p. 4396–4402, 2010. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.014.

SENA, Madeline et al. An exploration of economic valuation of phosphorus in the environment and its implications in decision making for resource recovery. Water Research, v. 172, 115449, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115449.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Benefícios econômicos da expansão do saneamento no Paraná. São Paulo: Trata Brasil, 2024.

LIED, Eduardo Borges; WENDT, Jéssica Froes de Brito; DUMA, Murilo; BARTIKO, Daniel. Proposta de metodologia para mensuração econômica dos benefícios ambientais da melhoria de pequenos sistemas de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33., 2022, Brasília. Anais eletrônicos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2022. Disponível em: <https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/1101_tema_vi.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2026.

O PAPEL DO MUNICÍPIO E O NOVO MARCO LEGAL SANEAMENTO

1 Ester Luiz de Araújo Grangeiro, 2 Mariana Rodrigues Andrade, 3 Rianny Melo de Farias

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: ester.araujo@ifpb.edu.br; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: mariana-andrade.ma@academico.ifpb.edu.br; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: rianny.melo@academico.ifpb.edu.br

Palavras-chave: saneamento, marco legal, município.

Resumo

O presente estudo teve como objetivo analisar as principais mudanças trazidas pelo novo marco legal para atuação dos municípios brasileiros de acordo com a aprovação do Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei no 14.026/2020), especialmente em relação aos aspectos como titularidade, contratos, concessões, universalização, entre outras. Além do caráter de análise político-institucional, buscou-se realizar uma análise comparativa entre o novo marco legal do saneamento básico e o Marco Legal do Saneamento (Lei 11.445/2007). A comparação com o marco anterior demonstra que, trouxe avanços importantes na definição de metas, na ampliação da segurança jurídica e na indução de investimentos, sobretudo no aspecto da universalização do saneamento básico. Assim, o Novo Marco Legal configura-se como um instrumento potencialmente transformador, cujos resultados estarão diretamente condicionados à capacidade dos municípios de se adaptarem e operarem dentro dessa nova lógica de gestão do saneamento básico no Brasil.

Introdução

As políticas públicas são um conjunto de ações dos governos que tem reflexos na vida dos cidadãos, a formulação, integração e implementação dessas políticas devem buscar amenizar e solucionar questões que comprometem a qualidade de vida das pessoas. Na perspectiva dos municípios, a integração de políticas gera benefícios entre mútuos setores envolvidos, pois as ações desenvolvidas no âmbito de uma política setorial tem potencial de influenciar diretamente outro setor.

No contexto brasileiro, no que se refere às políticas públicas relacionadas ao saneamento no âmbito municipal, a gestão dos recursos hídricos constitui competência da União e dos Estados, conforme estabelecido pela Constituição Federal de 1988. Entretanto, essa gestão exerce influência direta sobre a qualidade ambiental e as condições de vida nos municípios, uma vez que a precariedade dos serviços de saneamento básico pode comprometer a salubridade ambiental e a saúde da população.

A gestão urbana é de competência dos municípios e deve ser conduzida na escala do território municipal. Nesse contexto, inserem-se instrumentos e políticas voltados ao planejamento e ordenamento do uso e ocupação do solo, à mobilidade urbana, à habitação e ao saneamento básico.

No âmbito dos municípios, é importante notar que a gestão do saneamento é diretamente influenciada pela gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica. E que, embora as ações municipais sobre os recursos hídricos encontrem-se voltadas prioritariamente para medidas de saneamento básico, elas se limitam ao *input/output* na bacia hidrográfica, ignorando seus fluxos.

Assim, as escalas apropriadas aos desafios do saneamento, permeiam a definição mais clara nas políticas das questões de articulação do território municipal com a escala de bacia hidrográfica e o envolvimento dos atores de diferentes escalas nos espaços de participação (comitê de bacia, conselho da cidade, câmara de saneamento, entre outros (Grangeiro; Ribeiro; Miranda, 2020).

Nessa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo analisar, sobre a perspectiva do Novo Marco Regulatório, os avanços na atuação dos municípios na gestão dos serviços de saneamento, considerando a implementação das diretrizes do novo marco legal. E buscando responder em que medida o novo marco legal do saneamento redefine a autonomia e as responsabilidades dos municípios na prestação de serviços de saneamento.

Metodologia

O presente trabalho utilizou uma abordagem qualitativa, fundamentada em:

1) Revisão bibliográfica e análise normativa, com o objetivo de examinar as mudanças institucionais e regulatórias no setor de saneamento básico no Brasil, na perspectiva da identificação da dinâmica das responsabilidades dos municípios no âmbito do saneamento no Brasil.
2) Definição da base legal que orientou o estudo, com destaque para o Marco Legal do Saneamento (Brasil, 2007), posteriormente atualizada pela Novo Marco Legal do Saneamento (Brasil, 2020). Também foi considerada as diretrizes estabelecidas pelo Decreto nº 10.710/2021, que regulamenta os prazos e metas para a universalização dos serviços.
3) Pesquisa qualitativa desenvolvida com base em revisão de literatura especializada, incluindo artigos acadêmicos e documentos institucionais, para compreensão do aparato jurídico-institucionais do setor de saneamento no Brasil.
4) Análise comparativa da atuação prevista no âmbito municipal sob a vigência da Lei nº 11.445/2007 e as alterações introduzidas pelo Novo Marco Legal (Lei nº 14.026/2020), com o intuito de identificar avanços, desafios e implicações práticas na atuação dos municípios no tocante aos serviços de saneamento básico.

Resultados e Discussão

Legislações e Políticas de Saneamento no Brasil

Em 1968, com a intensificação do processo de urbanização brasileiro, iniciou-se a organização dos serviços de saneamento básico no Brasil com o advento do PLANASA (Plano Nacional de Saneamento).

O PLANASA teve como principal objetivo a construção de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário e desenvolvimento industrial do país. Naquele momento, as atenções foram voltadas a regionalização dos serviços no âmbito de cada estado, criando companhias estaduais de saneamento onde boa parte dos municípios brasileiros adotou esse modelo.

Durante o período de atuação do PLANASA, os serviços e a cobertura do saneamento no Brasil foram ampliados, no entanto, essa ampliação aconteceu de forma desigual em dois sentidos: 1) os investimentos foram principalmente para o abastecimento de água, deixando o esgotamento sanitário em segundo plano; e 2) foram priorizadas as áreas com as principais plataformas de desenvolvimento industrial.

O legado do processo ocorrido durante a implementação do PLANASA é destacado no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2012) pois o reflexo dessas ações ainda interfere nas questões atuais dos serviços de Saneamento no Brasil. É afirmado que a lógica do PLANASA, que privilegiava os investimentos em abastecimento de água, sobretudo nas regiões onde os municípios concederam os serviços às companhias estaduais, instituiu problemas ainda crônicos para o setor.

Os serviços de esgotamento sanitário, apesar de constarem do escopo da concessão, eram em geral prestados pelos municípios, sem amparo no planejamento e na institucionalização dessa atividade. A gestão dos resíduos sólidos, omitida da agenda nacional desde o PLANASA, sempre esteve sob responsabilidade municipal, implementada por secretarias de serviços públicos e em menor número, sob a forma de autarquias.

A drenagem urbana, quase sempre tratada como um serviço complementar das secretarias municipais de obras, fora restringida a redes e condutos coletores de águas pluviais, ainda hoje sem a necessária articulação com a dinâmica urbana de uso e ocupação do solo.

Após a extinção do PLANASA, com o cenário de instabilidade política e econômica do país aliada a fragilidade institucional do período (década de 80), houve uma significativa queda na qualidade dos serviços de saneamento no Brasil. Entretanto, com a publicação da Constituição Federal de 1988, no seu Artigo 30, o saneamento ganha espaço quando é atribuída ao município a organização e prestação, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, dos serviços públicos de interesse local (Brasil, 1988), entre eles os serviços de saneamento e, consequentemente, a responsabilidade pela formulação de uma política municipal de saneamento básico.

Em 2007, com a aprovação da Lei no 11.445 – Política Federal de Saneamento Básico, que trata das diretrizes nacionais para o saneamento básico, o país passou a contar com um novo marco legal para o setor de saneamento, após quase duas décadas de uma lacuna política-institucional.

O Marco Legal do Saneamento, estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico e contemplou diversos instrumentos de gestão e políticas para o desenvolvimento do saneamento básico do Brasil. O instrumento legal buscou a integralidade do serviço e a universalização bem como trouxe importantes elementos de gestão, como as agências, os contratos de programas, o controle social e o planejamento. Tratando-se dos aspectos de regulação contratual, a referida Lei 11.445/2007, também destacou itens importantes, consoante as disposições dos arts. 8º, 10 e 11. O art. 10 do marco de 2007, dispôs sobre "a prestação de serviços públicos de saneamento básico por entidade que não integre a administração do titular depende da celebração de contrato, sendo vedada a sua disciplina mediante convênios, termos de parceria ou outros instrumentos de natureza precária".

Em julho de 2020, um novo Marco Legal do Saneamento foi aprovado no Brasil, através da Lei 14.026/2020, que atualizou o marco legal do saneamento básico e alterou a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, entre outras modificações.

A Lei no 14.026/2020 fixou prazos para a universalização dos serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. Estabeleceu também que os contratos de prestação dos serviços públicos de saneamento básico deverão definir metas de universalização que garantam o atendimento de 99% da população com água potável e de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033 (BRASIL, 2020).

A atualização do Marco Legal do Saneamento Básico teve por objetivo uniformizar o ambiente regulatório nacional, adicionar segurança jurídica aos contratos para prestação dos serviços e atrair investimentos privados para o setor como novas alternativas de financiamento com vistas a criar condições e mecanismos para universalização dos serviços de saneamento no país (Série Saneamento – Caderno Temático n.7, 2025). De forma esquemática, na Figura 01 são apresentadas as principais alterações da lei, destacando os pontos chave que contribuirão para transformação do setor de saneamento básico no Brasil.

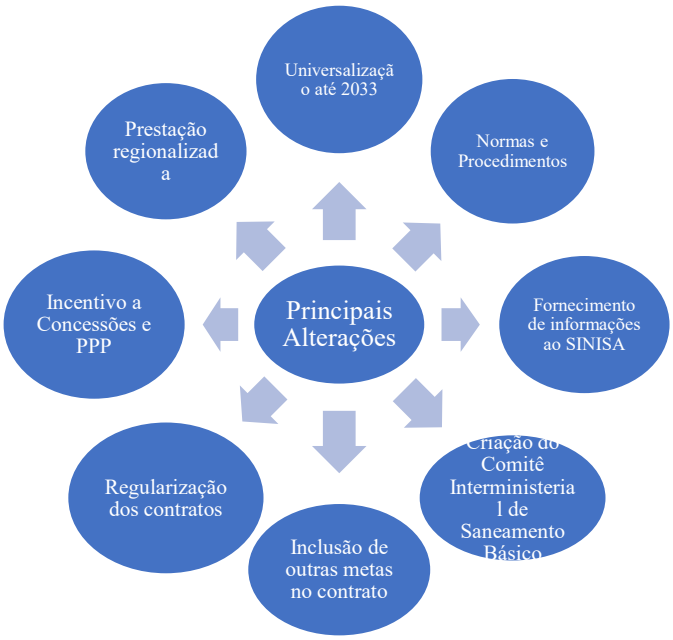


Figura 01: Principais alterações trazidas pela Lei 14.026/2020.
Fonte: Adaptado de Série Saneamento – Caderno Temático n.7 (2025); Brasil (2020).

É importante notar que para promover a coordenação e a integração das políticas e ações relacionadas ao saneamento básico em nível nacional, foi a criado o Comitê Interministerial de Saneamento Básico (CISB), conforme o art. 53-A (Brasil, 2020) da nova lei. Por meio do diálogo e da cooperação entre diferentes órgãos e ministérios, busca-se impulsionar avanços sólidos e sustentáveis no setor. Além de que, o novo marco regulatório, estabelece que os contratos de prestação de serviços devem conter, além das metas de universalização, metas qualitativas, a exemplo de metas de expansão, de redução de perdas na distribuição de água tratada, de qualidade, de eficiência e de uso racional da água, da energia e de outros recursos naturais, do reuso de efluentes sanitários e do aproveitamento de águas de chuva.

Atuação dos municípios: Lei 11.445/2007 e Lei 14.026/2020

A Lei no 14.026/2020 modificou significativamente o arranjo institucional da política de saneamento básico no país, estabelecendo prazos para a universalização de vários serviços, a exemplo do abastecimento de água e esgotamento sanitário, bem como para a destinação final dos resíduos sólidos. Para isso, o novo marco legal optou pelo incentivo à abertura do mercado para a iniciativa privada, rompendo com o predomínio, até então reinante, das companhias estaduais de saneamento na execução dos serviços. Nesse contexto, a nova lei alterou o modelo de contratualização e concessões administrativas, não mais sendo possível aos municípios, sem prévia licitação, realizar novas concessões aos Estados, nem celebrar contrato de programa com empresas estatais de outra Unidade Federativa. A nova lei passou a exigir, ainda, a padronização mínima dos contratos a serem firmados, além de regras mais precisas sobre as condições de sustentabilidade e equilíbrio econômico-financeiro (Leite; Moita Neto; Bezerra, 2022).

No Quadro 01, são apresentadas as principais mudanças na atuação dos municípios quando realizada uma análise comparativa entre o Marco Legal do Saneamento (Lei 11.445/2007) e o Novo Marco Legal do Saneamento (Lei 14.026/2020).

Quadro 01: Quadro comparativo das principais mudanças na atuação dos municípios.

Requisito	Lei 11.445/2007 (Marco Legal)	Lei 14.026/2020 (Novo Marco)
Titularidade dos serviços	Reconhece os municípios como titulares dos serviços de saneamento básico.	Mantém a titularidade municipal, mas reforça a necessidade de atuação regionalizada (blocos, microrregiões).
Autonomia municipal	Alta autonomia para organizar, prestar e contratar serviços (inclusive com empresas estaduais, sem licitação obrigatória em alguns casos).	Autonomia relativizada: municípios devem se adequar à regionalização e às normas nacionais da ANA.
Prestação dos serviços	Permitia contratos de programa com companhias estaduais, sem licitação.	Extingue novos contratos de programa; exige licitação para concessões, incentivando participação privada.
Regionalização	Facultativa, dependia de iniciativa dos entes federativos.	Torna a regionalização praticamente obrigatória para acesso a recursos federais.

Planejamento (PMSB)	Municípios devem elaborar Planos Municipais de Saneamento Básico.	Mantém a exigência, mas condiciona acesso a recursos e validade à compatibilidade com metas nacionais e regionalização.
Regulação	Regulação descentralizada, muitas vezes local ou estadual, sem padrão nacional forte.	Fortalece a regulação nacional pela ANA (normas de referência), reduzindo heterogeneidade regulatória.
Metas de universalização	Não havia metas nacionais rígidas com prazos definidos.	Estabelece metas obrigatórias (até 2033: 99% água potável, 90% esgoto), impactando diretamente os municípios.
Capacidade econômico-financeira	Não havia exigência rigorosa para comprovação.	Municípios devem comprovar viabilidade econômico-financeira dos contratos e operadores.
Acesso a recursos federais	Mais flexível, sem exigência forte de regionalização.	Condicionado à regionalização, metas e comprovação de sustentabilidade econômico-financeira
Controle e governança	Menor padronização nacional; maior diversidade local.	Maior padronização e controle, com redução da liberdade de atuação municipal isolada.

Fonte: Elaborado a partir da Lei 11.445/2007 e Lei 14.026/2020.

O Novo Marco Legal do Saneamento, introduziu uma série de mudanças na gestão e competências dos municípios, entre as principais está a descentralização das competências, conferindo aos municípios um papel mais proeminente na gestão e prestação dos serviços de saneamento. Isso significa que, em muitos aspectos, a responsabilidade pela formulação e execução de políticas e a prestação de serviços de saneamento foi transferida para o âmbito municipal (Melo e Pardo, 2023). Os autores destacam que os municípios são os principais responsáveis pela gestão das águas, esgoto e resíduos sólidos em seus territórios, isso representa uma mudança significativa em relação à legislação anterior, que permitia uma maior intervenção dos estados e empresas estatais na prestação desses serviços.

Outra importante mudança estabelecida pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei no 14.026/2020) foi a alteração imposta ao modelo de contratualização e concessões administrativas, que historicamente, foi conduzido por meio de empresas estaduais (empresas públicas ou sociedades de economia mista). No entanto, a Lei no 14.026/2020, ao modificar a Lei no 11.445/2007, alterou profundamente o regime de concessão e contratação da execução da política de saneamento básico. pela nova norma não mais será possível aos municípios, sem prévia licitação, realizar novas concessões aos Estados-membros nem celebrar contrato de programa com os entes estaduais ou empresas estatais de outra unidade federativa. Embora que, o permissivo legal para que os contratos de concessão e os contratos de programa para prestação dos serviços públicos de saneamento básico existentes na data de publicação da Lei no 14.026/2020 vigorem até o advento do seu termo contratual (BRASIL, 2020; Leite; Moita Neto; Bezerra, 2022).

No aspecto da universalização do saneamento básico, o Novo Marco Legal do Saneamento Básico consolidou mudanças significativas para impulsionar o setor. A lei estabeleceu que todas as localidades brasileiras devem atender a 99% da população com abastecimento de água e 90% com esgotamento sanitário até 2033. Visto que, no Brasil, a situação atual é precária pois cerca de 32 milhões de brasileiros vivem sem acesso à água potável e mais de 90 milhões não têm coleta de esgoto (Trata Brasil, 2024).

Quanto a prestação regionalizada, o Novo Marco Legal do Saneamento (Art. 3º), há o entendimento de que é caracterizada pelo exercício integrado da titularidade em região, cujo território abranja mais de um Município, podendo ser estruturada das seguintes formas (Trata Brasil, 2023):

• Região Metropolitana: unidade regional instituída pelos Estados, mediante lei complementar, sendo compulsória a adesão de municípios cuja prestação se configure como de interesse comum;

• Unidade Regional de saneamento básico: unidade regional instituída pelos Estados, mediante lei complementar, sendo facultativa a adesão dos titulares;

• Bloco de Referência: agrupamento de Municípios, não necessariamente limítrofes, estabelecido pela União, formado por meio de gestão associada voluntária dos titulares.

Vale destacar que o Art. 8º do Novo Marco Legal do Saneamento afirma que no caso de interesse local, os Municípios e o Distrito Federal exercem a titularidade dos serviços; já nos casos de prestação regionalizada, a titularidade é exercida pela estrutura de governança interfederativa instituída, que pode ser, por exemplo, o órgão colegiado da Região Metropolitana. O artigo prevê que o exercício da titularidade poderá ser realizado por gestão associada, mediante consórcios públicos ou convênios de cooperação (Trata Brasil, 2023).

A necessidade de regularização dos contratos vigentes, mediante comprovação da capacidade econômico-financeira dos prestadores públicos dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário, como estabelecido no art. 10-B do Marco Legal, foi outra alteração importante para atuação dos municípios. A regularização dos contratos é essencial para garantir uma gestão sólida e responsável na prestação dos serviços. Isso promove a transparência e a confiabilidade nas relações contratuais, assegurando a continuidade e a qualidade dos serviços prestados à população. A legislação também estabeleceu, via Decreto nº 11.598/2023, a metodologia e os critérios para que os prestadores de serviços públicos de abastecimento de água potável e de

esgotamento sanitário comprovem a capacidade econômico-financeira para cumprir as metas de universalização. Tal metodologia aplicou-se aos prestadores de serviços que operam por meio de contrato de programa e/ou contrato de concessão, desde que neste não houvesse a previsão das metas de universalização (Série Saneamento – Caderno Temático n.7, 2025).

Considerações Finais

As análises desenvolvidas evidenciam que o Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) promoveu uma reconfiguração significativa no papel dos municípios, mantendo sua titularidade sobre os serviços, porém redefinindo os limites de sua autonomia. A exigência de regionalização, a padronização regulatória e a obrigatoriedade de metas de universalização introduzem um modelo mais estruturado e coordenado nacionalmente, ao mesmo tempo em que condicionam o acesso a recursos e a viabilidade das ações municipais ao cumprimento dessas diretrizes.

Além disso, o novo marco inclui a exigência de licitação para concessões e inclui a participação da iniciativa privada, alterando profundamente a dinâmica historicamente centrada nas companhias estaduais. Essa mudança impõe aos municípios novos desafios institucionais, técnicos e financeiros, especialmente no que se refere à comprovação da sustentabilidade econômico-financeira dos contratos e à capacidade de planejamento alinhado às metas nacionais. Ao mesmo tempo, cria oportunidades para ampliação de investimentos e maior eficiência na prestação dos serviços, desde que haja adequada capacidade de regulação e governança.

Por fim, conclui-se que a efetividade do Novo Marco Legal depende diretamente da capacidade dos municípios de se adaptarem a esse novo arranjo institucional, articulando-se em escala regional e fortalecendo seus instrumentos de planejamento e gestão. A integração entre políticas públicas, especialmente entre saneamento, gestão de recursos hídricos e ordenamento territorial, torna-se ainda mais essencial para garantir a universalização dos serviços. Assim, embora o novo marco represente um avanço em termos de diretrizes e metas, sua implementação bem-sucedida exigirá coordenação federativa, fortalecimento institucional e participação ativa dos diversos atores envolvidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB) pelo incentivo e apoio financeiro através do Edital PRPIPG nº 05/2026/PRPIPG para que a presente pesquisa fosse desenvolvida.

Referências Bibliográficas

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasil, 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/ConstituicaoCompilado.htm. Acesso em: 01 de maio 2026.

BRASIL. *Lei no 14.026, de 15 de julho de 2020*. Novo Marco Legal do Saneamento Básico. Brasil, 2020. Disponível em: http://www.planalto. gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm. Acesso em: 01 de março de 2026.

BRASIL. *Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007*. Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico. Brasil, 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov. br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 01 março 2026.

Grangeiro, E. L. A.; Ribeiro, M. M. R.; Miranda, L. I. B. Integração de políticas públicas no Brasil: o caso dos setores de recursos hídricos, urbano e saneamento. Cad. Metrop., São Paulo, v. 22, n. 48, pp. 417-434, 2020.

Leite, C.H.P.; Moita Neto, J.M.; Bezerra, A.K.L. Novo marco legal do saneamento básico: alterações e perspectivas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.27 n.5. pp.1041-1047. 2022.

Melo, J. P. L. M de.; Pardo, A. F. de J. Análise do novo marco legal do saneamento básico Lei 14.026/2020. *International Seven Multidisciplinary Journal*. v.2, n.5, pp. 1172-1191, 2023.

Série Saneamento – Caderno Temático n. 7. Atualização do marco legal do saneamento: Um panorama das principais alterações segundo a Lei nº 14.026/2020. 2025.

Trata Brasil. Estudo sobre os avanços do Novo Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil de 2021. Disponível: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/06/Estudo-Completo-Avancos-do-Novo-Marco-Legal-do-Saneamento-Basico-no-Brasil-%E2%80%93-2023-SNIS-2021-V1.pdf Acesso em: 02 de maio de 2023.

Trata Brasil. Estudo sobre os avanços do Novo Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil de 2024. Disponível: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/07/Estudo-da-GO-Associados-Novo-Marco-2024-Versao-Limpa.pdf. Acesso em: 02 de maio de 2026.

GOVERNANÇA HÍDRICA E CONFLITOS POR ÁGUA COMO DETERMINANTES DA VIABILIDADE DE REÚSO NA MINERAÇÃO

1 João Pedro Machado de Lima, 2 Miriam Cristina Santos Amaral
1 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: jpedro_mdl@hotmail.com; 2 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: miriam@desa.ufmg.br

Palavras-chave: Reúso de água em cenários de conflitos; Mineração sustentável; Mitigação de impactos na mineração.

Resumo

O estudo investiga de forma integrada como a maturidade regulatória e a intensidade dos conflitos de uso da água influenciam a viabilidade do reúso de água no setor mineral. Partindo da constatação de que a escassez hídrica e a expansão da mineração intensificam disputas entre usos produtivos e necessidades básicas, propõe-se um modelo analítico estruturado a partir de duas dimensões centrais: governança institucional e dinâmica de conflitos. A partir de um levantamento semissistemático de marcos regulatórios internacionais e da análise qualitativa de contextos de conflito, os cenários são classificados em diferentes níveis de viabilidade, permitindo identificar padrões globais e limitações estruturais. Os resultados indicam que a adoção do reúso não depende exclusivamente de fatores técnicos ou econômicos, mas também está fortemente condicionada à capacidade institucional de regular, priorizar e mediar o uso da água. Contextos com alta maturidade regulatória e baixa competição apresentam elevada viabilidade, enquanto lacunas normativas associadas a conflitos intensos configuram barreiras críticas à implementação. Além disso, cenários intermediários evidenciam que melhorias na governança podem deslocar sistemas de baixa para maior viabilidade, reforçando o papel estratégico das políticas públicas. O modelo proposto contribui para a compreensão das interações entre água, mineração e sociedade, oferecendo suporte analítico à tomada de decisão e ao planejamento de soluções sustentáveis em contextos de crescente pressão hídrica.

Introdução

A disponibilidade hídrica é discutida constantemente dentro do meio técnico, porém tem ultrapassado barreiras, chegando a atingir as esferas políticas e, até mesmo, moradores de zonas mais afastadas dos grandes núcleos. Isso se dá, em especial, pelo fato de que mesmo essas áreas mais distantes estão recebendo variados empreendimentos industriais ao longo do tempo, os quais competem fortemente com os nativos pelo recurso natural. Um tipo de indústria que costuma instalar-se em áreas remotas é a mineração, não pela localização menos disputada, mas sim pela rigidez locacional dos minerais (Toro et al., 2022).

Os conflitos entre empresas mineradoras e comunidades têm se intensificado em escala global, extrapolando a dimensão ambiental e alcançando esferas críticas como governança, responsabilidade social e direitos fundamentais, entre eles, o acesso à água. Em muitos casos, tais conflitos evoluem de tensões localizadas para crises operacionais severas, podendo resultar desde a paralisação parcial até o encerramento definitivo das atividades minerárias. Nesse contexto, o ambiente social consolida-se como um indicador determinante da viabilidade das operações, refletindo o grau de aceitação das empresas nos territórios em que atuam (De Lima; Amaral; De Lima, 2025).

A crescente centralidade da dimensão social no desempenho do setor mineral é sintetizada no conceito de Licença Social para Operar (LSO), que expressa o nível de legitimidade e confiança conferido pela sociedade às atividades de uma empresa (Moffat et al., 2016). Mais do que um requisito legal, a LSO configura-se como um ativo estratégico, cuja obtenção depende da capacidade das empresas em estabelecer relações transparentes com as comunidades e demonstrar uma gestão responsável dos recursos naturais. Nesse sentido, a água emerge como elemento central, não apenas por seu papel operacional, mas por seu valor social, ambiental e simbólico, especialmente em regiões sujeitas à escassez hídrica (Saenz; Ostos, 2021).

Paralelamente, a transição energética global tem intensificado a demanda por minerais estratégicos, como lítio, cobalto, níquel e terras raras, essenciais para tecnologias de baixo carbono, incluindo baterias para veículos elétricos, turbinas eólicas e sistemas fotovoltaicos. Esse movimento tem impulsionado a expansão da mineração. Como evidência, a produção global de lítio atingiu cerca de 130.000 toneladas métricas em 2022, representando um aumento superior a 20.000 toneladas em relação ao ano anterior (Filipenco, 2023). Esse crescimento, no entanto, ocorre em um cenário de crescente restrição hídrica, ampliando a pressão sobre recursos já disputados. Cada tonelada de lítio requer cerca de 2 milhões de litros de água. Como exemplo, 65% do abastecimento de água do Salar de Atacama do Chile é dedicado à produção de lítio e de outros concentrados minerais, deixando uma lacuna no acesso à água para as comunidades que ali vivem, especialmente os agricultores locais (UNCTAD, 2020).

Embora, em termos agregados, o consumo de água pela mineração represente uma fração relativamente pequena da demanda nacional, entre 2,0% e 4,0% em países como Austrália, Chile e África do Sul (Meißner, 2021), e aproximadamente 2% no Brasil em 2020 (ANA; IBRAM, 2024); sua relevância se intensifica em escala local. Em bacias hidrográficas com disponibilidade limitada, a presença de operações minerárias pode agravar a competição com usos essenciais, como abastecimento humano, agricultura e manutenção de ecossistemas, tornando a gestão da água um elemento crítico para a estabilidade social e operacional.

Nesse contexto, o reúso de efluentes tratados surge como uma alternativa estratégica para reduzir a dependência de fontes convencionais e mitigar conflitos entre usuários. No entanto, sua adoção não é determinada exclusivamente por fatores técnicos ou econômicos. A viabilidade do reúso está intrinsecamente condicionada à capacidade institucional de regular, priorizar e mediar o uso da água, especialmente em cenários onde múltiplos interesses coexistem e competem.

Diante disso, torna-se evidente que os conflitos de uso da água não são apenas consequência da escassez hídrica, mas também reflexo de lacunas ou fragilidades nos marcos regulatórios. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar de que forma a maturidade regulatória influencia a ocorrência e a intensidade de conflitos de uso da água em bacias hidrográficas, com ênfase nas implicações para a adoção do reúso de efluentes no setor mineral. Ao fazê-lo, busca-se evidenciar o papel estruturante da governança hídrica na mitigação de conflitos e na promoção de soluções mais sustentáveis e socialmente aceitáveis para a gestão dos recursos hídricos.

Material e Métodos

Este estudo adota uma abordagem qualitativa comparativa, estruturada a partir de um método de Tomada de Decisão de Múltiplos-Critérios (TDMC; *Multi-Criteria Decision-Making – MCDM* em inglês), amplamente utilizado em gestão ambiental devido à sua capacidade de lidar com problemas complexos, multifatoriais e associados a elevados níveis de incerteza (Najafi et al., 2025). A aplicação desse tipo de abordagem é particularmente adequada ao contexto da gestão hídrica em mineração, onde decisões envolvem múltiplas dimensões interdependentes.

- **Levantamento e análise de marcos regulatórios**

A identificação dos marcos regulatórios foi conduzida por meio de uma abordagem de escopo semissistemático, com o objetivo de capturar a diversidade de políticas globais relacionadas ao reúso de água em contextos industriais e minerários. A busca foi realizada entre janeiro e março de 2026, sem restrição temporal, de modo a garantir um mapeamento abrangente tanto de normativas históricas quanto contemporâneas.

Como principal fonte de dados, foi utilizada a base FAOLEX (FAOLEX, 2026), que reúne documentos legais organizados por temas relacionados à gestão de recursos naturais, incluindo reúso de água. Adicionalmente, para determinados países, as informações foram complementadas com a ferramenta REUSExplorer, desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), que disponibiliza dados detalhados sobre regulamentações e especificações de uso final para água de reúso (USEPA, 2024).

A partir desse levantamento, os países e regiões analisados foram classificados de acordo com o nível de maturidade de seus marcos regulatórios, considerando a existência, clareza e aplicabilidade de normas voltadas ao reúso de água. Essa classificação constituiu a base para a análise comparativa desenvolvida neste estudo.

- **Maturidade regulatória e classificação de conflitos**

Foi realizada uma análise comparativa entre diferentes contextos geográficos, considerando dois eixos principais: (i) maturidade regulatória e (ii) intensidade de conflitos de uso da água.

A maturidade regulatória foi avaliada com base na existência, clareza e aplicabilidade de normas relacionadas ao reúso de água. Válido destacar que foi verificado se a normativa cita reúso de água ou efluente tratado em agricultura e indústria ou mineração. O uso agrícola é considerado aqui como representativo de pequenos produtores que dependem diretamente da água para sua subsistência. Já o uso industrial (incluindo atividades como resfriamento de caldeiras, supressão de poeira e controle de incêndios) foi adotado como proxy para aplicações não processuais na mineração, diferenciando-se dos usos técnicos diretamente ligados ao beneficiamento mineral, como flotação e preparo de reagentes. Foi utilizada uma escala ordinal para tal:

- **1 (Alta):** regulamentação clara, específica e aplicável ao reúso industrial – a normativa cita agricultura E indústria/mineração;
- **0,5 (Média):** regulamentação parcial ou genérica – a normativa cita agricultura OU indústria/mineração;
- **0 (Baixa):** ausência ou ambiguidade regulatória - a normativa não cita agricultura nem indústria/mineração.

A intensidade dos conflitos foi definida qualitativamente com base na presença de competição entre usos e na criticidade das demandas envolvidas, à seguinte maneira, também em escala ordinal:

- **1:** ausência ou baixa competição significativa;
- **0,5:** conflitos pontuais ou parcialmente gerenciáveis;
- **0:** competição direta entre usos essenciais (ex.: agricultura, abastecimento e mineração).

Essa abordagem permitiu identificar padrões e relações entre governança hídrica e ocorrência de conflitos, sem a necessidade de dados quantitativos extensivos, mas mantendo consistência analítica.

- **Aplicação analítica e construção de cenários**

Para operacionalizar o sistema proposto, foram desenvolvidos cenários representativos baseados nos contextos regulatórios e hidrológicos identificados nos países. Esses cenários refletem diferentes combinações de maturidade institucional, disponibilidade hídrica e competição entre usos, permitindo explorar como tais fatores influenciam a viabilidade do reúso de água na mineração.

A classificação final dos cenários (Viabilidade de aplicação – Va) foi realizada pela interpretação dos conflitos de uso associados a cada cenário, reforçando a relação entre governança e alocação de recursos hídricos. O resultado final de cada cenário se dá por meio de uma soma das notas aplicadas a cada categoria, considerando que ambas possuem o mesmo peso na nota final. O formato de cálculo se deu pela Equação (01).

$$Va = Mr + Ic \quad (01)$$

Onde: *Va* = Viabilidade de aplicação de reúso; *Mr* = Maturidade regulatória e *Ic* = Intensidade de conflitos

- **Síntese analítica e limitações do método**

A combinação entre levantamento regulatório, existência de conflitos e análise de cenários permitiu avaliar, de forma integrada, como diferentes níveis de maturidade institucional influenciam a dinâmica de conflitos em bacias hidrográficas. Essa abordagem possibilita não apenas identificar padrões, mas também compreender os mecanismos pelos quais lacunas regulatórias contribuem para a intensificação de disputas pelo uso da água. A aplicação do método permitiu estruturar três classes principais de cenários:

- Alta viabilidade (Va = 1,5–2): Contextos com elevada maturidade regulatória e baixos níveis de conflito. Nesses casos, o reúso é institucionalmente viável e socialmente aceitável, sendo favorecido por mecanismos claros de alocação de água. Exemplos incluem países com políticas consolidadas de reúso e planejamento hídrico integrado.
- Viabilidade condicionada (Va = 0,5–1,5): Contextos caracterizados por lacunas regulatórias significativas ou conflitos elevados. Nesses casos, mesmo que o reúso seja tecnicamente viável, sua implementação encontra barreiras institucionais e sociais relevantes.
- Baixa viabilidade (Va < 0,5): Cenários com baixa maturidade regulatória e altos níveis de conflito. A ausência de governança eficaz, associada à competição direta por recursos essenciais, impede a adoção do reúso como estratégia sustentável. Esse cenário é frequentemente observado em regiões onde comunidades dependem diretamente da água para subsistência e não há mecanismos claros de priorização.

Apesar da consistência da abordagem proposta, algumas limitações devem ser consideradas: (i) a análise baseia-se em classificação qualitativa e ordinal, o que implica simplificações e pode não capturar integralmente a complexidade dos contextos locais; (ii) avaliação da maturidade regulatória depende de fontes secundárias, sujeitas a lacunas ou desatualizações; (iii) a ausência de validação empírica com estudos de caso limita a generalização dos resultados; e (iv) o modelo adota pesos iguais entre as dimensões e incorpora fatores sociais de forma indireta, indicando oportunidades para aprimoramentos futuros.

Resultados e Discussão

A análise conduzida neste estudo evidencia que a maturidade regulatória e a intensidade dos conflitos de uso da água atuam de forma conjunta na definição dos limites e oportunidades para implementação do reúso, permitindo identificar padrões consistentes entre diferentes contextos geográficos. Esses resultados reforçam a premissa de que a governança hídrica exerce papel estruturante, não apenas como elemento normativo, mas como mecanismo ativo de mediação entre demandas concorrentes. Nesse sentido, os resultados são apresentados de forma integrada em três eixos complementares. Inicialmente, discute-se a maturidade regulatória, destacando padrões globais, lacunas normativas e sua relação com a aplicabilidade do reúso. Em seguida, analisa-se a relação entre conflitos de uso da água e atividades minerárias, evidenciando como a competição por recursos intensifica tensões sociais e limita a adoção de soluções alternativas. Por fim, apresenta-se a aplicação do método proposto, na qual os diferentes contextos são sistematizados em cenários de viabilidade, permitindo traduzir a complexidade observada em uma estrutura analítica orientada à tomada de decisão.

- **Maturidade regulatória e padrões globais de reúso de água na mineração**

A análise dos marcos regulatórios evidencia que o reúso de água é uma prática amplamente reconhecida em nível global, porém caracterizada por elevada heterogeneidade em termos de escopo, detalhamento técnico e aplicabilidade setorial. A regulamentação do reúso tem sido historicamente motivada por preocupações relacionadas à proteção ambiental e à saúde humana, sendo a definição de padrões mínimos de qualidade da água o principal instrumento de controle, posteriormente complementado por planos, diretrizes e programas voltados à implementação prática.

Historicamente, a evolução regulatória demonstra que o reúso não é uma estratégia recente, tendo seus primeiros registros formais em 1918, na Califórnia (U.S. Environmental Protection Agency, 2012), seguido por regulamentações estaduais nos Estados Unidos e, posteriormente, pela consolidação de diretrizes internacionais, como aquelas desenvolvidas pela Organização Mundial da Saúde para reúso agrícola (Shoushtarian; Negahban-Azar, 2020). Esses instrumentos iniciais desempenharam papel fundamental na difusão e estruturação de políticas nacionais (Vidotti et al., 2024).

Atualmente, observa-se um esforço internacional de padronização, exemplificado pela atuação da *International Organization for Standardization* (ISO), por meio do comitê ISO/TC 282, responsável pela normatização do reúso em diferentes contextos, incluindo aplicações industriais, enquanto o ISO/TC 82/SC 7 aborda aspectos relacionados à mineração sustentável (International Organization of Standardization, 2025). No entanto, apesar desses avanços, a padronização permanece parcial e não necessariamente adaptada às especificidades dos processos minerários.

A análise dos dados compilados evidencia um padrão consistente: a maioria das regulamentações nacionais e supranacionais prioriza o reúso para irrigação agrícola, enquanto aplicações industriais e, particularmente, minerárias; são tratadas de forma genérica ou pouco detalhada. Esse comportamento é claramente observado no caso da União Europeia, onde o Regulamento (EU) 2020/741 estabelece requisitos mínimos para reúso, mas concentra-se predominantemente na irrigação agrícola, com ausência de diretrizes técnicas específicas para usos industriais (European Commission, 2020; European Parliament and of the Council, 2022).

De forma semelhante, mesmo em países com estruturas regulatórias mais desenvolvidas, como Portugal, onde o Decreto-Lei nº 119/2019 permite o reúso de água tratada inclusive em contextos industriais, a operacionalização desse uso ainda depende de interpretações complementares e adaptações locais (Presidency of the Council of Ministers, 2019). De modo similar, na Espanha, o Decreto Real 1620/2007 representou uma evolução na reutilização de águas residuais, estabelecendo regulamentações, padrões de qualidade e usos autorizados em cinco setores: urbano, agrícola, industrial, recreativo e ambiental. O Guia de Aplicação do Decreto de 2010 forneceu instruções detalhadas sobre a manutenção dos padrões e a promoção da reutilização adequada. O Real Decreto 1085/2024 atualizou o marco regulatório para aprimorar a segurança, a proteção ambiental e sanitária, apoiar a economia circular e incluir a reutilização industrial no conceito mais amplo de recirculação de água (Ministerio de la Presidencia, 2007, 2024).

Países com alta escassez hídrica, como Israel e Jordânia, apresentam estruturas mais integradas e maduras, nas quais o reúso é incorporado como elemento central da estratégia de segurança hídrica, com forte alinhamento institucional e planejamento de longo prazo (Arlosoroff, 2007; Ministry of Health, 2023; Tarawneh et al., 2024). Singapura, por sua vez, implementou a reutilização de águas residuais municipais tratadas para fins industriais não potáveis através de seu sistema avançado de tratamento conhecido como NEWater (PUB, 2022).

Por outro lado, contextos com maior disponibilidade hídrica, como o Brasil, tendem a apresentar menor desenvolvimento regulatório, com normativas mais genéricas (ex.: Resolução CNRH nº 54/2005) e ausência de critérios específicos para aplicações industriais, o que reduz a capacidade de direcionamento e implementação prática do reúso. Esse padrão reforça a relação entre estresse hídrico e maturidade regulatória, já identificada na literatura, na qual o reúso deixa de ser uma medida complementar e passa a constituir um instrumento estrutural de gestão em regiões críticas.

De maneira geral, os resultados indicam que, embora exista convergência quanto ao reconhecimento do reúso como estratégia para aumento da segurança hídrica e promoção da economia circular, persistem lacunas significativas relacionadas à fragmentação regulatória, à ausência de padronização para usos industriais e à limitada integração entre requisitos legais e necessidades operacionais. Essa desarticulação gera incertezas para os agentes envolvidos e limita a escalabilidade de soluções tecnicamente viáveis;

Nesse contexto, a variabilidade observada entre países e regulamentações justifica a adoção de uma abordagem estruturada baseada em níveis de maturidade regulatória, conforme apresentado na metodologia. A ausência de critérios específicos para reúso industrial e minerário, identificada na literatura, constitui um fator crítico que influencia diretamente a classificação de viabilidade dos cenários, podendo configurar uma restrição estrutural independentemente das condições técnicas ou econômicas.

Assim, a maturidade regulatória não apenas define as condições formais de implementação do reúso, mas também atua como elemento estruturante na mediação de conflitos e na viabilidade prática de integração entre setores, reforçando seu papel central na análise proposta.

- **Relação entre maturidade regulatória e conflitos de uso da água**

Como dito anteriormente, os conflitos entre empresas mineradoras e comunidades têm se intensificado em escala global, abrangendo múltiplas dimensões, incluindo aspectos de acesso a direitos fundamentais, como a água (De Lima; Amaral; De Lima, 2025). A pressão sobre os recursos hídricos constitui um dos principais vetores desses conflitos, especialmente em regiões onde a disponibilidade de água é limitada. De acordo com o *World Resources Institute*, aproximadamente 16% das minas, depósitos e distritos de minerais críticos estão localizados em áreas com alto estresse hídrico (World Resources Institute, 2024). Nesses contextos, a relação entre mineração e comunidades torna-se particularmente sensível, uma vez que a água assume funções distintas e, muitas vezes, conflitantes: enquanto a atividade minerária depende desse recurso como insumo produtivo, as populações locais o utilizam como base para subsistência e manutenção de suas atividades econômicas (De Lima; Amaral; De Lima, 2025).

O caso do Salar de Atacama, no Chile, ilustra de forma emblemática essa dinâmica. A alocação de água para a produção de lítio e outros minerais tem reduzido a disponibilidade hídrica para comunidades locais, especialmente agricultores e criadores tradicionais. Como consequência, populações indígenas, incluindo produtores de quinoa e criadores de lhamas, têm sido forçadas a migrar, abandonando territórios e práticas culturais historicamente consolidadas (UNCTAD, 2020). Esse processo evidencia como a distribuição desigual de recursos pode gerar impactos sociais profundos, que vão além da dimensão econômica.

Ainda no Chile, observa-se uma concentração significativa do consumo hídrico da mineração na região de Antofagasta, localizada no deserto do Atacama, a área mais árida do país. Aproximadamente 51% do consumo nacional de água pelo setor mineral ocorre nessa região (Cisternas; Gálvez, 2018), onde a demanda hídrica supera a disponibilidade em 22,1 m^3/s, enquanto na região de Atacama esse déficit é de 14,8 m^3/s (Herrera-Leon, 2019). Esse desequilíbrio estrutural intensifica os conflitos entre empresas e comunidades locais, uma vez que múltiplos usuários competem por um recurso escasso.

Situação semelhante é observada no Peru, um dos principais produtores mundiais de cobre. Nesse país, a escassez hídrica em regiões ricas em recursos minerais tem dificultado a obtenção da LSO por parte das empresas mineradoras. Projetos localizados em áreas como Conga, Las Bambas e Tía Maria enfrentam forte oposição social, em grande parte devido a disputas relacionadas à alocação de água (Fraser; Kunz, 2018). Além disso, conforme discutido por Bebbington; Bury, (2009) , a ausência de alinhamento entre concessões minerárias e instrumentos de planejamento territorial e hídrico, bem como a falta de consulta prévia às populações locais; apesar dos compromissos assumidos pelo país no âmbito da Convenção 169 da Organização Internacional do Trabalho; contribuem para aprofundar os conflitos e ampliar a percepção de injustiça na distribuição dos recursos.

Evidências empíricas em escala global reforçam essa interpretação. Jiménez; Molina; Le Deunff, (2015) demonstrou que projetos de mineração e de infraestrutura hidrelétrica estão entre aqueles com maior propensão a gerar conflitos relacionados ao uso da água por populações indígenas, sendo responsáveis por mudanças significativas tanto na qualidade quanto na disponibilidade hídrica. Segundo os autores, a maior parte dos casos identificados ocorre na América Latina (48%), seguida pela Ásia (25%), indicando a forte concentração desses conflitos em regiões em desenvolvimento, onde a dependência direta dos recursos naturais é mais acentuada. Cao (2023) avaliou 266 operações minerárias com conflitos registrados e verificou que 64% delas apresentam níveis de risco hídrico superiores ao médio, incluindo 56 projetos classificados como de alto risco e 9 como de risco extremamente elevado. Esses resultados sugerem que a escassez e a insegurança hídrica atuam como fatores críticos na intensificação de disputas entre mineração e comunidades.

Sob a perspectiva socioeconômica, os impactos da mineração sobre comunidades rurais frequentemente extrapolam a dimensão ambiental, afetando diretamente as condições de vida locais. Entre os principais efeitos observados estão a desestruturação social, o aumento do custo de vida, a pressão sobre recursos naturais, especialmente a água; e a introdução de novos riscos à saúde (Al Rawashdeh; Campbell; Titi, 2016). Em contextos de escassez hídrica, como na Jordânia, o processamento de fosfato demanda volumes significativos de água, agravando a competição por recursos limitados e gerando impactos adicionais sobre a paisagem e a geomorfologia local (Al Rawashdeh; Campbell; Titi, 2016).

Askham; Van der Poll, (2017) apresentaram dois exemplos em que a limitação hídrica atuou também como fator restritivo direto à atividade minerária na África do Sul. Por exemplo, a escassez de água impediu a exploração de uma rica jazida de platina na província de Limpopo pela empresa Anglo American. Na mesma região, onde se concentram cerca de 40% das reservas de carvão do país, a disponibilidade hídrica é apontada como principal obstáculo à expansão da mineração e à geração de energia, evidenciando como a água pode se tornar um fator limitante tanto para o desenvolvimento econômico quanto para a segurança energética (Askham; Van der Poll, 2017).

No Brasil, embora o contexto institucional seja distinto, observa-se dinâmica semelhante em regiões específicas. Estudos empíricos reforçam essa dinâmica em diferentes regiões do país. Pereira et al., (2016) analisaram comunidades rurais dos municípios de Alvorada de Minas, Conceição do Mato Dentro e Dom Joaquim, impactadas pelo empreendimento Minas-Rio, da empresa Anglo American. O projeto, voltado à extração de minério de ferro e ao transporte por mineroduto até o porto de São João da Barra (RJ), inicialmente associado a expectativas de valorização das populações tradicionais por meio de políticas de desenvolvimento regional, acabou gerando tensões e conflitos socioambientais significativos. Nesse contexto, a sobreposição entre demandas produtivas e modos de vida locais evidencia como grandes empreendimentos minerários podem reconfigurar o uso e o acesso aos recursos naturais, intensificando disputas territoriais e hídricas (Pereira et al., 2016). No Vale do Jequitinhonha, em Minas Gerais, a expansão da mineração de lítio tem gerado impactos socioambientais significativos sobre comunidades locais. Desde 2020, moradores da região enfrentam restrições severas de acesso à água, dispondo, em períodos de estiagem, de aproximadamente 2.000 litros por família ao mês para consumo doméstico (Lopes de Souza, 2024). Em contraste, autorizações de uso concedidas para atividades minerárias, como no caso da empresa Sigma na região de Itinga, atingem volumes da ordem de 100 milhões de litros por mês, conforme consta na outorga de captação do empreendimento emitida pela Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019). Essa assimetria evidencia a desigualdade na alocação dos recursos hídricos e reforça a percepção de conflito entre usos produtivos e necessidades básicas.

De forma geral, os casos analisados indicam que os conflitos de uso da água não são apenas resultado da escassez física, mas também de falhas nos mecanismos de governança e alocação. A ausência de critérios claros de priorização, a fragmentação institucional e a limitada integração entre planejamento hídrico e atividades econômicas contribuem para a intensificação dessas disputas. Nesse sentido, os resultados desta seção reforçam diretamente os achados relacionados à maturidade regulatória apresentados anteriormente. Contextos com menor desenvolvimento institucional tendem a apresentar maior intensidade de conflitos, não necessariamente por maior escassez absoluta, mas pela incapacidade de mediar e equilibrar os diferentes usos da água. Essa relação evidencia o papel estruturante da governança hídrica, consolidando-a como dimensão central no framework MCDM proposto e como elemento crítico para a viabilidade do reúso de água na mineração.

- **Aplicação do método proposto e implicações para tomada de decisão**

A aplicação do método proposto em cenários representativos permite ilustrar, de forma prática, como a combinação entre maturidade regulatória e intensidade de conflitos influencia a viabilidade do reúso de água na mineração. A Tabela 1 apresenta quatro cenários baseados em contextos reais discutidos ao longo deste estudo.

Cenário	Contexto representativo	Mr	Ic	Va	Classificação	Interpretação
1	País com alta escassez hídrica e forte governança (ex.: Israel / Singapura)	1	1	2	Alta viabilidade	Estrutura regulatória robusta permite mediação eficiente dos usos, viabilizando o reúso mesmo sob escassez
2	Região mineradora com regulação intermediária e conflitos moderados (ex.: partes do Brasil / Peru)	0,5	0,5	1	Viabilidade condicionada	Reúso tecnicamente viável, porém limitado por conflitos sociais e ausência de diretrizes específicas
3	Região semiárida com alta pressão hídrica e conflitos intensos (ex.: Atacama – Chile)	0,5	0	0,5	Viabilidade condicionada	Apesar de alguma estrutura regulatória, a competição direta com comunidades reduz

Cenário	Contexto representativo	Mr	Ic	Va	Classificação	Interpretação
						a viabilidade operacional
4	Região com baixa regulação e forte dependência comunitária da água (ex.: Vale do Jequitinhonha – Brasil)	0	0	0	Baixa viabilidade prática	Ausência de governança associada a conflitos estruturais inviabiliza o reúso como solução sustentável

Tabela 1 Classificação da viabilidade de reúso de água em cenários representativos de mineração.
Nota: Mr - Maturidade regulatória / Ic - Intensidade de conflitos / Va – Viabilidade de aplicação.

Observa-se que cenários com níveis semelhantes de pontuação final (Va) podem apresentar interpretações distintas, evidenciando que a simples soma dos fatores não captura integralmente a complexidade dos contextos. Em especial, cenários com conflitos elevados tendem a apresentar limitações operacionais mais severas, mesmo quando há algum nível de estrutura regulatória, reforçando o papel crítico da governança na mediação do uso da água.

De modo geral, a aplicação do modelo aos contextos analisados revela padrões consistentes. Regiões como Israel e Singapura (Cenário 1), caracterizadas por alta maturidade regulatória, tendem a apresentar maior viabilidade para reúso, mesmo sob condições de escassez hídrica, que intensifica conflitos. Por outro lado, países como Brasil (partes) e Peru, embora possuam potencial técnico para adoção do reúso (Cenário 2), enfrentam limitações associadas à fragmentação regulatória e à intensidade dos conflitos. No caso do Salar de Atacama (Cenário 3) indicam que a alta pressão hídrica, que resulta em conflitos intensos por uso, atrelados a média ou baixa existência de normativas específicas resultam, no máximo, em uma viabilidade condicionada, porém com muitos outros fatores a serem avaliados.

Casos como o do Vale do Jequitinhonha (Cenário 4) ilustram cenários de baixa viabilidade, nos quais a elevada pressão sobre os recursos hídricos, combinada à ausência de mecanismos eficazes de governança, resulta em conflitos estruturais que dificultam a implementação de soluções baseadas em reúso. Nesses contextos, o modelo evidencia que intervenções técnicas isoladas são insuficientes, sendo necessária a reestruturação dos arranjos institucionais.

Por outro lado, a análise também demonstra que a presença de conflitos não implica necessariamente inviabilidade, desde que existam mecanismos regulatórios capazes de mediar e redistribuir o uso da água. Isso reforça a ideia de que a governança atua como variável-chave na conversão de cenários críticos em oportunidades de gestão sustentável.

A operacionalização do modelo evidencia que a viabilidade do reúso não é determinada isoladamente por condições técnicas ou pela disponibilidade hídrica, mas emerge da interação entre governança institucional e competição entre usos. Nesse sentido, mesmo em regiões com elevada escassez hídrica, onde o reúso seria, em princípio, mais necessário; a ausência de marcos regulatórios claros e a presença de conflitos intensos podem inviabilizar sua implementação.

A Figura 1 sintetiza o modelo proposto ao posicionar a viabilidade do reúso como resultado da interação entre maturidade regulatória (Mr) e intensidade de conflitos (Ic), ambos orientados positivamente. Observa-se que cenários de alta viabilidade emergem quando há simultaneamente estruturas institucionais consolidadas e baixa competição por recursos hídricos, refletindo contextos onde o reúso é não apenas tecnicamente possível, mas também social e politicamente legitimado. Em contraste, regiões com baixa viabilidade combinam fragilidade regulatória e competição direta por água, evidenciando limitações estruturais que inviabilizam a implementação.

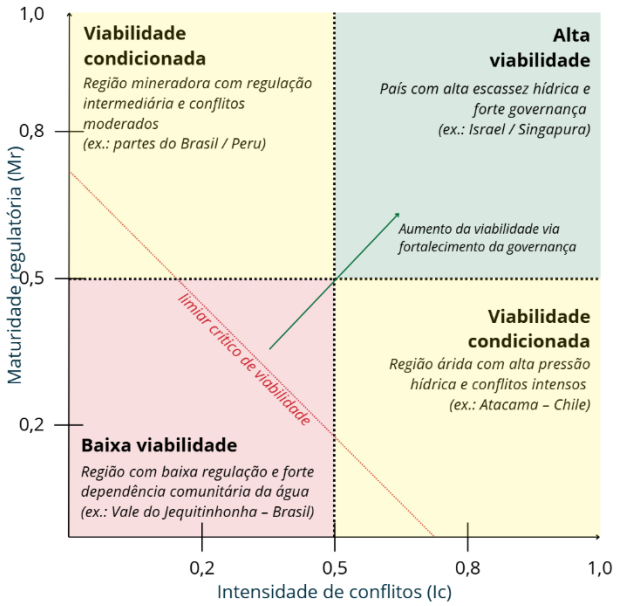


Figura 1 - Relação entre maturidade regulatória e intensidade de conflitos na definição da viabilidade do reúso de água na mineração
Fonte: Autores (2026).

Os quadrantes intermediários, classificados como **viabilidade condicionada**, reforçam o argumento central do estudo: a viabilidade do reúso não depende exclusivamente de fatores técnicos, mas é fortemente mediada por governança e dinâmica de uso da água. O limiar crítico destacado indica a transição entre contextos onde o reúso pode ser promovido como solução estratégica e aqueles onde intervenções institucionais são pré-requisito. Assim, a figura operacionaliza o framework MCDM proposto, conectando diretamente os achados sobre maturidade regulatória e conflitos discutidos nas seções anteriores e evidenciando o papel estruturante da governança na mitigação de disputas e na promoção do reúso em sistemas minerários.

Considerações Finais

Os resultados deste estudo demonstram que a viabilidade do reúso de água na mineração não pode ser compreendida exclusivamente a partir de critérios técnicos ou econômicos, sendo fortemente condicionada pela maturidade regulatória e pela intensidade dos conflitos de uso da água. A análise comparativa evidenciou que contextos com maior desenvolvimento institucional apresentam maior capacidade de mediar interesses concorrentes e viabilizar soluções baseadas em reúso, mesmo sob condições de escassez hídrica. Por outro lado, em regiões marcadas por fragilidades regulatórias e elevada competição por recursos essenciais, o reúso tende a enfrentar barreiras estruturais que limitam sua implementação, independentemente de sua viabilidade técnica. Nesse sentido, o método proposto contribui ao oferecer uma abordagem integrada e operacionalizável para análise de cenários, permitindo avançar na compreensão das interações entre governança, conflito e gestão hídrica no setor mineral.

Apesar dessas contribuições, o estudo apresenta limitações que abrem oportunidades relevantes para pesquisas futuras. A natureza qualitativa e ordinal do modelo, embora adequada para análises comparativas iniciais, pode ser aprimorada por meio da incorporação de métodos quantitativos, como abordagens probabilísticas, capazes de capturar melhor as incertezas inerentes aos contextos analisados. Além disso, a dependência de fontes secundárias para avaliação da maturidade regulatória e a ausência de validação empírica com estudos de caso indicam a necessidade de aplicações futuras em contextos reais, de modo a calibrar e testar a robustez do modelo. A adoção de pesos diferenciados entre critérios, bem como a incorporação explícita de variáveis sociais, como licença social para operar, percepção de risco e aspectos distributivos, também representam caminhos promissores para o refinamento da abordagem. Assim, o presente trabalho deve ser compreendido como uma base conceitual estruturada, cuja consolidação como ferramenta de apoio à decisão depende de avanços metodológicos e aplicações empíricas futuras.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Brasil), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Brasil), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AL RAWASHDEH, Rami; CAMPBELL, Gary; TITI, Awwad. The socio-economic impacts of mining on local communities: The case of Jordan. **The Extractive Industries and Society**, v. 3, n. 2, p. 494–507, abr. 2016.

ANA. **OUTORGA Nº 43, DE 14 DE JANEIRO DE 2019**, 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/arquivos/resolucoes/2019/Outorgas/0043-2019_Outorga_de_Direito_de_Uso.pdf?111302>. Acesso em: 01/05/2026

ANA; IBRAM. **Perspectivas e avanços da gestão de recursos hídricos na mineração**. Brasília/DF: *[S.n.]*. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/page/2/#publication>. Acesso em: 20/02/2026.

ARLOSOROFF, S. **Wastewater Reuse - Risk Assessment, Decision-Making and Environmental Security**. 1st. ed.: Springer Nature, 2007.

ASKHAM, Theresa M.; VAN DER POLL, Huibrecht M. Water Sustainability of Selected Mining Companies in South Africa. **Sustainability**, v. 9, n. 6, p. 957, 2017.

BEBBINGTON, Anthony J.; BURY, Jeffrey T. Institutional challenges for mining and sustainability in Peru. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 41, p. 17296–17301, 2009.

CAO, Y. **IMPLICATIONS OF CHINESE OVERSEAS MINING OPERATIONS FOR COMMUNITY-LEVEL SOCIAL CONFLICTS**. *[S.l.]*: Northern Arizona University, maio 2023.

CISTERNAS, Luis A.; GÁLVEZ, Edelmira D. The use of seawater in mining. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 39, n. 1, p. 18–33, 2018.

DE LIMA, João Pedro Machado; AMARAL, Miriam Cristina Santos; DE LIMA, Sonaly Cristina Rezende Borges. Sustainable water management in the mining industry: Paving the way for the future. **Journal of Water Process Engineering**, v. 71, p. 107239, mar. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe**. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF>. Acesso em: 22/01/2026.

EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. **Commission Notice 2022/C 298/01**. **Official Journal of the European Union**, 2022.

FAOLEX. **Aqualex**. Disponível em: <https://aqualex.fao.org/>. Acesso em: 7/04/2026.

FILIPENCO, D. **Five major lithium-producing countries in the world**. Disponível em: <https://www.developmentaid.org/news-stream/post/170661/five-major-lithium-producing-countries>. Acesso em: 6/05/2026.

FRASER, Jocelyn; KUNZ, Nadja C. Water Stewardship: Attributes of Collaborative Partnerships between Mining Companies and Communities. **Water**, v. 10, n. 8, p. 1081, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **ISO Technical Committees**. , 2025. Disponível em: <https://www.iso.org/technical-committees.html>. Acesso em: 16/03/2025

JIMÉNEZ, A.; MOLINA, M. F.; LE DEUNFF, H. Indigenous Peoples and Industry Water Users: Mapping the Conflicts Worldwide. **Aquatic Procedia**, v. 5, p. 69–80, out. 2015.

LOPES DE SOUZA, Lauanda. "Lítio Verde" no Vale do Jequitinhonha: ressurgência de discursos desenvolvimentistas e disputas internacionais. **Revista Mutirõ. Folhetim de Geografias Agrárias do Sul**, v. 4, n. 3, p. 221–244, 13 mar. 2024.

MEISSNER, Simon. The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities—A GIS-Based Water Impact Assessment. **Resources**, v. 10, n. 12, p. 120, 26 nov. 2021.

MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA. **Real Decree 1620 / 2007, of December 7**. Spain, 7 dez. 2007.

MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA. **Real Decreto 1085/2024, de 22 de octubre**. **Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes**Spain, 22 out. 2024. Disponível em: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2024/BOE-A-2024-21701-consolidado.pdf>. Acesso em: 22/02/2025

MINISTRY OF HEALTH. **Sewage and Treated Wastewater**. Disponível em: <https://www.gov.il/en/pages/reclaimed-water-pages?chapterIndex=2>. Acesso em: 1 set. 2025.

MOFFAT, Kieren *et al.* The social licence to operate: a critical review. **Forestry**, v. 89, n. 5, p. 477–488, set. 2016.

NAJAFI, Hessam *et al.* Advancing group decision-making in sustainable water resource management: a Z-number enhanced framework for wastewater reuse. **Journal of Hydrology**, v. 663, p. 134256, dez. 2025.

PEREIRA, V. G. *et al.* O Potencial da Agricultura Familiar das Comunidades Rurais Atingidas pela Mineração nos Municípios de Alvorada de Minas, Conceição do Mato Dentro e Dom Joaquim: os entraves para o desenvolvimento rural em bases sustentáveis. *In*: Diamantina: 2016.

PRESIDENCY OF THE COUNCIL OF MINISTERS. **Decree-Law nº. 119/2019, of August 21**. Portugal, 21 ago. 2019. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/119-2019-124097549>. Acesso em: 22/01/2026

PUB. **NEWater**. Disponível em: <https://www.pub.gov.sg/Public/WaterLoop/OurWaterStory/NEWater>. Acesso em: 30/03/2026.

SAENZ, C.; OSTOS, J. Making or breaking social license to operate in the mining industry: Factors of the main drivers of social conflict. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123640, jan. 2021.

SHOUSHTARIAN, Farshid; NEGAHBAN-AZAR, Masoud. Worldwide Regulations and Guidelines for Agricultural Water Reuse: A Critical Review. **Water**, v. 12, n. 4, p. 971, 2020.

TARAWNEH, Anwar *et al.* Assessing acceptance of treated wastewater reuse in Jordan: A study of knowledge and preferences. **Desalination and Water Treatment**, v. 317, p. 100030, jan. 2024.

TORO, Norman *et al.* Use of Alternative Water Resources in Copper Leaching Processes in Chilean Mining Industry—A Review. **Metals**, v. 12, n. 3, p. 445, 2022.

UNCTAD. Commodities at a glance: Special issue on strategic battery raw materials. 2020.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for water reuse**. Washington, D.C. : *[S.n.]*. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>. Acesso em: 8/2/2026.

USEPA. **Regulations and End-Use Specifications Explorer (REUSExplorer)**. Disponível em: <https://www.epa.gov/waterreuse/regulations-and-end-use-specifications-explorer-reusexplorer)>. Acesso em: 7/4/2026.

VIDOTTI, Débora Beatriz Maia *et al.* A qualitative risk assessment model for water reuse: Risks related to agricultural irrigation in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 931, p. 172965, jun. 2024.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **More Critical Minerals Mining Could Strain Water Supplies in Stressed Regions: Freshwater**. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/critical-minerals-mining-water-impacts#:~:15/03/2026.

UNIVERSALIZAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL: TENDÊNCIAS, INVESTIMENTOS E DESAFIOS À LUZ DO MARCO LEGAL E DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

1 Matheus Zangerólame Tarôco, 2 Carlos Henrique Ribeiro Lima

1 Universidade de Brasília (UnB), Faculdade de Tecnologia (FT), PTARH-UnB, Brasília, Brasil, e-mail: matheustaroco@gmail.com; 2 Universidade de Brasília (UnB), Faculdade de Tecnologia (FT), PTARH-UnB, Brasília, Brasil, e-mail: chrlima@unb.br

Palavras-chave: Marco Legal do Saneamento; Objetivos de Desenvolvimento Sustentável; SNIS.

Resumo

O acesso aos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário constitui condição essencial para a saúde pública, a dignidade humana e a sustentabilidade ambiental. No Brasil, persistem desigualdades regionais na oferta desses serviços, o que impõe desafios ao cumprimento das metas de universalização estabelecidas pelo Marco Legal do Saneamento e pelo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6. Este estudo analisou a evolução dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil entre 2016 e 2022, com ênfase na expansão da infraestrutura, nas ligações, na população urbana atendida, nos investimentos realizados e na adesão municipal ao sistema nacional de informações do setor. A metodologia adotada foi quantitativa e descritiva, com base em séries temporais regionais expressas em variação percentual em relação ao ano-base de 2016. Os resultados indicaram inflexões positivas a partir de 2020, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, sugerindo aceleração recente na expansão da infraestrutura e dos investimentos. Contudo, a base analisada privilegia os sistemas organizados de prestação dos serviços, não contemplando de forma plena soluções individuais, especialmente no esgotamento sanitário, o que impõe cautela à interpretação dos resultados e restringe análises mais abrangentes sobre o acesso efetivo aos serviços. Conclui-se que, embora haja sinais de avanço, persistem limitações estruturais e informacionais que dificultam avaliar se a trajetória recente do setor é suficiente para assegurar o cumprimento das metas de universalização nos prazos estabelecidos. Os achados podem subsidiar o planejamento setorial, o monitoramento regulatório e a formulação de políticas públicas orientadas à redução das disparidades regionais.

Introdução

O acesso aos serviços de abastecimento de água potável e esgotamento sanitário constitui condição essencial para a promoção da saúde pública, da dignidade humana e da sustentabilidade ambiental. No plano internacional, o reconhecimento da água e do saneamento como direitos humanos pela Assembleia Geral das Nações Unidas, em 2010, consolidou a compreensão de que seu provimento adequado é indispensável à realização de outros direitos fundamentais e deve ocorrer com atenção prioritária às populações mais vulneráveis e às desigualdades persistentes (ONU, 2010; WHO; UNICEF, 2021).

No Brasil, entretanto, a universalização desses serviços ainda é marcada por déficits históricos e por assimetrias territoriais significativas. As desigualdades regionais permanecem como um dos principais entraves à expansão homogênea da cobertura, com carências mais acentuadas em áreas historicamente menos atendidas e em territórios socialmente vulneráveis. A literatura também indica que, embora o setor tenha experimentado avanços institucionais relevantes nas últimas décadas, os resultados obtidos nem sempre dialogaram adequadamente com o perfil dos déficits existentes, o que reforça a necessidade de análises empíricas sobre a trajetória recente dos serviços no país (BORJA, 2014; PAGANINI; BOCCHIGLIERI, 2021; RODRIGUES; VENSON; CAMARA, 2019).

A partir de 2003, a política nacional de saneamento passou por um novo ciclo institucional, marcado pela criação do Ministério das Cidades e, posteriormente, pela promulgação da Lei nº 11.445/2007, que redefiniu as diretrizes do setor e recolocou o planejamento em posição central. Esse processo buscou superar parte da fragmentação institucional anterior e fortalecer a articulação entre planejamento, regulação e investimento, ainda que persistissem limitações estruturais na capacidade estatal e na efetividade dos instrumentos adotados (BORJA, 2014).

Mais recentemente, a Lei nº 14.026/2020 atualizou o Marco Legal do Saneamento Básico e reafirmou a universalização como objetivo estruturante do setor, estabelecendo metas segundo as quais, até 31 de dezembro de 2033, 99% da população deve ter acesso à água potável e 90% à coleta e ao tratamento de esgoto. A nova legislação também reforçou a regionalização da prestação, a regulação setorial e a indução a investimentos, em um contexto no qual a expansão dos serviços continua condicionada por desigualdades territoriais, capacidade institucional e necessidades diferenciadas de atendimento entre estados e municípios (BRASIL, 2020; PAGANINI; BOCCHIGLIERI, 2021).

Essas metas dialogam diretamente com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6, que deslocou o monitoramento internacional de uma lógica centrada apenas na existência de infraestrutura para uma abordagem orientada por níveis de serviço, segurança, qualidade e equidade no acesso. Nesse sentido, o desafio da universalização não se resume à ampliação formal da cobertura, mas exige aceleração do progresso, redução das desigualdades e aprimoramento dos instrumentos de monitoramento utilizados para avaliar o desempenho do setor (BAIN et al., 2018; GINÉ-GARRIGA et al., 2017; DICKIN; GABRIELSSON, 2023).

No plano informacional, a consolidação de bases nacionais de dados assumiu papel estratégico para o planejamento, a regulação e a avaliação das políticas públicas de saneamento. O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) consolidou-se como a principal base nacional para acompanhamento da prestação dos serviços, tendo realizado sua última coleta em 2023. A partir de 2024, o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA) passou a operar como sucessor institucional do sistema anterior, incorporando novos módulos, maior detalhamento das informações e novas possibilidades de monitoramento setorial (BRASIL, 2025).

Diante desse cenário, este estudo analisa a evolução dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil entre 2016 e 2022, com ênfase na expansão da infraestrutura, no atendimento da população urbana, nos investimentos realizados e na adesão municipal ao sistema nacional de informações do setor. Busca-se, assim, examinar se a trajetória recente observada sinaliza avanços em direção às metas de universalização e discutir os principais limites desse processo à luz das disparidades regionais ainda presentes no país.

Material e Métodos

Esta seção apresenta a caracterização da pesquisa, a fonte de dados, a delimitação espacial e temporal, os indicadores selecionados, os procedimentos de análise e as limitações do estudo.

Caracterização da pesquisa e fonte de dados

Este estudo adota uma abordagem quantitativa e descritiva, com base na análise de dados secundários de caráter administrativo e setorial, com o objetivo de examinar a evolução dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil. A base empírica utilizada é composta por dados históricos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), sucedidos institucionalmente, a partir de 2024, pelo Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), sob gestão do Ministério das Cidades.

Delimitação espacial e temporal

O recorte temporal compreende o período de 2016 a 2022, permitindo comparar a trajetória dos indicadores antes e após a promulgação do Novo Marco Legal do Saneamento Básico. A delimitação espacial abrange as cinco grandes regiões brasileiras, sendo a análise concentrada principalmente nas áreas urbanas, em razão da maior completude e consistência dos dados disponíveis para o período investigado.

Seleção de indicadores e procedimentos de análise

Foram selecionados indicadores relativos à infraestrutura, ao atendimento e aos investimentos nos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário. No eixo de infraestrutura, utilizaram-se a extensão da rede de água (AG005) e a extensão da rede de esgoto (ES004). No eixo de atendimento, utilizaram-se a quantidade de ligações de água (AG021), a quantidade de ligações de esgoto (ES002) e a população urbana atendida com abastecimento de água (AG026) e com esgotamento sanitário (ES026). No eixo de investimentos, foram considerados os valores realizados pelo prestador, pelo município e pelo estado para ambos os serviços (FN023, FN042, FN052, FN024, FN043 e FN053).

Para fins analíticos, parte desses indicadores foi agregada, de modo a construir medidas sintéticas da expansão regional dos sistemas. Assim, as extensões de rede de água e esgoto foram somadas para representar a expansão geral da infraestrutura; as ligações de água e esgoto foram agregadas como medida sintética de evolução do atendimento; e os investimentos dos diferentes entes e serviços foram consolidados em uma medida única de investimento realizado. A análise de tendências foi desenvolvida por meio de séries temporais regionais, expressando a variação percentual anual dos indicadores em relação ao ano-base de 2016.

Adicionalmente, a adesão municipal ao sistema nacional de informações foi considerada como variável complementar de análise, sendo mensurada pelo número de municípios com informações reportadas em cada ano e região.

Limitações do estudo

Reconhecem-se limitações inerentes ao caráter autodeclaratório das informações fornecidas pelas prestadoras, o que pode afetar a comparabilidade e a qualidade dos dados ao longo do período analisado. Adicionalmente, a base utilizada privilegia os sistemas organizados de prestação dos serviços, não contemplando de forma plena soluções individuais, especialmente no esgotamento sanitário, como fossas sépticas e outras alternativas locais. Desse modo, os resultados devem ser interpretados com cautela, pois os indicadores analisados não esgotam todas as formas de acesso efetivo aos serviços no território brasileiro.

Resultados e Discussão

Evolução da infraestrutura e do atendimento dos serviços

A análise da evolução dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil, entre 2016 e 2022, evidencia comportamentos regionais distintos, com intensidades diferenciadas de expansão da infraestrutura e do atendimento. Para essa etapa, foram consideradas três agregações de indicadores: extensão das redes de abastecimento de água e esgotamento sanitário (AG005 + ES004), ligações de água e esgoto (AG021 + ES002) e população urbana atendida (AG026 + ES026), todas expressas em crescimento percentual em relação ao ano-base de 2016.

No caso da infraestrutura – que teve como proxy a extensão de redes (Figura 1) - os maiores incrementos ocorreram nas regiões com menor cobertura histórica, especialmente Norte e Nordeste. A região Norte apresentou aceleração mais intensa a partir de 2020, alcançando crescimento acumulado de 56,48% em 2022, enquanto o Nordeste atingiu 47,40% no mesmo ano. Nas demais regiões, o comportamento foi mais estável, com variações compatíveis com sistemas já mais consolidados e com menor espaço relativo para expansão acelerada.

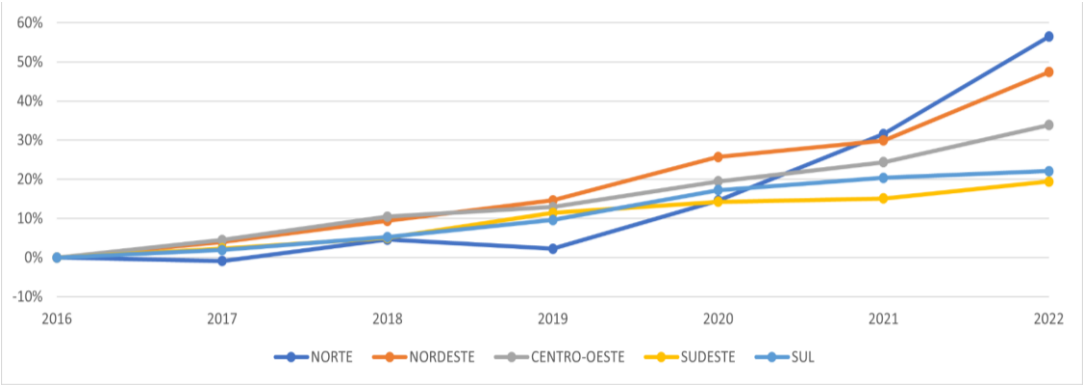


Figura 1: Extensão de Redes – Crescimento Percentual em Relação a 2016.

A evolução das ligações ativas reforça a leitura anterior, conforme mostrado na Figura 2. A região Norte se destacou ao longo da série novamente, saindo de 6,87% em 2017 para 45,71% em 2022. Nas demais regiões, o crescimento foi mais moderado, mas ainda assim positivo, sugerindo avanço gradual da incorporação de usuários aos sistemas existentes. Em termos analíticos, esse comportamento indica que a expansão física das redes foi acompanhada, em alguma medida, por ampliação da capacidade de atendimento efetivo.

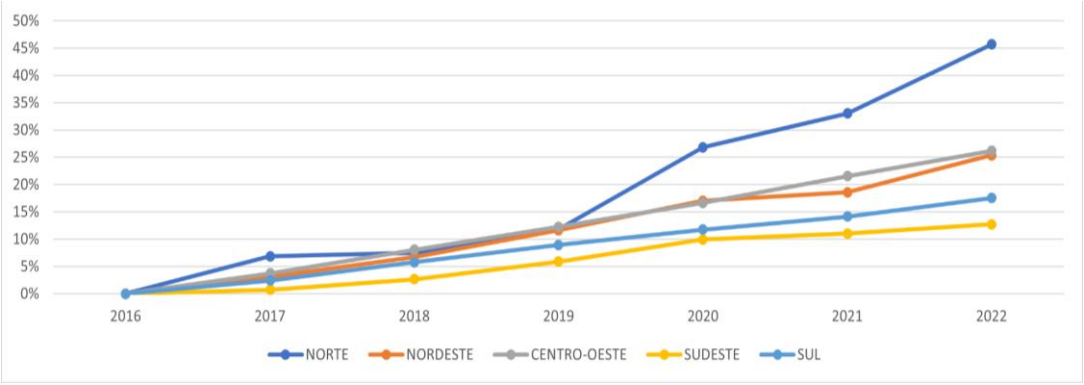


Figura 2: Ligações Ativas – Crescimento Percentual em Relação a 2016.

A análise da população urbana atendida aponta tendência semelhante, embora com ritmos menos intensos, conforme mostrado na Figura 3. A região Norte voltou a apresentar os maiores avanços, com destaque para o crescimento de 26,63% em 2021. O Centro-Oeste e o Sul também registraram incrementos relevantes, enquanto Nordeste e Sudeste mantiveram variações mais discretas ao longo do período. Esse resultado sugere que a ampliação da cobertura ocorreu de forma desigual entre as regiões, preservando diferenças estruturais no ritmo de expansão do atendimento.

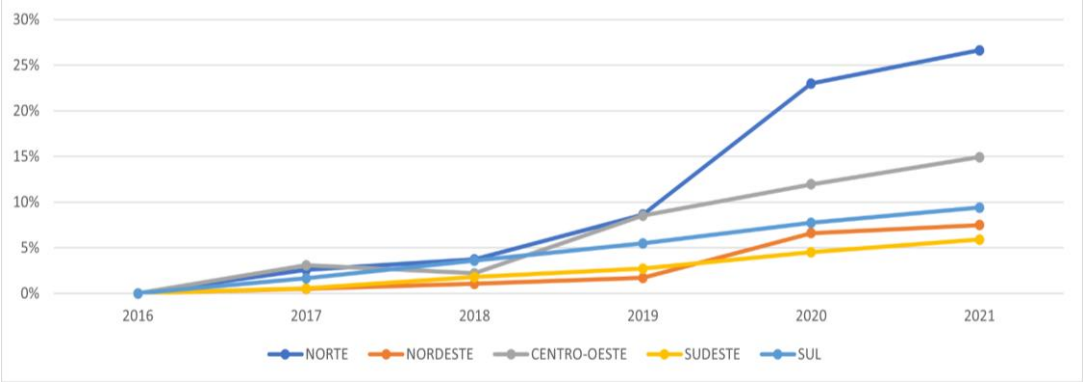


Figura 3: População Urbana Atendida – Crescimento Percentual em Relação a 2016.

Tomados em conjunto, os três indicadores revelam um ponto de inflexão a partir de 2020, mais visível nas regiões historicamente mais deficitárias. Ainda que não seja possível afirmar causalidade direta, a coincidência temporal entre esse movimento e a entrada em vigor da Lei nº 14.026/2020 sugere que o novo ambiente regulatório pode ter contribuído para maior dinamismo na expansão da infraestrutura e do atendimento, especialmente em contextos de cobertura historicamente mais limitada.

Evolução dos investimentos realizados e da adesão municipal ao sistema de informações

A análise dos investimentos realizados entre 2016 e 2022 (Figura 4) permite compreender como os recursos financeiros se distribuíram regionalmente no período recente. Para essa etapa, foram agregados os investimentos realizados pelo prestador, pelo município e pelo estado nos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário (FN023, FN024, FN042, FN043, FN052 e FN053), todos expressos em variação percentual em relação ao ano-base de 2016.

Os resultados evidenciam crescimento mais expressivo nas regiões com maiores déficits históricos, especialmente no Norte e no Nordeste. A região Norte apresentou a trajetória mais acentuada ao longo da série, com crescimento de 110,73% em 2020, 158,66% em 2021 e 169,80% em 2022. O Nordeste também registrou aceleração relevante, atingindo 135,87% em 2022. Nas demais regiões, embora os valores tenham sido menos intensos, também se observou aumento dos investimentos ao final do período, com destaque para o Sul, o Centro-Oeste e o Sudeste.

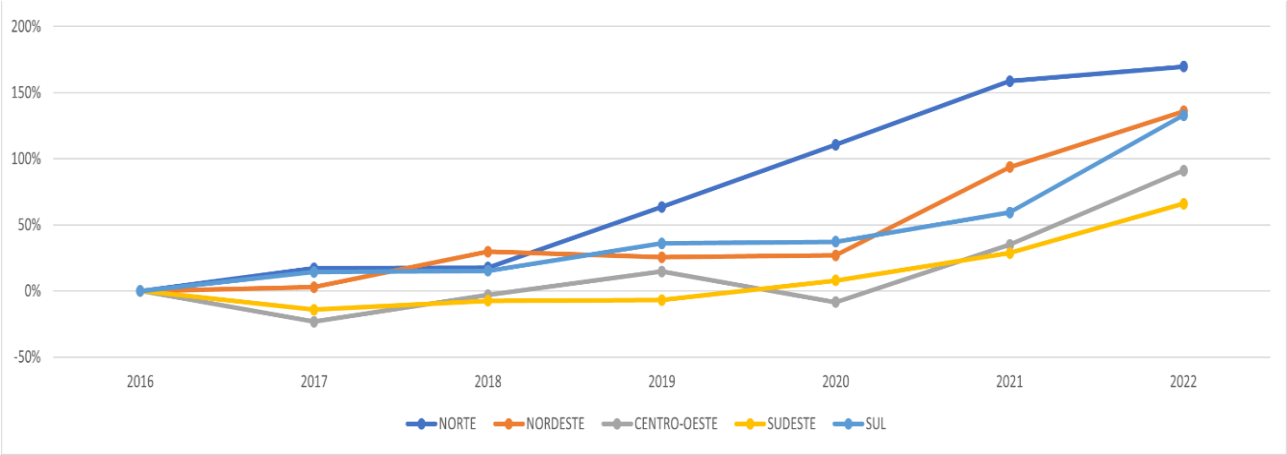


Figura 4: Investimentos Realizados – Crescimento Percentual em Relação a 2016.

Esse comportamento sugere uma intensificação recente do esforço de investimento no setor, com maior dinamismo relativo justamente nas regiões historicamente menos atendidas. Ainda que o desenho metodológico do estudo não permita afirmar causalidade direta, a inflexão observada a partir de 2020 coincide com a promulgação da Lei nº 14.026/2020, indicando possível associação entre o novo ambiente regulatório e a ampliação recente da mobilização financeira no setor.

De forma complementar, analisou-se a adesão municipal ao sistema nacional de informações SNIS, mensurada pela variação do número de municípios com dados reportados em cada ano e região (Figura 5). Os resultados mostram crescimento acumulado da participação municipal ao longo da série, com inflexão mais visível a partir de 2020. A região Norte passou de -14,29% em 2017 para 70,33% em 2022, enquanto o Nordeste variou de -7,74% para 59,75% no mesmo intervalo. O Centro-Oeste, o Sudeste e o Sul também registraram crescimento, embora em intensidade menor.

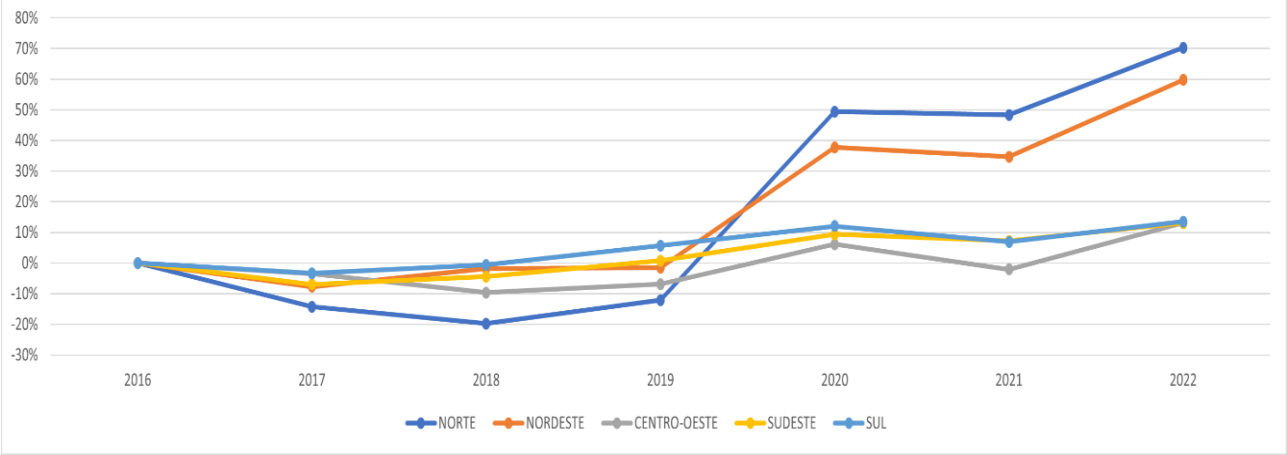


Figura 5: Municípios por Região – Crescimento Percentual em Relação a 2016.

Esse movimento indica avanço na alimentação da base nacional de informações, aspecto relevante para o monitoramento e o planejamento setorial. Contudo, os resultados devem ser interpretados com cautela, uma vez que a base analisada privilegia os sistemas organizados de prestação dos serviços e não contempla de forma plena soluções individuais, especialmente no esgotamento sanitário. Assim, embora a ampliação da adesão melhore a capacidade de leitura da prestação formalizada, ela não esgota a complexidade do acesso efetivo aos serviços no território brasileiro.

Em conjunto, os resultados apresentados nesta seção indicam avanços recentes na expansão da infraestrutura e dos investimentos, com maior intensidade relativa nas regiões historicamente mais deficitárias. Ainda assim, persistem desigualdades territoriais e limitações informacionais que impõem cautela na avaliação da suficiência dessa trajetória frente às metas de universalização.

Considerações Finais

Este estudo analisou a evolução dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil entre 2016 e 2022, com base em indicadores de infraestrutura, atendimento, investimentos realizados e adesão municipal ao sistema nacional de informações do setor. Os resultados evidenciaram avanços regionais importantes no período, com destaque para o crescimento mais intenso observado nas regiões Norte e Nordeste, tanto na expansão da infraestrutura quanto na ampliação dos investimentos.

A análise das séries temporais revelou um ponto de inflexão a partir de 2020, especialmente nas regiões historicamente mais deficitárias. Embora não seja possível afirmar causalidade direta, a coincidência temporal entre esse movimento e a promulgação do Novo Marco Legal do Saneamento Básico sugere que o período recente foi marcado por maior dinamismo na expansão dos serviços e na mobilização de recursos financeiros.

Apesar desses avanços, os resultados também mostram que a trajetória observada permanece marcada por desigualdades regionais significativas. Os maiores crescimentos percentuais ocorreram justamente em regiões que partiam de patamares historicamente mais baixos de cobertura, o que indica progresso recente, mas não necessariamente superação das assimetrias estruturais que caracterizam o setor no país.

Além disso, a interpretação dos resultados requer cautela diante das limitações da base analisada. As informações utilizadas são autodeclaratórias e privilegiam os sistemas organizados de prestação dos serviços, não contemplando de forma plena soluções individuais, sobretudo no esgotamento sanitário. Essa condição restringe análises mais abrangentes sobre o acesso efetivo aos serviços e reforça a necessidade de contínuo aprimoramento das bases nacionais de informação.

Conclui-se, portanto, que o período analisado apresenta sinais consistentes de avanço, mas ainda insuficientes para assegurar, com segurança, que a trajetória recente do setor seja suficiente para garantir o cumprimento das metas de universalização nos prazos estabelecidos. Nesse sentido, os achados do estudo podem contribuir para o planejamento setorial, o monitoramento regulatório e a formulação de políticas públicas orientadas à redução das disparidades regionais e ao fortalecimento da capacidade informacional do setor.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio institucional e o suporte financeiro do Ministério das Cidades por meio do Projeto de Pesquisa 23106.130115/2020-05.

Referências Bibliográficas

BAIN, R.; JOHNSTON, R.; MITIS, F.; CHATTERLEY, C.; SLAYMAKER, T. Establishing Sustainable Development Goal Baselines for Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene Services. Water, v. 10, n. 12, p. 1711, 2018.

BNDES. Desafios à implementação do Marco Legal do Saneamento e a contribuição do BNDES, 2025.

BORJA, P. C. Política de Saneamento no Brasil: a construção da hegemonia neoliberal no setor. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 19, n. 11, p. 4445–4454, 2014.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

BRASIL. Ministério das Cidades. *Relatório SINISA 2024: Esgotamento Sanitário - Resultados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento*. Brasília: MCidades, 2024. 148 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. Painel do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Brasília: MCidades, 2024.

DICKIN, S.; GABRIELSSON, S. Inequalities in water, sanitation and hygiene: Challenges and opportunities for measurement and monitoring. Water Security, v. 20, p. 100143, 2023.

FRAGA, A.; ALVES, F. Saneamento básico e justiça socioambiental: reflexões sobre desigualdades e equidade. Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória–ES, 2025.

GINÉ-GARRIGA, R.; FLORES-BAQUERO, Ó.; JIMÉNEZ-FERNÁNDEZ DE PALENCIA, A.; PÉREZ-FOGUET, A. Monitoring sanitation and hygiene in the 2030 Agenda for Sustainable Development: A review through the lens of human rights. Science of the Total Environment, v. 580, p. 1108–1119, 2017.

HUTTON, G.; VARUGHESE, M. The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene. Washington, DC: World Bank/WHO/UNICEF, 2016.

ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. ODS 6 – Água potável e saneamento. 2022. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6.

ONU. Resolução A/RES/64/292: o direito humano à água e ao saneamento. Assembleia Geral das Nações Unidas, 2010.

PAGANINI, W. da S.; BOCCHIGLIERI, M. M. O Novo Marco Legal do Saneamento: universalização e saúde pública. Revista USP, São Paulo, n. 128, p. 45-60, 2021.

RODRIGUES, K. C. T. T.; VENSON, A. H.; CAMARA, M. R. G. Distribuição espacial do acesso aos serviços de saneamento básico nas microrregiões brasileiras de 2006 a 2013. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 15, n. 1, p. 137-151, 2019.

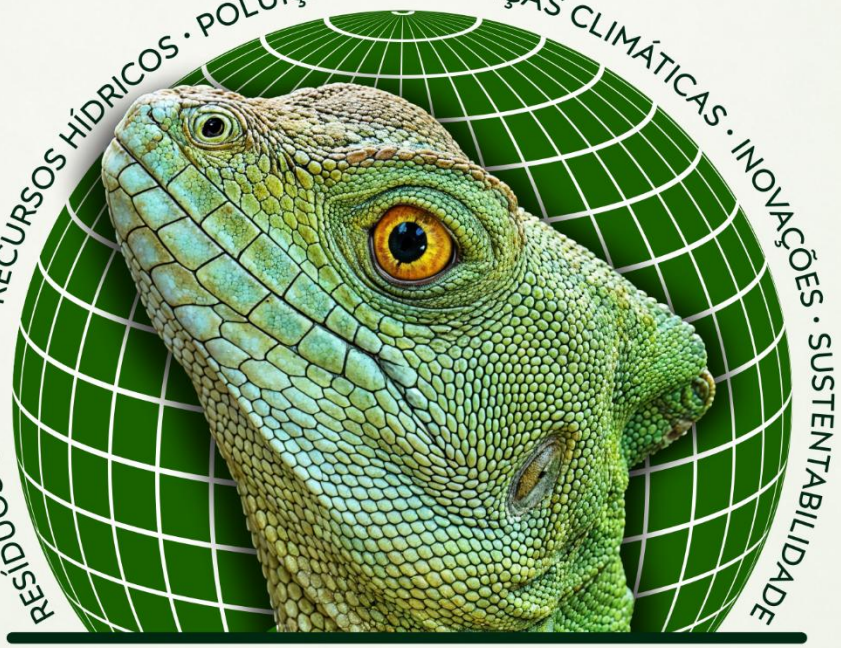
UNITED NATIONS WATER. Progress on the proportion of domestic and industrial wastewater flows safely treated – 2024 update. SDG 6 Indicator Report Series, 6.3.1. Geneva: UN-Water, 2024.

WHO; UNICEF. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2020: five years into the SDGs. Geneva: World Health Organization, 2021. (Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene).

ZILIOTTO, M.; CHIES, J.A.B.; ELLWANGER, J.H. Environmental Sanitation in Porto Alegre City, Brazil: A Basic Step towards Sustainable Development. Sustainability 2024, 16, 2672.

ÁREA TEMÁTICA 34

SAÚDE PÚBLICA, CONTROLE DE VETORES E SALUBRIDADE AMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

PROBLEMAS AMBIENTAIS E RISCO VETORIAL À DENGUE: APLICAÇÃO DO PROTOCOLO PARU NO IGARAPÉ DO PASSARINHO - MANAUS (AM)

1 Cínthia Maria Teixeira Sampaio, 2 Adoréa Rebello da Cunha Albuquerque, 3 Clíssia Carla Teixeira dos Santos

1 Universidade Federal do Amazonas (UFAM), cinsampaio404@gmail.com; 2 Universidade Federal do Amazonas (UFAM), dorearebelo@ufam.edu.br; 3 Centro Universitário Internacional (UNINTER), clissiasantos2020@gmail.com

Palavras-Chave: Salubridade ambiental; Vetores; Saúde pública.

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar a salubridade ambiental e identificar fatores de risco associados à proliferação de vetores da dengue no entorno do Igarapé do Passarinho, localizado na zona norte do município de Manaus (AM), por meio da aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida de Rios Urbanos (PARU). A pesquisa foi desenvolvida com abordagem quali-quantitativa, baseada em levantamento de campo, observação direta sistematizada, registros fotográficos e aplicação do protocolo PARU em quatro pontos ao longo do igarapé, permitindo avaliar as condições ambientais e sanitárias do sistema hídrico urbano. Foram analisados parâmetros como presença de resíduos sólidos, lançamento de esgoto, ocupação irregular das margens, alterações físicas no canal e acúmulo de matéria orgânica. Para complementar a análise, foram utilizados dados socioeconômicos e de saneamento básico obtidos no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), a partir da Tabela 10280, com base no Censo Demográfico 2022, considerando o entorno do igarapé no bairro Monte das Oliveiras. Também foram analisados dados epidemiológicos referentes aos casos notificados de dengue no município de Manaus nos anos de 2021, 2024 e 2025, obtidos junto à Fundação de Vigilância em Saúde do Amazonas (FVS-RCP), incluindo o cálculo da incidência da doença. Os resultados evidenciaram condições críticas de salubridade ambiental, caracterizadas por degradação do igarapé, presença de resíduos, lançamento de esgoto e deficiência de saneamento básico, fatores que favorecem a proliferação de vetores. Conclui-se que a aplicação do PARU, associada à análise de dados socioambientais e epidemiológicos, constitui ferramenta relevante para o diagnóstico ambiental e para o planejamento de ações integradas de vigilância em saúde e gestão ambiental em áreas urbanas vulneráveis da Amazônia.

Introdução

O município de Manaus tem apresentado intenso crescimento urbano nas últimas décadas, impulsionado principalmente pela expansão demográfica associada ao desenvolvimento econômico regional e à implantação do Polo Industrial da Zona Franca de Manaus. Esse processo ocorreu de forma acelerada e, em muitos casos, sem o devido planejamento territorial e ambiental, resultando na expansão da malha urbana sobre áreas ambientalmente sensíveis, como margens de igarapés e áreas de preservação permanente.

A ocupação irregular desses espaços tem provocado alterações significativas nos sistemas hídricos urbanos, incluindo a supressão da vegetação ciliar, o lançamento de esgoto in natura**,** a deposição inadequada de resíduos sólidos e modificações físicas no canal natural dos igarapés. Tais intervenções contribuem para a degradação e para o comprometimento das condições de salubridade ambiental, afetando diretamente a qualidade da água e as condições de vida das populações residentes no entorno desses ambientes.

No contexto amazônico, os igarapés urbanos desempenham importante função ecológica e hidrológica, atuando na drenagem natural das águas pluviais e na manutenção do equilíbrio ambiental. Entretanto, o avanço da urbanização sobre esses ambientes tem intensificado processos de degradação, transformando esses sistemas hídricos em áreas de elevada vulnerabilidade ambiental e sanitária.

Além dos impactos ambientais, a presença de resíduos sólidos, água parada e a precariedade do saneamento básico nesses ambientes podem favorecer a proliferação de vetores de doenças, especialmente o mosquito *Aedes aegypti*, responsável pela transmissão da dengue. Ambientes degradados, associados à circulação de pessoas e à presença de recipientes que acumulam água, podem criar condições propícias para o desenvolvimento do vetor, configurando um ambiente de risco à saúde pública em áreas urbanas.

Nesse contexto, a ocupação urbana nas margens do Igarapé do Passarinho, no município de Manaus, representa um exemplo das transformações decorrentes da urbanização não planejada. Assim, torna-se relevante analisar as condições de salubridade ambiental nesse ambiente, considerando sua relação com a ocorrência de dengue e com os processos socioambientais que caracterizam a dinâmica urbana da cidade.

Metodologia

O presente estudo utilizou o Protocolo de Avaliação Rápida de Rios Urbanos (PARU) como instrumento de diagnóstico ambiental, metodologia voltada à análise da integridade de corpos hídricos inseridos em áreas urbanas. O

protocolo permite avaliar parâmetros físicos, ambientais e sanitários, possibilitando identificar alterações decorrentes da ação antrópica e suas implicações para a salubridade ambiental e a saúde pública. A aplicação ocorreu em quatro pontos ao longo do Igarapé do Passarinho, localizado no espaço urbano do município de Manaus, Amazonas, selecionados com base em critérios de representatividade ambiental, presença de ocupação urbana e evidências de degradação. As pontuações foram classificadas em quatro categorias de qualidade ambiental: ótimo (9–10), bom (6–8), regular (3–5) e ruim (0–2).

A avaliação dos parâmetros ambientais foi realizada a partir da aplicação do (PARU), considerando a análise das margens direita (MD) e esquerda (ME) ao longo dos pontos amostrais. Os valores obtidos foram posteriormente somados e divididos pelo número de pontos avaliados, resultando em uma média que permitiu classificar as condições ambientais de acordo com a escala de qualidade adotada. A avaliação dos parâmetros ambientais foi realizada a partir da aplicação do Protocolo, considerando a análise das margens direita (MD) e esquerda (ME) ao longo dos pontos amostrais. Os valores obtidos foram posteriormente somados e divididos pelo número de pontos avaliados, resultando em uma média que permitiu classificar as condições ambientais de acordo com a escala de qualidade adotada.

A avaliação considerou dez parâmetros relacionados às condições do canal fluvial e das margens, incluindo estabilidade das margens, estado de conservação da mata ciliar, ocupação das margens do rio, presença de resíduos sólidos, alterações antrópicas no canal fluvial, deposição de sedimentos, disponibilidade de substratos e habitats, soterramento e presença de fauna. Cada parâmetro foi analisado separadamente para as margens direita (MD) e esquerda (ME), utilizando escala de pontuação de 0 a 10, em que valores mais elevados indicam melhores condições ambientais. A coleta das informações foi realizada por meio de observação direta em campo e registro fotográfico sistemático, no dia 15/03/2026, sendo atribuídas pontuações conforme as condições ambientais observadas. A análise dos dados foi conduzida por meio de abordagem dedutiva, partindo da avaliação geral das condições ambientais dos pontos amostrais para a análise particular dos parâmetros avaliados, considerando a comparação entre as margens direita (MD) e esquerda (ME).

Com o objetivo de contextualizar o risco epidemiológico associado às condições de salubridade ambiental do igarapé, foram utilizados dados secundários referentes aos casos notificados de dengue no município de Manaus. Para fins analíticos, consideraram-se os registros epidemiológicos e o cálculo da incidência da doença nos anos de 2021 (período de grande cheia dos rios amazônicos), 2024 (período de seca extrema) e 2025 (período de realização do trabalho de campo). Os dados epidemiológicos foram obtidos junto à Fundação de Vigilância em Saúde do Amazonas – FVS-RCP, instituição responsável pelo monitoramento das doenças de interesse em saúde pública no estado. A utilização dessas informações possibilitou caracterizar o contexto epidemiológico municipal e subsidiar a análise integrada entre as condições ambientais observadas no igarapé e o potencial risco de proliferação de vetores. Ressalta-se que a utilização de dados em escala municipal decorre da limitação de acesso a informações epidemiológicas desagregadas por bairro ou setor censitário, sendo, ainda assim, consideradas relevantes para a análise da relação entre salubridade ambiental e risco à saúde pública.

Considerando que a área de estudo corresponde ao entorno do igarapé e está inserida no espaço urbano de Manaus, foram selecionados apenas os casos de dengue registrados na zona urbana do município. Esse recorte metodológico visa garantir maior coerência espacial entre os dados epidemiológicos analisados e o território investigado, evitando a inclusão de ocorrências provenientes de áreas rurais ou ribeirinhas, que apresentam dinâmicas socioambientais distintas. A distribuição dos casos por sexo foi analisada por meio do cálculo da frequência relativa (percentual), obtida pela razão entre o número de casos de cada categoria e o total de casos registrados, multiplicado por 100. Já a incidência da dengue foi estimada a partir da razão entre o número de casos registrados no período e a população residente no município, multiplicada por 100.000 habitantes. Para a estimativa populacional foram utilizados dados demográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponíveis no Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA.

Os dados socioeconômicos utilizados nesta pesquisa foram obtidos no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), a partir da Tabela 10280. Para a análise das condições de saneamento básico em Manaus (AM), foram utilizados dados do Censo Demográfico 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponíveis no Panorama do Censo e na Plataforma Geográfica Interativa (PGI). A análise considerou o entorno do igarapé do Passarinho, no bairro Monte das Oliveiras, onde também foram realizadas observações de campo.

Resultados e Discussão

Avaliação ambiental do Igarapé do Passarinho por meio do PARU

A análise das condições ambientais e sanitárias do Igarapé do Passarinho foi realizada com base na integração entre o diagnóstico ambiental obtido por meio do Protocolo de Avaliação Rápida de Rios Urbanos (PARU), com base em dados epidemiológicos da Fundação de Vigilância em Saúde do Amazonas (FVS-RCP). A aplicação do protocolo PARU permitiu identificar alterações ambientais decorrentes da ação antrópica, evidenciando a degradação ambiental do sistema hídrico urbano. De acordo com o (PARU), Segundo Campos (2020), é composto por 10 critérios de avaliação, sendo atribuída uma pontuação de 0 a 10 que indica a condição do rio nos pontos observados. A análise foi realizada nas margens direita (MD) e esquerda (ME) dos pontos, retirando, assim, a média das pontuações das duas margens e, a partir da somatória das médias de todos os itens, será indicada a condição geral do rio como destaca a Tabela 1.

Protocolo_PARU	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Total de cada parâmetro	Média dos parâmetros
Estabilidade das margens						
MD	7	9	0	6	22	5,5
ME	6	9	0	6	21	5,25
Presença de estado de conservação da mata ciliar						
MD	6	7	6	9	28	7
ME	6	7	6	9	28	7
Ocupação das margens do rio						
MD	5	6	6	9	26	6,5
ME	5	6	6	9	26	6,5
Resíduos sólidos						
MD	1	5	6	6	18	4,5
ME	0	5	6	6	17	4,25
Esgoto doméstico e efluente industrial						
MD	6	6	6	6	24	6
ME	6	6	6	6	24	6
Alteração antrópicas no canal fluvial						
MD	1	6	1	6	14	3,5
ME	1	6	1	6	14	3,5
Deposição de sedimentos						
MD	0	0	2	0	2	0,5
ME	0	0	2	0	2	0,5
Substratos e habitat disponíveis						
MD	0	0	3	3	6	1,5
ME	0	0	3	3	6	1,5
Soterramento						
MD	0	3	2	0	5	1,25
ME	0	3	2	0	5	1,25
Animais						
MD	2	2	2	5	11	2,75
ME	2	2	2	5	11	2,75
Total dos pontos	54	88	68	100		

Tabela 1: Avaliação dos pontos amostrais (P1, P2, P3 e P4) segundo o Protocolo de Avaliação Rápida (PARU) no Igarapé do Passarinho, Manaus – AM.
Fonte: IBGE – Dados da pesquisa, 2026.

A partir desses resultados, foi possível avaliar o nível de comprometimento da salubridade ambiental, considerando indicadores relacionados à presença de esgoto, resíduos sólidos e alterações na morfologia do canal, os quais refletem as condições de saneamento básico e o estado sanitário do ambiente, podendo favorecer a ocorrência de doenças. Sobre o tema, Carmo Filho *et al*. (2024b, p. 179) afirmam que há a observância de um problema relacionado à qualidade da água, uma vez que parte da população ainda utiliza água proveniente de nascentes e poços localizados em suas propriedades, mesmo existindo residências conectadas à rede de distribuição da empresa Águas de Manaus.

Essas águas apresentam potencial de contaminação em decorrência do descarte inadequado de resíduos domésticos e da presença de dejetos humanos, favorecendo a disseminação de doenças como malária, dengue, vírus Zika, febre amarela, além de enfermidades de veiculação hídrica, como diarreia, cólera, amebíase e giardíase. De forma complementar, a análise dos dados epidemiológicos possibilitou contextualizar os riscos à saúde pública associados às condições ambientais observadas, evidenciando a relação entre ambientes com baixa salubridade e o potencial favorecimento à proliferação de vetores, como os transmissores da dengue, conforme apresentado na Figura 1.



Figura 1: Pontos de amostragem do Protocolo PARU no Igarapé do Passarinho, Manaus – AM
Fonte: Autores (2025)

A análise geral dos 10 parâmetros avaliados indica variação nas condições ambientais entre os pontos analisados. O ponto 1 apresentou a menor pontuação (54), indicando maior nível de alteração ambiental. Em contrapartida, o ponto 4 apresentou a maior pontuação (100), sugerindo melhores condições ambientais entre os trechos avaliados. Entre os parâmetros analisados, o estado de conservação da mata ciliar apresentou média de 7, sendo classificado como bom tanto para a margem direita quanto para a margem esquerda, indicando melhores condições relativas de preservação da vegetação marginal no trecho avaliado. De forma semelhante, o parâmetro ocupação das margens do rio apresentou média de 6,5, também classificado como bom, sugerindo nível moderado de alteração antrópica nas margens. Observa-se a presença de macrófitas aquáticas nas margens do igarapé, associadas ao acúmulo de resíduos sólidos e sedimentos. Esse tipo de vegetação é comum em ambientes com maior aporte de matéria orgânica e pode indicar alterações nas condições ambientais do corpo hídrico (URATA *et al.,* 2021).

Em condição intermediária, o parâmetro resíduos sólidos apresentou médias de 4,5 (MD) e 4,25 (ME), sendo classificado como regular, evidenciando a presença de resíduos ao longo do trecho analisado. De modo semelhante, o parâmetro alterações antrópicas no canal fluvial apresentou média de 3,5, também classificada como regular, indicando influência das intervenções humanas na dinâmica do canal. Por outro lado, os parâmetros deposição de sedimentos, substratos e habitats disponíveis e soterramento apresentaram as menores médias, variando entre 0,5 e 1,5, sendo classificados como ruins. Esses resultados indicam maior grau de impacto nesses aspectos específicos do ambiente fluvial, evidenciando limitações na diversidade de habitats e alterações na dinâmica sedimentar do trecho analisado. Nesse sentido, No parâmetro deposição de sedimentos, avaliado pelo PARU no igarapé do Passarinho, observou-se média geral de 0,5, indicando condição crítica. Entretanto, ao analisar os pontos individualmente, o ponto 3 apresentou melhor condição (2), enquanto os pontos 1, 2 e 4 obtiveram pontuação 0**,** evidenciando maior comprometimento nesses trechos.

Contexto epidemiológico da dengue no município de Manaus

Aplicou-se o protocolo PARU nos quatro pontos selecionados, permitindo identificar condições críticas de salubridade ambiental. Foram registradas evidências de lançamento de esgoto, acúmulo de resíduos sólidos e ocupação irregular das margens. Os dados permitiram caracterizar fatores ambientais associados ao risco potencial de proliferação de vetores como o lixo e água acumulada nos recipientes. A imagem registra o acúmulo de resíduos sólidos nas margens da nascente do Igarapé do Passarinho, evidenciando materiais descartados irregularmente, como garrafas plásticas, embalagens e fragmentos de resíduos que podem acumular água da chuva. Esses recipientes funcionam como potenciais criadouros do mosquito *Aedes aegypti*, vetor da dengue, uma vez que mesmo pequenas quantidades de água parada são suficientes para o desenvolvimento de suas larvas. Esse demonstra

como o descarte inadequado de lixo em áreas próximas a cursos d'água contribui para a degradação ambiental e aumenta o risco de proliferação do vetor, evidenciando a relação entre condições socioambientais, gestão de resíduos e vulnerabilidade à ocorrência de arboviroses, na Figura 2, pode-se observar a problemática ambiental do igarapé do Passarinho.



Figura 2: Resíduos sólidos na nascente do Igarapé do Passarinho, com possíveis criadouros de *Aedes aegypti*.
Fonte: Acervo da autora (2025)

Observa-se a presença de resíduos sólidos nas margens da nascente do Igarapé do Passarinho, situação que favorece o acúmulo de água parada e potenciais criadouros do *Aedes aegypti*, especialmente no período de cheias. Destaca-se que o ano de 2021 correspondeu a um período de grande cheia dos rios amazônicos, com impactos ambientais relevantes na cidade de Manaus, no estado do Amazonas. Nesse contexto, foram registrados 194 casos de dengue na zona urbana do município, com maior ocorrência no sexo feminino, totalizando 114 casos (59%), enquanto o sexo masculino apresentou 80 registros (41%), segundo dados da Fundação de Vigilância em Saúde do Amazonas – FVS-RCP. O *Aedes aegypti*, vetor da dengue, desenvolve-se em água parada como larva e pupa e se torna adulto no ambiente terrestre; só depois de picar uma pessoa infectada ele adquire o vírus, podendo transmiti-lo a outros (VIANA; IGNOTTI, 2013). Em 2021, a cheia dos rios em Manaus criou muitos criadouros, favorecendo a proliferação do mosquito e o aumento dos casos na zona urbana.

Estudos realizados em outras regiões do Brasil, como no Sul, mostram maior ocorrência da dengue entre mulheres, pessoas de raça branca, com idade entre 20 e 59 anos e escolaridade de ensino fundamental ou médio (MORSCHBACHER *et al.,* 2025, p.14). Ressalta-se que 2024 foi marcado por uma intensa seca na região amazônica, com impactos ambientais relevantes em Manaus. Enquanto no ano de 2024 foram registrados 201 casos de dengue na zona urbana do município de Manaus. Observou-se maior ocorrência no sexo feminino, com 116 casos (58%), enquanto o sexo masculino apresentou 85 registros (42%), segundo dados da FVS-RCP.

Observa-se que, enquanto 2021 foi marcado por uma grande cheia e 2024 por uma severa seca na região de Amazonas, o ano de 2025 apresentou redução no número de casos de dengue na zona urbana de Manaus, evidenciando variações associadas às condições hidrológicas e socioambientais. No ano de 2025 foram registrados 54 casos de dengue na zona urbana do município de Manaus. Verificou-se também predominância do sexo feminino, com 28 casos (52%), enquanto o sexo masculino apresentou 26 registros (48%), conforme dados da FVS-RCP. Em termos de risco epidemiológico, a incidência estimada de dengue em Manaus foi de aproximadamente 8,6 casos por 100 mil habitantes em 2021, 8,9 casos por 100 mil habitantes em 2024 e 2,4 casos por 100 mil habitantes em 2025. Observa-se maior incidência no ano de 2024, seguido de 2021, enquanto 2025 apresentou redução expressiva, indicando possíveis variações na circulação do vetor associadas às condições hidrológicas extremas observadas na região.

Nesse contexto, a dengue tornou-se uma preocupação crescente na sociedade contemporânea, especialmente devido à organização dos espaços urbanos e ao modo de vida da população, com muitos bairros sem saneamento básico adequado e presença de terrenos ociosos. Soma-se a isso o descaso das autoridades em relação aos agentes de endemias, que carecem de atenção e qualificação profissional (TENÓRIO; LOPES, 2023, p. 2). Assim, a persistência de ambientes urbanos vulneráveis, associados à disposição inadequada de resíduos e à deficiência de infraestrutura sanitária, evidencia que a dinâmica da dengue

está fortemente relacionada às condições socioambientais do território. Afirma Silva *et al*. (2024, p. 2) que os determinantes sociais e ambientais são fundamentais no controle da dengue, influenciando a transmissão da doença em diferentes escalas e períodos. Fatores como renda, acesso à educação, serviços de saúde e condições ambientais — incluindo acúmulo de água parada em recipientes urbanos — aumentam a vulnerabilidade da população à doença.

Condições urbanas e socioeconômicas: renda, trabalho

O processo de urbanização de Manaus ocorreu de forma acelerada nas últimas décadas, impulsionado principalmente pelo crescimento populacional e pelo dinamismo econômico associado à implantação da Zona Franca de Manaus. Entretanto, essa expansão urbana não foi acompanhada, na mesma proporção, pela ampliação da infraestrutura e dos serviços de saneamento básico, contribuindo para a intensificação das desigualdades socioespaciais no espaço urbano. Nesse contexto, torna-se fundamental que as políticas públicas voltadas à redução das vulnerabilidades socioambientais sejam planejadas e implementadas de forma integrada, articulando áreas como habitação, saneamento e meio ambiente, de modo a considerar a distribuição desigual dessas condições no território urbano e promover intervenções mais eficazes (ALVES, 2006, p.58).

Nesse contexto, indicadores relacionados à renda e às condições de trabalho constituem importantes elementos para compreender as dinâmicas de ocupação do espaço urbano e as condições de vida da população. Em áreas marcadas por menores níveis de renda e maior vulnerabilidade socioeconômica, observa-se frequentemente a ocupação de áreas ambientalmente frágeis, como margens de igarapés e zonas suscetíveis a inundações. Em 2022, no município de Manaus, foram registradas 811.436 pessoas ocupadas com rendimento de trabalho. Desse total, 460.717 são homens (56,8%) e 350.719 são mulheres (43,2%), como destaca a Tabela 2 a seguir.

Posição na ocupação	Total	Homens	Mulheres
Total de pessoas ocupadas	811.436	460.717 (56,8%)	350.719 (43,2%)
Empregado no setor privado	425.473	256.322 (60,2%)	169.150 (39,8%)
Trabalhador doméstico	32.573	1.770 (5,4%)	30.804 (94,6%)
Empregado no setor público	97.341	42.325 (43,5%)	55.017 (56,5%)
Conta própria	221.771	135.031 (60,9%)	86.740 (39,1%)

Tabela 2: População ocupada por sexo em Manaus (2022)
Fonte: IBGE – Censo Demográfico (2022)

Embora a participação masculina seja numericamente maior no conjunto das ocupações, observa-se que determinadas atividades urbanas apresentam forte presença feminina, especialmente o trabalho doméstico, no qual as mulheres representam aproximadamente 94,6% dos trabalhadores (30.804 mulheres e 1.770 homens). Essa distribuição ocupacional evidencia uma inserção diferenciada de homens e mulheres no espaço urbano, particularmente em atividades vinculadas ao ambiente domiciliar e aos serviços.

No contexto da dengue, essa dinâmica é relevante porque os principais focos do mosquito *Aedes aegypti* concentram-se justamente no ambiente doméstico e peridomiciliar, o que pode influenciar padrões de exposição no espaço urbano de Manaus, sem necessariamente indicar uma relação direta entre trabalhar mais e apresentar maior incidência da doença. O estudo fundamenta-se em uma abordagem qualitativa realizada nos espaços produtivos das mulheres, evidenciando as transformações nas atividades de trabalho feminino e suas implicações nas condições de vida e saúde no contexto amazônico (OLIVEIRA; NINA, 2014 *apud* RIBEIRO, 2014, p. 1123–1124). Nesse sentido, igarapés urbanos como o Igarapé do Passarinho tornam-se particularmente vulneráveis aos impactos da urbanização não planejada. A ocupação das margens, o lançamento de efluentes domésticos e a deposição de resíduos sólidos favorecem processos de poluição hídrica e criam condições ambientais que podem contribuir para a proliferação de vetores de doenças, configurando um importante problema de saúde pública.

A maior incidência de casos de Dengue entre mulheres pode estar associada à maior exposição aos ambientes intradomiciliares e peridomiciliares, espaços onde ocorre com frequência a presença do mosquito *Aedes aegypti*. Além disso, estudos apontam que a participação feminina na população economicamente ativa e nas atividades cotidianas relacionadas ao cuidado do domicílio pode ampliar essa exposição, somando-se ao fato de que as mulheres tendem a buscar com maior frequência os serviços de saúde, o que contribui para maior registro de notificações (CARMO FILHO *et al.*, 2024a, 134).

Caracterização socioambiental e condições de saneamento no Igarapé do Passarinho

As limitações no acesso e na efetividade dos serviços de saneamento básico constituem um dos principais desafios socioambientais do espaço urbano de Manaus, refletindo desigualdades estruturais na oferta de infraestrutura sanitária. Embora a coleta de resíduos sólidos alcance aproximadamente 97,34% dos domicílios e o abastecimento de água atenda cerca de 76,24% da população, a cobertura de coleta e tratamento de esgoto permanece em torno de 50,06%, indicando que parcela significativa dos moradores ainda convive com condições sanitárias insuficientes. Essa disparidade na prestação dos serviços contribui para a degradação dos corpos hídricos urbanos, especialmente dos igarapés, que frequentemente recebem resíduos sólidos e esgoto doméstico sem tratamento.

No entorno do Igarapé do Passarinho, por exemplo, a presença de lixo e o lançamento de efluentes evidenciam as limitações da infraestrutura urbana diante do crescimento acelerado da cidade, comprometendo a qualidade ambiental e ampliando riscos à

saúde pública. Tais condições favorecem, inclusive, a formação de criadouros do mosquito *Aedes aegypti*, reforçando a relação entre precariedade do saneamento, degradação ambiental e a incidência de arboviroses no espaço urbano. Nesse contexto, programas de intervenção urbana, como o Plano de Aceleração do Reordenamento Urbano (PARU), têm buscado reduzir parte dessas vulnerabilidades por meio de ações voltadas à melhoria da drenagem, reorganização habitacional e ampliação de serviços básicos em áreas de ocupação precária. Contudo, em diversos setores da cidade, sobretudo nas áreas próximas aos igarapés, ainda persistem problemas relacionados ao descarte inadequado de resíduos e ao lançamento de esgoto, evidenciando que as iniciativas de urbanização não têm acompanhado plenamente a dinâmica de expansão urbana de Manaus.

A problemática do saneamento básico nas cidades também pode ser compreendida a partir das reflexões de Michel Foucault sobre poder, território e gestão das populações (FOUCAULT, 2008 *apud* ROCHA, 2014, p.164). Para o autor, as sociedades modernas desenvolveram mecanismos de administração da vida coletiva, nos quais políticas de saúde, higiene e organização do espaço urbano tornam-se instrumentos fundamentais de regulação social. Nesse contexto, a infraestrutura de saneamento — incluindo abastecimento de água, coleta de resíduos e tratamento de esgoto — integra estratégias de gestão da saúde pública e das condições de vida da população. Entretanto, quando tais serviços são distribuídos de forma desigual no território urbano, como observado em diferentes áreas de Manaus e no entorno de igarapés urbanos, evidenciam-se processos de vulnerabilidade socioambiental que ampliam a exposição da população a riscos sanitários e ambientais, reforçando a relação entre planejamento urbano, desigualdade socioespacial e saúde coletiva.

A área de estudo compreende o entorno do Igarapé do Passarinho, sendo adotado como recorte espacial da pesquisa o bairro Monte das Oliveiras, localizado na zona norte de Manaus, no estado do Amazonas. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponibilizados pelo Censo Demográfico 2022 do IBGE, a área apresenta uma população de 1.703 habitantes distribuídos em um território de 0,116 km², resultando em elevada densidade demográfica de 14.739,61 habitantes por km². O levantamento censitário identificou 539 domicílios localizados em área classificada como favela de comunidade urbanas, indicando um processo de urbanização marcado por ocupação intensiva do espaço e fragilidades estruturais na infraestrutura urbana.

No que se refere às condições de saneamento básico, observa-se que 79,9% dos domicílios são atendidos por rede geral de abastecimento de água, enquanto apenas 43,69% dispõem de ligação à rede de esgotamento sanitário, evidenciando uma lacuna significativa na cobertura desse serviço essencial. Em relação às condições internas das moradias, 99,59% possuem banheiro de uso exclusivo e igual percentual é atendido por coleta de resíduos sólidos. Quanto à canalização de água, 96,27% dos domicílios apresentam abastecimento canalizado no interior da habitação, 3,11% possuem canalização apenas no terreno e 0,62% não dispõem desse serviço. No entorno das residências, a presença de infraestrutura de drenagem urbana foi identificada em 69,36% dos domicílios, que apresentam bueiros ou bocas de lobo nas proximidades, enquanto 30,64% não contam com esse tipo de equipamento.

Considerações finais

A presente pesquisa, mostra a relação entre as condições ambientais do Igarapé do Passarinho, a ocorrência de dengue e os indicadores de saneamento básico no município de Manaus (AM). A aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida (PARU) revelou condições ambientais predominantemente desfavoráveis ao longo dos pontos analisados, destacando-se os parâmetros deposição de sedimentos, substratos e habitats disponíveis e soterramento, que apresentaram as menores médias (entre 0,5 e 1,5), classificados como ruins, indicando maior grau de impacto no ambiente do igarapé. Em contraste, os parâmetros resíduos sólidos (médias de 4,5 e 4,25) e alterações antrópicas no canal fluvial (média de 3,5) apresentaram classificação regular. Entre os pontos avaliados, observou-se maior comprometimento ambiental próximo à nascente (P1), enquanto o ponto P4 apresentou melhores condições relativas. No que se refere à análise epidemiológica, verificou-se variação nos registros de dengue ao longo dos anos, com redução para 54 casos em 2025 segundo dados da FVS-RCP. Entretanto, mesmo na ausência de eventos hidrológicos extremos nesse período, a ocorrência da doença permaneceu, indicando que sua dinâmica não pode ser atribuída exclusivamente às variações climáticas. Nesse contexto, os indicadores de saneamento básico revelam a presença de serviços urbanos, como abastecimento de água e coleta de resíduos sólidos, porém evidenciam limitações na cobertura de esgotamento sanitário e na infraestrutura de drenagem. Assim, os resultados indicam que as vulnerabilidades ambientais observadas no Igarapé do Passarinho, associadas às lacunas no saneamento básico, contribuem para a formação de ambientes favoráveis à proliferação do *Aedes aegypti*, reforçando a necessidade de políticas integradas de gestão ambiental, saneamento e planejamento urbano.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

Referências bibliográficas

ALVES, Haroldo da Gama Torres. Vulnerabilidade socioambiental na metrópole paulistana. **Revista Brasileira de Estudos de População,** São Paulo, v. 23, n. 1, p. 43–59, jan./jun. 2006.

CAMPOS, J. C. **Protocolo de avaliação rápida de rios urbanos como subsídio ao planejamento da paisagem: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Palmital na região metropolitana de Curitiba** *(PR)*. 2020. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba., 2020. Disponível em: https://hdl.handle.net/1884/67438. Acesso em: 15 mar. 2026.

CARMO FILHO, Odemar Jose Santos do; DOS ANJOS, Kelyan Lago; PORTO, Lindalva Alves Silva; SCHÜLER, Lilian Francisca da Silva Oliveira; NASCIMENTO, Wellington de Paula. APLICAÇÃO DE PROTOCOLOS DE AVALIAÇÃO RÁPIDA (PAR) E DE AVALIAÇÃO DE RIOS URBANOS (PARU) NO SEGMENTO MÉDIO DO IGARAPÉ DO MINDU, MANAUS (AM). **Revista Geografar**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 155–181, 2024b. DOI: 10.5380/geografar.v19i1.93998. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/93998. Acesso em: 15 mar. 2026.

CARMO FILHO, Odemar José Santos do; FORTES, Mircia Ribeiro; ALBUQUERQUE, Adoréa Rebelo da Cunha; RIBEIRO, Welton Siqueira. Análise da epidemia da dengue na cidade de Alenquer, Pará, Brasil. In: MOLINARI, Deivison Carvalho; CRUZ, Manuel de Jesus Masulo da; SCHWADE, Tiago Maiká Müller (org.). **A Geografia Amazônica em Múltiplas Escalas**. v. 4. Embu das Artes, SP: Alexa Cultural; Manaus: EDUA, 2024a.

MORSCHBACHER, Joel; HAACK, Bruna Maliska; ZUGE, Samuel Spiegelberg; BUSATO, Maria Assunta; LLINARES, Fernando Jorge Bornay; PREUSS, Jackson Fabio; LUTINSKI, Junir Antonio. PERFIL EPIDEMIOLÓGICO DA DENGUE NA REGIÃO SUL DO BRASIL NOS ANOS DE 2014 A 2022. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 21, p. e2111, 2025. DOI: 10.14393/Hygeia2173087. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/73087. Acesso em: 10 mar. 2026.

RIBEIRO, Helena. Geografia da saúde no cruzamento de saberes. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 1123–1126, 2014. DOI: 10.1590/S0104-12902014000400200.

ROCHA, Jorge Alberto da Costa (org.). **Michel Foucault: crítico – esteta- cínico mitigado**. Campina Grande: EDUE PB, 2014. ISBN 978-85-7879-184-1

SILVA, Ruan Carvalho da; SILVA, Silmara Costa da; APEL, Romana Pedott; LOPES, Catarina; ROCHA, Saulo Vicente; DALONSO, Nicole. ANÁLISE DOS FATORES METEOROLÓGICOS, SOCIOAMBIENTAIS E SOCIOECONÔMICOS RELACIONADOS A INCIDÊNCIA DE DENGUE EM JOINVILLE – SC NOS ANOS DE 2020 E 2021. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 20, p. e2063, 2024. DOI: 10.14393/Hygeia2071212. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/71212. Acesso em: 10 mar. 2026.

TENÓRIO, Fabiana de Melo; LOPES, José Lidemberg de Sousa. A DENGUE: RETRATO DE SUA INCIDÊNCIA ENTRE 2016 A 2020 NA CIDADE DE ARAPIRACA EM ALAGOAS, BRASIL. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 19, p. e1920, 2023. DOI: 10.14393/Hygeia1966605. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/66605. Acesso em: 10 mar. 2026.

VIANA, D. V.; IGNOTTI, E. A ocorrência da dengue e variações meteorológicas no Brasil: Revisão sistemática. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 16, n. 2, p. 240-256, 2013. https://doi.org/10.1590/S1415-790X2013000200002.

URATA, Stephanie Luana; PESENTI, Maria Eduarda Aranega; TANIWAKI, Paula Yuri; CAMPOS, Vitor Antônio; PRATES, Kátia Valéria Marques Cardoso. **Análise macroscópica da qualidade ambiental de dois córregos na cidade de Londrina (PR) por meio de um Protocolo de Avaliação Rápida para Rios Urbanos (PARU).** In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21., 2021. Anais [...].

DISPOSIÇÃO INADEQUADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E A DENGUE: ANÁLISE ESPACIAL NO BAIRRO TERRA NOSSA, FRANCISCO BELTRÃO-PR

1 Tatiana Cristina Schneider Ghisi, 2 Rafaela Harumi Fujita, 3 Carlos Cassemiro Casaril.

1 UNIOESTE, e-mail: arq.tatianaghisi@gmail.com; 2 UNIOESTE, e-mail: rafaela.fujita@unioeste.br; 3 UNESPAR, e-mail: carloscasaril@gmail.com

Palavras-chave: Resíduos sólidos; disposição inadequada; análise espacial.

Resumo

A disposição inadequada de resíduos sólidos gera impactos ambientais e prejuízos à saúde pública, pois é um potencial criadouro de vetores transmissores de doenças como a dengue. No ano de 2024, o município de Francisco Beltrão, localizado no Sudoeste do Paraná, apresentou foco epidêmico de casos de dengue, com 22.992 notificações e 22 óbitos. No ano de 2025, houve redução de 97% das notificações, com 743 casos. O bairro Terra Nossa, nos dois períodos analisados (2024 e 2025), registrou, respectivamente 4.833 e 151 casos notificados de dengue, estando, em ambos os anos, entre os cinco bairros que correspondiam por mais de 60% das notificações da doença no município. O objetivo desse estudo é a análise da distribuição e da densidade espacial dos pontos de disposição inadequada de resíduos sólidos no bairro Terra Nossa, localizado no município de Francisco Beltrão-PR, associada a ocorrência de casos notificados de dengue nos respectivos anos de 2024 e 2025. Parte-se da hipótese de que a concentração espacial de resíduos sólidos dispostos de forma irregular intensifica a formação de criadouros do vetor, contribuindo para o aumento da doença. A metodologia fundamenta-se no levantamento de casos notificados, na pesquisa de campo para identificação e classificação de áreas de risco e na análise espacial por meio do estimador de densidade de Kernel. A pesquisa apontou uma média de 864 pontos localizados em áreas públicas do bairro Terra Nossa com presença de resíduos sólidos dispostos inadequadamente e quatro (04) áreas com alta densidade de concentração de disposição inadequada. Os resultados indicam a estreita relação entre a destinação inadequada de resíduos sólidos e doenças causadas por agentes transmissores que utilizam esses locais como criadouros, reforçando a relevância da análise espacial como instrumento técnico para o planejamento e o monitoramento em saúde ambiental. Evidencia-se, ainda, a necessidade de fortalecimento da gestão de resíduos sólidos, ampliação da infraestrutura urbana e implementação de ações contínuas de educação ambiental.

Introdução

As formas irregulares de disposição de resíduos sólidos geram impactos ambientais, sociais, econômicos e, principalmente, à saúde pública (Paz *et al.*, 2019; Catani *et al.*, 2024). Kikuti *et al.* (2015); Bezerra e Matos (2023) associam os efeitos gerados pela rápida urbanização, com consequente aumento da densidade populacional e falta de infraestrutura urbana. Pereira *et al.* (2024) explana que um dos primeiros impactos registrados gerado pela presença de resíduos sólidos próxima às comunidades foi a ocorrência de doenças graves que acometeram a população mundial.

A relação da disposição inadequada dos resíduos sólidos e a proliferação de vetores transmissores de doenças como a dengue são relacionadas porque a água parada nesses resíduos são potenciais criadouros do mosquito transmissor (Bezerra; Matos, 2023), que encontra no lixo a céu aberto um lugar próprio e ideal para a sua reprodução (Cibotto, 2018; Helrigle *et al*., 2019; Pereira *et al.*, 2024). Dessa forma, a eliminação de criadouros é a principal forma de prevenir casos de dengue e das demais arboviroses transmitidas pelo mosquito (SOBRAL *et al.*, 2019).

O objetivo deste estudo é a análise da distribuição e da densidade espacial dos pontos de disposição inadequada de resíduos sólidos no bairro Terra Nossa, localizado no município de Francisco Beltrão-PR, associada aos casos notificados de dengue durante o período de 2024 e de 2025. No ano de 2024, o município de Francisco Beltrão enfrentou foco epidêmico, registrando 22.992 notificações e 22 óbitos. No ano 2025, houve uma redução de 97% no número de casos notificados de dengue, notificando 743 casos e somente um óbito.

O bairro Terra Nossa, nos dois períodos analisados (2024 e 2025), registrou, respectivamente 4.833 e 151 casos notificados de dengue, estando, em ambos os anos, entre os cinco bairros que correspondiam por mais de 60% das notificações da doença no município. Assim sendo, parte-se da hipótese de que o alto número de casos de dengue no bairro Terra Nossa em relação ao quantitativo total pode estar diretamente ligado ao descarte inadequado de resíduos sólidos, o que favorece a proliferação dos mosquitos transmissores.

A metodologia foi desenvolvida em três etapas: levantamento dos casos notificados de dengue no bairro Terra Nossa em 2024 e em 2025; pesquisa *in loco* de locais com descarte inadequado de resíduos sólidos, classificando-os quanto ao risco de proliferação do mosquito da dengue; e análise espacial desses dados por meio do estimador de densidade de Kernel. O mapa resultante indicou a densidade das áreas de descarte inadequado de resíduos sólidos.

Diante dessas informações, a leitura espacial do bairro Terra Nossa se faz necessária, considerando que a disposição inadequada dos resíduos sólidos não se configura em um fenômeno isolado, mas como sinalização de fragilidades estruturais na gestão urbana e ambiental.

Ao associar a análise da disposição inadequada de resíduos sólidos e as notificações de casos de dengue, busca-se evidenciar relações causais e padrões territoriais que sustentam a dinâmica da disseminação de doenças transmitidas por vetores que dependem de criadouros para seu desenvolvimento, como o mosquito transmissor da dengue.

Nesse sentido, reforça-se a necessidade de reorientação das políticas públicas na questão de educação ambiental, faz-se pertinente a análise da eficácia das estratégias atuais e há indicação de intervenções integradas, capazes de atuar simultaneamente sobre as práticas sociais e ambientais.

Material e Métodos

Área de Estudo

O bairro Terra Nossa, localizado no município de Francisco Beltrão (26°04'51''S; 53°03'18''O) do Sudoeste do Paraná, originou-se a partir de um processo de ocupação irregular em área pública municipal, marcada por intensa antropização. A área, com aproximadamente 12.271,92 m², foi adquirida pela administração municipal em 1995 com a finalidade de implantação de um frigorífico, projeto que não se concretizou. Entre 1995 e 2015, a ausência de uso definido favoreceu a utilização indevida do espaço como local de descarte de resíduos sólidos diversos.

A ocupação deste local teve início em 2016, com a instalação inicial de onze famílias, expandindo-se rapidamente para cerca de 300 núcleos familiares em condições precárias de infraestrutura, caracterizadas por moradias improvisadas, sistemas sanitários rudimentares e arruamento informal. Dados do Censo Demográfico do IBGE (2022) contabilizaram 1.106 domicílios e 3.163 habitantes.

No que concerne à gestão de resíduos sólidos, observa-se cobertura parcial dos serviços: a coleta de resíduos orgânicos atende a 79% dos domicílios, enquanto 11% utilizam caçambas e contentores. Práticas inadequadas, como queima e descarte em áreas impróprias, ainda persistem em parcela significativa das residências, caracterizando 10% dos domicílios. A coleta regular no referido bairro ocorre duas vezes por semana para resíduos orgânicos, sob responsabilidade do poder público municipal, enquanto que os resíduos recicláveis são recolhidos semanalmente por empresas terceirizadas. Esse cenário evidencia fragilidades estruturais na gestão ambiental urbana, com implicações diretas para as condições sanitárias locais.

Compilação de Dados de Notificações de Dengue

Para a presente análise, procedeu-se a sistematização dos dados de casos notificados de dengue no bairro Terra Nossa referente ao período de 2024 e de 2025. As informações utilizadas foram disponibilizadas pela Secretaria Municipal de Saúde, estruturadas em planilhas eletrônicas e baseadas nos registros do Sistema de Informação de Agravos de Notificação, instrumento oficial do Ministério da Saúde para notificação e monitoramento de agravos.

Análise Espacial de Disposição Inadequada de Resíduos Sólidos

Para mapear e classificar os pontos de descarte inadequado de resíduos sólidos, conduziram-se visitas *in loco* no bairro Terra Nossa, analisando os espaços públicos como vias, calçadas, áreas verdes e de preservação permanente para, posteriormente, classificá-los conforme a tipologia dos resíduos encontrados. As coletas de dados foram realizadas em três períodos, que ocorreram no segundo semestre de 2024, bem como no primeiro e segundo semestre de 2025, sendo identificados uma média de 864 pontos de descarte inadequado em áreas públicas em cada coleta.

A classificação das tipologias encontradas foi dividida em sete classes: lona plástica, resíduos sólidos em geral, mobiliário e eletrodomésticos, restos de materiais referente a construção civil, vegetação (podas, troncos, folhagem de grande porte), automóveis abandonados e queima de resíduos sólidos e orgânicos. Todas essas classes foram consideradas como áreas propícias à proliferação de mosquitos vetores de doenças pela possibilidade de armazenar água parada.

Os dados foram inseridos no programa *Qgis* através da criação de uma camada *shapefile* do tipo geométrico ponto, georreferenciadas a partir da base de dados de imagens do Google Satélite e do *shapefile* (IBGE, 2022) do bairro Terra Nossa.

Estimador da densidade de Kernel

A regra de Silverman (1986) foi aplicada para definir a largura de banda (raio), buscando um valor que otimizasse o equilíbrio entre a suavização e o detalhamento da distribuição dos dados, essencial para a interpretação dos *Hotspots*. A fórmula busca minimizar o erro médio quadrático na estimativa da densidade, evitando que o raio seja muito pequeno (o que resultaria em um mapa com muita variação e ruído) ou muito grande (suavização excessiva que apaga padrões importantes). No contexto espacial, a regra de Silverman (1986) é adaptada para considerar a área da região de estudo e o número de pontos amostrados, calculando o raio (h) pela equação 01:

$$h = 0{,}9\ x\ \min(\sigma, \frac{IQR}{1{,}34})\ x\ n^{-1/5} \qquad (01)$$

Onde: σ é o desvio padrão dos pontos; IQR é o intervalo interquartil e n é o número de pontos.

A equação 02 mostra a fórmula adotada do raio de vizinhança gerados por meio da ferramenta de análise vetorial matriz de distâncias no programa *Qgis*.

$$R = X \pm X\sigma \qquad (02)$$

O raio de vizinhança foi definido pela adição/subtração dos valores da média da distância média (X) pela média do desvio padrão (Xσ) de todos os pontos geométricos aplicados (Rizzatti *et al.*, 2020). Os valores dos raios a partir da soma/subtração, sendo que o raio menor apresentou um melhor intervalo de classificação para as duas dimensões, enquanto o raio maior expôs suavização dos intervalos. A Tabela 01 apresenta os resultados para mensuração e espacialização da densidade de Kernel.

Dimensão	Média da média	Média do desvio padrão	Raio maio	Raio menor
Resíduos sólidos	396,68	189,22	585,90	207,45

Tabela 01: Dados da metodologia do raio de vizinhança para a densidade de Kernel.
Fonte: Elaboração própria (2025)

Assim, para a análise da disposição inadequada de resíduos sólidos foi utilizado o raio menor correspondente a 207,45. Como resultado, a densidade de Kernel apresenta a disposição espacial da área de estudo e identifica as áreas com maior concentração de disposição inadequada de resíduos sólidos por metro quadrado, destacando regiões com maiores frequência de ocorrências no bairro Terra Nossa através de tonalidades de cores, sendo a azul o tom mais frio, isto é, de menor densidade e a tonalidade vermelha, a maior densidade.

Resultados e Discussão

Notificações de casos de dengue no bairro Terra Nossa (período 2024 e 2025)

As observações referentes à dimensão resíduos sólidos mostraram-se relevantes no bairro Terra Nossa, onde foram identificadas acumulações de resíduos em áreas públicas de forma inadequada. Essa questão, além de comprometer a qualidade ambiental e a estética urbana, está diretamente associada à proliferação de vetores e a ocorrência de doenças, como a dengue.

Para a complementação deste estudo, incorporaram-se dados de notificação de dengue referentes aos anos de 2024 e 2025 no bairro Terra Nossa, considerando que a disposição inadequada de resíduos sólidos a céu aberto configura-se como fator de risco relevante, por favorecer a formação de criadouros do vetor *Aedes aegypti*.

No ano de 2024, o município de Francisco Beltrão enfrentou foco epidêmico, registrando 22.992 notificações e 22 óbitos. No ano 2025, houve uma redução de 97% no número de casos notificados de dengue, notificando 734 casos e um óbito. As notificações registradas no bairro Terra Nossa em 2024 somam 954 casos e no ano de 2025 registrou-se 151 casos, contabilizando 80% de redução de notificações. A Figura 01 apresenta as notificações de casos de dengue no bairro Terra Nossa durante o período de 2024 e 2025.

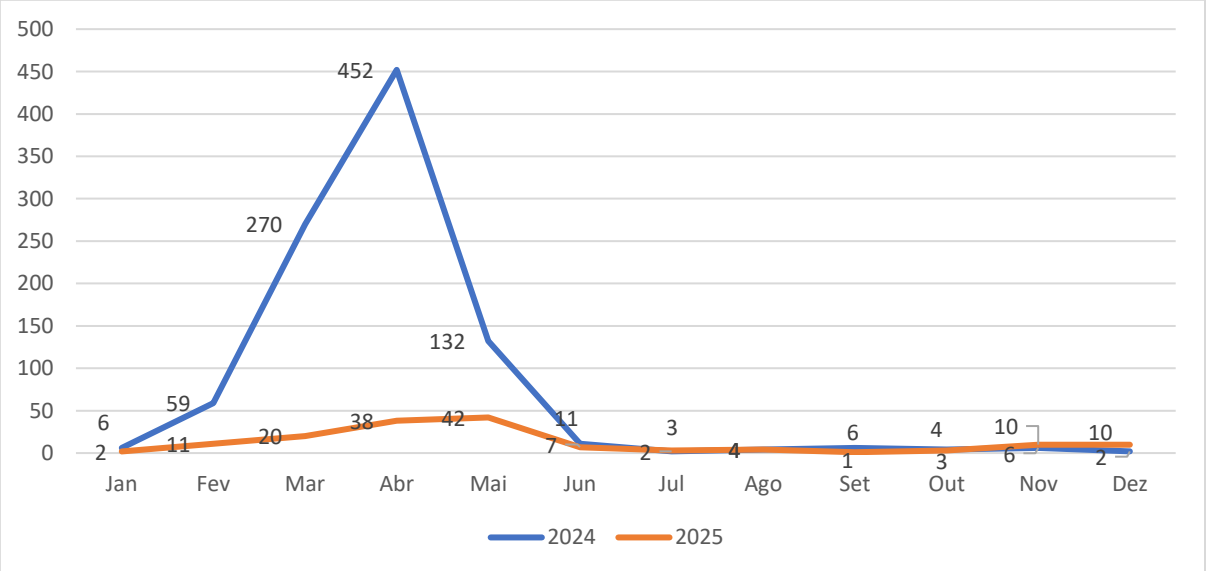


Figura 01: Distribuição mensal de notificações de dengue no bairro Terra Nossa, no ano de 2024 e 2025.
Fonte: Secretaria Municipal da Saúde (2026).

A distribuição mensal dos casos de dengue durante o ano de 2024, evidencia uma forte ocorrência no primeiro semestre, intensificado no mês de fevereiro com 59 casos, e destacando-se para os meses de março, abril e maio, que registraram 270, 452 e 132 casos, respectivamente. A partir de maio, observa-se uma queda progressiva nos registros, com apenas 132 casos, seguido de uma considerável redução em junho (11 casos) e números residuais no segundo semestre (variando entre 2 e 6 casos mensais).

No ano de 2025 houve uma redução anual dos casos de dengue devido aos vários fatores biológicos e de ações preventivas de saúde pública, principalmente na questão da imunidade populacional, já que uma grande parcela da população foi infectada pelo vírus e desenvolveu imunidade temporária contra aquele sorotipo, diminuindo o número de pessoas suscetíveis.

Foram registrados 151 casos de dengue, variando de 01 a 42 casos mensais. Os maiores valores ocorrem em abril (38 casos) e maio (42 casos), porém sem caracterizar um pico epidêmico comparável ao ano anterior. Na estação do inverno, o registro permaneceu entre 01 e 04 casos, mantendo-se níveis baixos de notificações até o final do ano.

Apesar da redução dos casos de dengue registrados em 2025 em relação a 2024, a preocupação com a disposição inadequada dos resíduos sólidos permanece relevante, uma vez que o bairro Terra Nossa estava novamente entre os bairros de maior registro de casos e tais condições favorecem a formação de criadouros do vetor, comprometem a salubridade ambiental, além de indicar fragilidades estruturais no sistema de manejo de resíduos e vulnerabilidade ambiental.

Cenário da disposição inadequada de resíduos sólidos no bairro Terra Nossa, Francisco Beltrão-PR

Com o intuito de analisar espacialmente os focos de descarte irregular e identificar as áreas com maior incidência de disposição inadequada no bairro Terra Nossa, foi elaborado o mapa da distribuição espacial territorial, permitindo a visualização de padrões territoriais e sua relação com o ambiente em estudo.

O mapa de distribuição dos resíduos sólidos evidencia a classificação em diferentes tipologias: vegetação, material de construção, resíduos sólidos geral, queima, lona plástica, automóvel e mobiliário e eletrodoméstico. Os dados foram coletados *in loco* entre o primeiro semestre de 2024 e primeiro e segundo semestre de 2025, sendo identificados uma média de 864 pontos de descarte inadequado em áreas públicas. A Figura 02 apresenta o mapa da distribuição espacial de disposição inadequada de resíduos sólidos no bairro Terra Nossa.

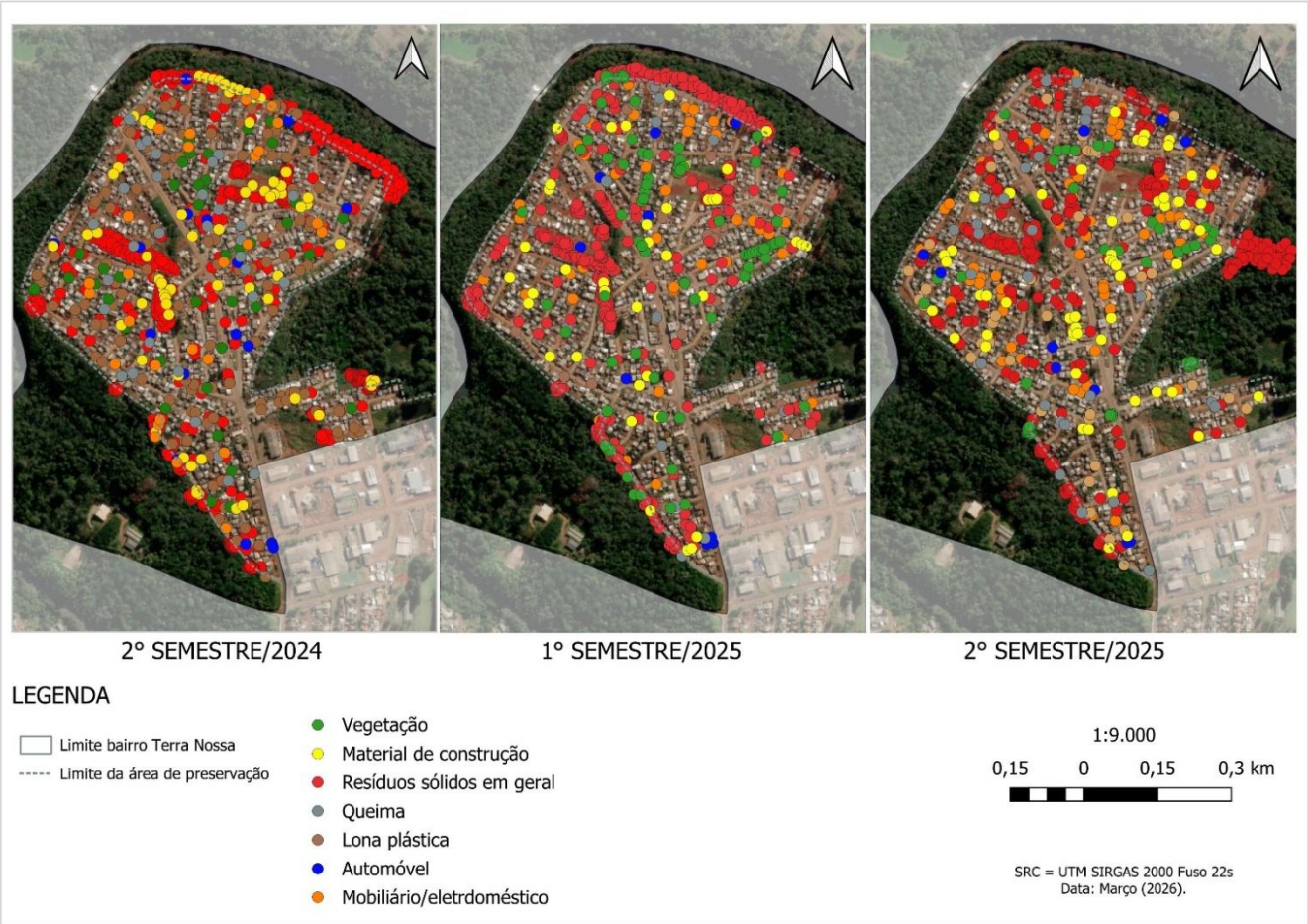


Figura 02: Mapa da distribuição espacial de disposição inadequada de resíduos sólidos.
Fonte: Elaboração própria (2026)

Observa-se, de forma consistente, a predominância de resíduos classificados como resíduos sólidos em geral**,** distribuídos de maneira difusa por praticamente toda a malha urbana, com concentração ao longo das vias principais e em áreas periféricas próximas aos limites do bairro e à área de preservação. Essa classe representa 68% do total de pontos analisados, constituídos por plásticos em geral, restos de canos, brinquedos, cadeiras, guarda-chuva e pneus, entre outros. Em alguns locais esses resíduos estão misturados com lama e vegetação e em outros estão sendo depositados e se tornando pontos fixos de descarte, principalmente nos limites entre as áreas de preservação com as vias públicas.

Os pontos associados a materiais de construção**,** mobiliário/eletrodomésticos **e** lona plástica indicam a presença de resíduos volumosos e de difícil manejo, frequentemente relacionados a obras informais, reformas e descarte doméstico inadequado. Esses resíduos tendem a se concentrar em áreas de menor controle urbano, como limites do bairro e terrenos baldios.

Quanto à classe material de construção foram analisados os restos de materiais jogados de forma desordenada, mas também se percebeu a prática de armazenamento de material de construção usados para reaproveitamento, dentre eles telhas, tábuas, forro em gesso, PVC e esquadrias. Para a classe mobiliário/eletrodomésticos foram encontrados dispostos principalmente na calçada na frente das casas e em áreas de preservação, se configuravam em conjuntos de sofás, carcaças de geladeira e máquinas de lavar roupa**.**

As lonas plásticas foram detectadas como resíduos sólidos e essa tipologia não se deve à sua prevalência quantitativa, mas à sua natureza reciclável e à possibilidade de ser devidamente coletada pelo serviço de limpeza pública. Geralmente localizada nas calçadas com a função de abrigar os materiais de construção das intempéries, principalmente pequenos montes de brita e areia. Foram anotados os casos em que os materiais já tinham sido utilizados, mas a lona não fora recolhida ou destinada, considerando que a mesma estava jogada nas calçadas ou amontoadas próximo aos muros. Quanto a classe vegetação, definida por restos de podas das árvores e retirada dos matos são depositados na frente das casas – observou-se a prática de deixar a vegetação secar para depois queimar. O acúmulo desse material orgânico potencializa a disposição de outros materiais de lixos junto a eles.

A ocorrência de automóveis abandonados e registros de queima de resíduos reforça a presença de práticas ambientalmente inadequadas, com potenciais impactos diretos na saúde pública e na qualidade ambiental. Os automóveis abandonados situam-se nas vias, em cima das calçadas e nas áreas verdes, com características em comuns: sem rodas e/ou pneus, com pneus furados, ou com lona e plásticos envolvendo algumas partes.

A análise temporal dos mapas mostra uma persistência dos focos de descarte, com variação de acúmulos entre os períodos, mas sem eliminação significativa das áreas críticas, destacando as áreas de preservação. A Figura 03 apresenta a classificação e o número de ocorrências dos resíduos sólidos encontrados no bairro Terra Nossa nos três períodos analisados, permitindo complementar a leitura espacial com uma abordagem comparativa temporal.

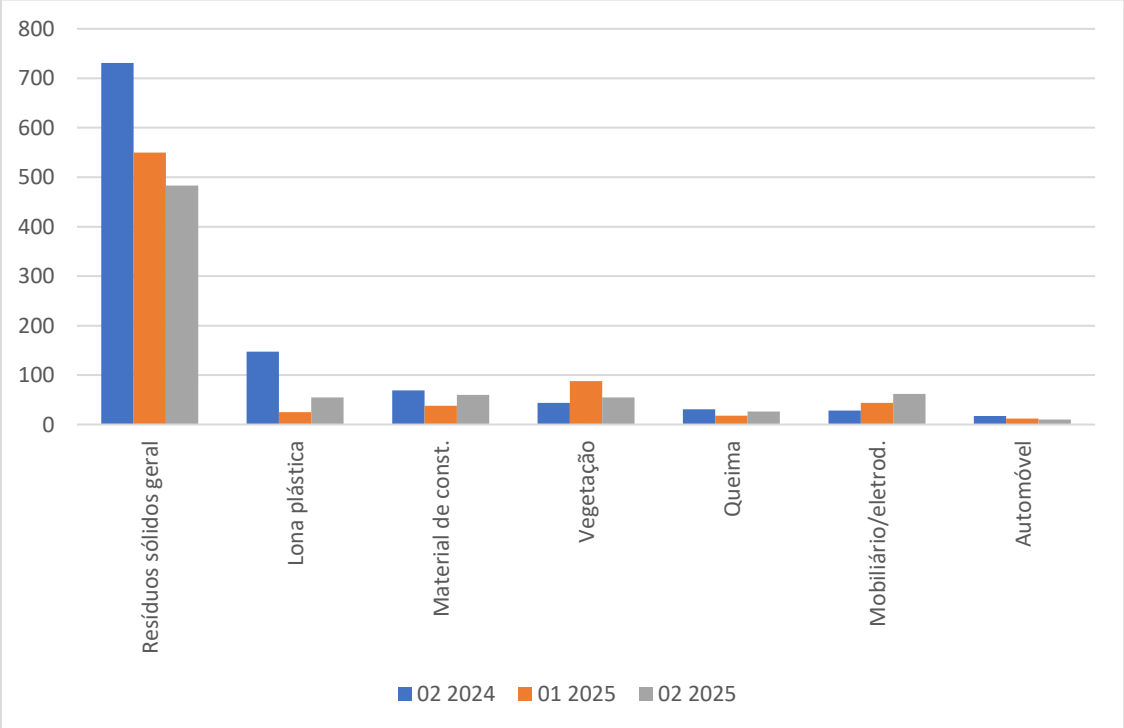


Figura 03 – Ocorrências de resíduos sólidos em áreas públicas no bairro Terra Nossa.
Fonte: Elaboração própria (2026)

No contexto geral, os quantitativos por material possuem variações temporais distintas entre as tipologias de resíduos sólidos ao longo dos períodos analisados, com redução nas categorias resíduos sólidos em geral e automóveis, incremento em mobiliário e eletrodomésticos e comportamento oscilatório nas demais tipologias.

A categoria resíduos sólidos em geral apresenta predominância expressiva em todos os períodos, uma vez que agrega uma diversidade de materiais não segregados, impossibilitando sua classificação específica. Tal padrão indica a ausência ou ineficiência da segregação na fonte, resultando na formação de pontos recorrentes de acúmulo. Ainda que se observe uma redução progressiva em relação ao 2º semestre de 2025, essa tipologia permanece como a principal forma de descarte inadequado no território.

A tipologia lona plástica apresenta elevada incidência inicial, seguida de redução significativa nos períodos subsequentes, sugerindo possível redução de atividades associadas, como coberturas provisórias vinculadas a obras e reformas. Em contrapartida, categorias como mobiliário/eletrodoméstico e vegetação demonstraram tendência de aumento ao longo das observações, indicando maior presença de resíduos volumosos e orgânicos, os quais demandam estratégias específicas de manejo e coleta.

Os materiais de construção mantêm relativa estabilidade ao longo dos períodos, reforçando a hipótese de descarte contínuo associado a pequenas obras e reformas de caráter informal, sugerindo uma dinâmica construtiva constante no bairro. Por sua vez, as tipologias queima e automóvel apresentam baixa frequência absoluta, porém elevada relevância qualitativa, por indicarem práticas ambientalmente inadequadas que acarretam impactos diretos à saúde pública e à qualidade ambiental.

A análise temporal dos mapas mostra uma persistência dos focos de descarte, com variação de acúmulos entre os períodos, mas sem eliminação significativa das áreas críticas, destacando as áreas de preservação permanente. A integração entre a análise espacial e a quantitativa das tipologias de resíduos sólidos permite inferir um quadro persistente de vulnerabilidade ambiental no bairro Terra Nossa, caracterizado pela recorrência e diversidade de formas de descarte inadequado.

Análise espacial da densidade de resíduos sólidos no bairro Terra Nossa

Como complemento analítico, foi realizada a modelagem espacial por meio da estimativa de densidade Kernel para os pontos de disposição irregular de resíduos sólidos, apresentada na Figura 04, que qual possibilita a identificação de áreas críticas e a intensificação de padrões espaciais de concentração.

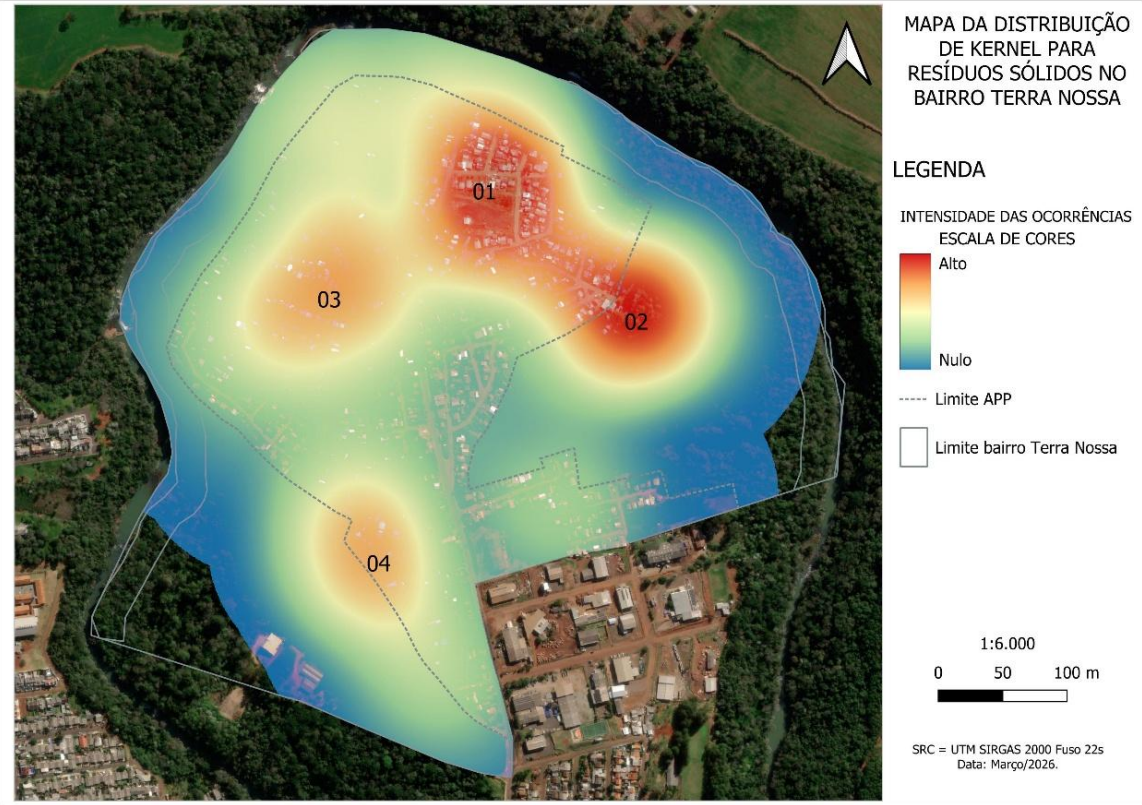


Figura 04: Mapa da distribuição de densidade de Kernel para resíduos sólidos no bairro Terra Nossa.
Fonte: Elaboração própria (2026)

Para melhor análise do mapa de distribuição, foram identificados com numeração as altas intensidades, bem como os pontos de disposição inadequada de resíduos sólidos, além de destacar o limite da área de preservação. Na Figura 04 acima exposta, a Área 01 insere-se em uma zona de avanço sobre Área de Preservação Permanente (APP), caracterizada por ocupação irregular nas proximidades do curso d'água. Observa-se a presença de edificações predominantemente em madeira, em processo de construção e reforma, o que resulta na geração e dispersão de resíduos da construção civil no entorno imediato das moradias.

No núcleo de maior intensidade da mancha de densidade, identifica-se uma área institucional com extensão de 7.176,42 m², destinada à implantação de um Centro Municipal de Ensino Infantil (CMEI) e de um parque infantil. Contudo, nas porções adjacentes, verifica-se a utilização do espaço para descarte irregular de resíduos, queima de materiais e armazenamento informal de insumos da construção civil, configurando um padrão de uso inadequado do solo e potencial agravamento de impactos ambientais locais.

A Área 02 situa-se integralmente em APP, sendo identificada como Ocupação dos Pinus, composta por aproximadamente 33 edificações. O serviço de coleta de resíduos sólidos não atende essa localidade, em razão da inacessibilidade para veículos de grande porte, decorrente da inserção das moradias em meio ao maciço de pinus.

Em vistoria *in loco*, constatou-se que os resíduos são descartados de forma difusa entre as edificações, bem como acumulados em pontos específicos e posteriormente queimados. Verificou-se ainda a presença significativa de resíduos têxteis enterrados, que, com o tempo, tornam-se novamente expostos, além de resíduos volumosos, como mobiliário e carcaças de eletrodomésticos, cuja remoção é dificultada pelas condições de acesso.

A área 03 recebeu infraestrutura posterior, devido ao processo de regularização desta área que pertencia a uma propriedade particular na época da invasão. Nesse local há duas áreas com restrição de ocupação, que apresentam vários pontos de acúmulo de resíduos sólidos, de queima e de carcaças de automóveis. A Área 04 apresenta intensidade intermediária de ocorrências, representada por tonalidades entre laranja e amarelo, associada à elevada concentração de resíduos sólidos dispostos em área de proteção ambiental, especialmente ao longo da via que delimita o bairro em relação às áreas naturais.

Nesse limite territorial, identificam-se duas condições distintas de uso e conservação. No primeiro trecho, o bairro confronta-se com o Parque Ambiental Irmão Cirilo, cuja área se encontra preservada e protegida por cercamento, o que restringe o acesso e inibe o descarte irregular. Em contrapartida, a partir do término dessa área protegida e início da Área de Preservação Permanente (APP), verifica-se a ausência de barreiras físicas ou mecanismos de controle, resultando na formação de clareiras e na deposição contínua de resíduos ao longo de todo o limite.

No contexto geral das observações no bairro Terra Nossa foi identificado que parcela significativa das residências não dispõe de calçadas pavimentadas, sendo comum a presença de faixas de solo exposto ou cobertura vegetal entre o meio-fio e os limites das propriedades. Nesses espaços, foram identificados diversos recipientes plásticos de pequeno porte, como tampas de garrafas e fragmentos de objetos, dispersos no ambiente, os quais contribuem para a degradação ambiental e favorecem a formação de criadouros potenciais do vetor da dengue.

Sob a perspectiva da gestão adequada de resíduos, os materiais identificados em locais inapropriados poderiam, mediante orientação técnica e ações de educação ambiental, ser submetidos à higienização e encaminhados à coleta seletiva de recicláveis. Resíduos volumosos, como mobiliários e eletrodomésticos, bem como resíduos orgânicos provenientes de poda e limpeza de lotes, deveriam ser destinados a ecopontos ou recolhidos por serviços de zeladoria municipal, conforme diretrizes de manejo integrado de resíduos sólidos.

Sob a perspectiva analítica, a avaliação dos dados obtidos permitiu a identificação de padrões recorrentes relacionados à disposição inadequada de resíduos sólidos no bairro e os quais podem ser sintetizados nos seguintes aspectos: (1) O descarte irregular apresenta caráter difuso e contínuo ao longo de toda a área de estudo, não sendo observadas zonas consolidadas de redução dessa prática; as maiores concentrações ocorrem predominantemente nas calçadas adjacentes às residências; (2) Verifica-se uma dinâmica temporal nas tipologias de resíduos, possivelmente associada às ações pontuais de manejo, como mutirões de limpeza e recolhimento de materiais volumosos, que promovem reduções momentâneas em determinadas categorias; (3) A presença recorrente de resíduos volumosos evidencia a insuficiência de sistemas estruturados para o recebimento e a destinação adequada desses materiais, reforçando a necessidade de ampliação de políticas de educação ambiental articuladas a soluções operacionais específicas; (4) Ainda que se observe redução em algumas tipologias ao longo do período analisado, o volume total de resíduos permanece expressivo, mantendo condições ambientais favoráveis à proliferação de vetores e, consequentemente, à persistência de riscos sanitários.

Em síntese, os padrões identificados evidenciam que a disposição inadequada de resíduos sólidos no bairro Terra Nossa se configura como um processo persistente, difuso e estrutural, distribuído de forma contínua no território. Ainda que ações pontuais, como mutirões de limpeza, promovam reduções temporárias em determinadas tipologias, tais intervenções não se mostram suficientes para alterar de maneira duradoura a dinâmica de geração e descarte irregular.

A recorrente presença de resíduos volumosos e a manutenção de volumes expressivos de materiais descartados indicam lacunas tanto na oferta de infraestrutura e serviços de manejo quanto na efetividade das estratégias de educação ambiental. Nesse contexto, consolida-se um cenário que favorece a vulnerabilidade ambiental e a permanência de condições propícias à proliferação de vetores, reforçando a necessidade de abordagens integradas, contínuas e estruturais no âmbito da gestão de resíduos sólidos e da saúde pública.

Comentários finais

Conforme esta análise, nota-se que, embora no município de Francisco Beltrão tivesse cenário epidêmico de dengue em 2024, seguido por uma redução no número de casos em 2025, o bairro Terra Nossa manteve, em ambos os períodos, elevados índices de ocorrência da doença em comparação aos demais bairros. Essa persistência evidencia a existência de condicionantes locais que favorecem a manutenção do vetor, dentre os quais se destaca a disposição inadequada de resíduos sólidos. Nesse sentido, os resultados do estudo reforçam a necessidade de intervenções direcionadas, que articulem a gestão eficiente de resíduos, o planejamento urbano e ações contínuas de saúde ambiental, como forma de mitigar a vulnerabilidade do bairro à ocorrência de dengue.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Referências Bibliográficas

BEZERRA, Thiago Matos; MATOS, Cintia Chagas. Dengue no brasil: fatores socioambientais associados a prevalência de casos. **Arquivos de Ciências da Saúde da UNIPAR**, [S. l.], v. 27, n. 5, p. 2685–2698, 2023. DOI: 10.25110/arqsaude.v27i5.2023-035. Disponível em: https://unipar.openjournalsolutions.com.br/index.php/saude/article/v. Acesso em: 29 jul. 2025.

CATTANI, Yan Nonato; PONTES, Raquel Pereira; BOTASSIO, Diego Camargo; KOMESU, Daniel Kiyoyudi; BENEVENUTO, Rodolfo Gomes; OGASAVARA, Mario Henrique. Measuring the Health and Fiscal Outcomes of Solid Waste Management Operations by Intergovernmental Arrangements: The Case of Public Consortia in Brazil. **Heliyon**, v. 10, n. 4, p. e26032–e26032, 1 fev. 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26032 Disponível em: https://ssrn.com/abstract=4604833. Acesso em: 29 jul. 2025.

CIBOTTO, Bruna Maiara de Lima. **A relação entre o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos e a prevalência da dengue**. 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Limpas) - UNICESUMAR, Centro Universitário de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, Maceió, 2018. Disponível em: https://l1nq.com/2bxWn. Acesso em: 10 jun. 2025.

HELRIGLE, Helen Karen Leite; FREITAS, Kathynne Carvalho; DE PAULA, Cácia Régia; PINHEIRO, Raul Henrique Oliveira; PESSUTI, Fernando; PELAZZA, Bruno Bodin; FERRI, Lucila Pessuti. K. G.; *et al*. Disposição inadequada de resíduos sólidos no perímetro urbano de caiapônia (go) e sua associação com a dengue. **Itinerarius Reflectionis**, Jataí-GO., v. 15, n. 3, p. 01–21, 2019. DOI: 10.5216/rir.v15i3.59669. Disponível em: https://revistas.ufj.edu.br/rir/article/view/59669. Acesso em: 5 fev. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. Malha de setores censitários**: Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html. Acesso em: 12 jan 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html. Acesso em: 21 jun. 2025.

KIKUTI, Mariana; CUNHA, Geraldo m.; PAPLOSKI, Igor A. D.; KASPER, Amélia M.; SILVA, Monaise M. O.; TAVARES, Aline S.; CRUZ, aqueline S.; QUEIROZ, Tássia L.; RODRIGUES, Moreno S.; SANTANA, Perla M.; LIMA, Helena C. A. V.; CALCAGNO, Juan; TAKAHASHI, Daniele; GONÇALVES, André H. O.; ARAÚJO, Josélio, M. G.; GAUTHIER, Kristine; DIUK-WASSER, Maria A.; KITRON, Uriel; KO, Alberto L.; REIS, Mitermayer G.; RIBEIRO, Guilherme S. Spatial Distribution of Dengue in a Brazilian Urban Slum Setting: Role of Socioeconomic Gradient in Disease Risk. (2015) **PLOS Negl Trop Dis 9(7):** e0003937. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003937. Acesso em: 29 jul. 2025.

PEREIRA, Emile Danielly Amorim; DO CARMO, Cleber Nascimento; ARAUJO, Waleska Regina Machado; BRANCO, Maria dos Remédios Freitas Carvalho. Distribuição espacial de arboviroses e sua associação com um índice de desenvolvimento social e o descarte de lixo em São Luís, Maranhão, 2015 a 2019. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 27, e240017, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1980-549720240017.2. Acesso em: 29 jul. 2025.

PAZ, Diogo Henrique. Fernandes da; DA SILVA, Rodrigo Cândido Passos; NASCIMENTO, Crisleide Maria da Silva; ARAÚJO, Gabriea Valones Rodrigues de; TAVARES, Rosângela Gomes. Impactos ocasionados pela deposição Irregular dos resíduos de construção e Demolição no município de paulista –PE. In: EL-DEIR, S. G. et al. (Org.). **Resíduos Sólidos**: impactos socioeconômicos e ambientais. Recife: EDUFRPE, 2018. p. 104-120. Disponível em: http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede/bitstream/tede2/9184/2/Viviane%20Borges%20Dias.pdf. Acesso em: 21 de jun. de 2025.

RIZZATTI, Maurício; BATISTA, Natália Lampert ; SPODE, Pedro Leonardo Cezar; ERTHAL, Douglas Bouvier; FARIA, Rivaldo Mauro de; SCOTTI, Anderson Augusto Volpato; TRENTIN, Romario; PETSCH, Carina; COSTA, Iago Turba; QUOOS, João Henrique. Mapeamento da COVID-19 por meio da densidade de Kernel. **Metodologias e Aprendizado**, [S. l.], v. 3, p. 44–53, 2020. **DOI:** https://doi.org/10.21166/metapre.v3i0.1312 Disponível em: https://publicacoes.ifc.edu.br/index.php/metapre/article/view/1312. Acesso em: 23 mar. 2026.

SECRETARIA MUNICIPAL DE SAÚDE. Relatório anual de notificações de Dengue 2024 e 2025. Francisco Beltrão, 2026.

SILVERMAN, Bernard W. **Density Estimation for Statistics and Data Analysis**. London: Chapman and Hall, 1986. Disponível em: https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March02/Silverman/paper.pdf . Acesso de 03 de jan. de 2026.

SOBRAL, Marcos Felipe Falcão; SOBRAL, Ana Iza Gomes da Penha. Casos de dengue e coleta de lixo urbano: um estudo na Cidade do Recife, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S.l.], v. 24, n. 3, 2019. Disponível em: https://www.scielosp.org/article/csc/2019.v24n3/1075-1082/. Acesso em: 10 jun. 2025.

ENTRE SAÚDE E EXPOSIÇÃO: ANÁLISE DAS DOENÇAS DIARREICAS AGUDAS EM FLORIANÓPOLIS (2020-2025)

1 Mirella Klausen da Silveira, 2 Beatriz Silvestre Puchalski, 3 Giulianna Baron, 4 Alessandro Waterkemper
1 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: mirella.klausen@posgrad.ufsc.br; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: beatriz.puchalski@posgrad.ufsc.br; 3 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: giulianna.b@posgrad.ufsc.br; 4 Escola de Saúde Pública de Florianópolis, e-mail: alessandrow.med@gmail.com

Palavras-chave: Saúde pública; Saneamento básico; Doenças infecciosas gastrointestinais.

Resumo

Na saúde ou na doença, os corpos hídricos estão presentes na vida cotidiana. Nesse contexto, as doenças de veiculação hídrica (DVH), especialmente as diarreicas, destacam-se como importantes causas de mortalidade em escala global. Sua prevenção exige a compreensão das dinâmicas locais de ocorrência e exposição. Deste modo, este estudo analisou a incidência das doenças diarreicas agudas (DDA) no município de Florianópolis (2020-2025) em função das ocorrências registradas em unidades de saúde, relacionando-as à infraestrutura de esgotamento sanitário, sazonalidade e faixas etárias. Os resultados indicam crescimento contínuo e expressivo dos casos no período avaliado, com aumento de atendimentos em unidades específicas, tanto nas Unidades de Pronto Atendimento (UPAs), com destaque para a UPA Norte da Ilha (1.565 casos em 2020 para 12.824 em 2025), quanto nos Centros de Saúde (CS), como o CS Monte Cristo (410 casos em 2020 para 1.167 em 2023), acompanhado também pela progressiva centralização da demanda nessas unidades. A análise espacial indicou que áreas com alta concentração de casos frequentes coincidem com Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS), o que sugere que somente a disponibilidade da rede coletora não garante a adequação sanitária domiciliar. Barreiras econômicas também podem influenciar a adequação sanitária. Em paralelo, observou-se forte impacto nas regiões dependentes de sistemas descentralizados nas extremidades da ilha, onde o intenso adensamento populacional compromete a balneabilidade local. A estratificação por grupo etário evidenciou diferenças estatisticamente significativas na distribuição dos casos ao longo do período analisado ($p < 0,001$), indicando maior vulnerabilidade nas faixas etárias mais jovens. Adicionalmente, observou-se alta similaridade no comportamento dos casos entre crianças de 1 a 9 anos (coeficiente de Spearman, $rs = 0,86$; $p < 0,001$), enquanto a faixa “menor de 1 ano” apresentou correlação moderada ($rs = 0,64$; $p < 0,001$). Contudo, a limitação de dados agregados na faixa de "10 anos ou mais" aponta a necessidade de um detalhamento etário mais abrangente para avaliar devidamente os idosos, um grupo de risco frequentemente subestimado. Conclui-se que as irregularidades sistêmicas no saneamento atuam como fator determinante na dinâmica das DDA, evidenciando a urgência de universalização efetiva da infraestrutura, bem como a necessidade de aprimorar o monitoramento epidemiológico e os sistemas de tratamento frente a patógenos resistentes.

Introdução

A interação humana com os corpos hídricos vai além da subsistência, pois integra dimensões socioeconômicas, laborais e culturais que permeiam o cotidiano. O mesmo ambiente que fomenta a saúde mental e a prática de exercícios físicos (Ferreira; Profice, 2025) atua também como um vetor de exposição a doenças de veiculação hídrica (DVH) (Babuji *et al.*, 2023). Essa dualidade estabelece uma tensão entre o saneamento e a saúde pública, uma vez que a ausência de infraestrutura adequada compromete o potencial promotor de saúde desses ambientes.

Em escala global, as DVH permanecem como relevantes causas de morbidade e mortalidade, especialmente em países em desenvolvimento (Mpindou; Bueno; Ramón, 2021). Dentre as DVH, destacam-se as doenças infecciosas gastrointestinais que se manifestam por alterações fecais, frequentemente acompanhadas de náuseas, vômito, febre e dores abdominais. No ano de 2015, estima-se que a maior causa de mortes em escala mundial foi decorrente de doenças diarreicas, resultando no óbito de mais de 1,31 milhão de pessoas (Troeger *et al.*, 2017). Esse impacto ocorre de forma desigual, com maior vulnerabilidade entre crianças menores de cinco anos (Babuji *et al.*, 2023), grupo no qual, segundo a Organização Mundial da Saúde, as doenças diarreicas foram responsáveis por mais de 440 mil mortes anuais (OMS, 2024). Estes números alarmantes evidenciam a magnitude do problema, no entanto, para formular estratégias preventivas é necessária uma análise dos dados em escala local.

No Brasil, dentre as diversas DVH, destacam-se as doenças diarreicas agudas (DDA) (Ministério da Saúde, 2026). As DDA apresentam caráter multifatorial, incluindo causas infecciosas e não infecciosas (Moraes; Castro, 2014). Entre as causas infecciosas, destacam-se agentes bacterianos, virais e parasitários, que podem atuar por mecanismos como produção de enterotoxinas ou invasão da mucosa intestinal (Moraes; Castro, 2014), enquanto causas não infecciosas incluem, por exemplo, intolerâncias alimentares, uso de medicamentos e intoxicações. As DDAs estão associadas, sobretudo, às limitações no acesso a serviços adequados de saneamento básico. Apesar dos avanços nas últimas décadas, a diarreia ainda constitui um importante problema de saúde pública, diretamente relacionado à qualidade da água para consumo humano e às condições de higiene (Sanches, 2025).

No Estado de Santa Catarina, as DDA recebem atenção especial durante o período de verão, em função da ocorrência de surtos e da forte dependência da economia estadual do turismo na região costeira. Esse aumento populacional, associado ao maior uso das águas de recreação, intensifica a exposição da população a ambientes potencialmente contaminados (Mortari *et al.*, 2022). As águas recreacionais naturais, como as praias, são um importante vetor da doença devido ao contato direto dos

indivíduos com o corpo hídrico. As vias de exposição são pelas mucosas, ingestão não intencional, contato com cortes e escoriações na pele, além da inalação de aerossóis e respingos gerados pelas atividades aquáticas (OMS, 2021). Em Santa Catarina, os relatórios de balneabilidade do Instituto do Meio Ambiente (IMA) indicam que, em determinados períodos, mais de 30% dos pontos monitorados foram classificados como impróprios para banho (IMA, 2026).

Uma das cidades mais afetadas é a capital do Estado, Florianópolis (Vieira, 2025), devido ao elevado fluxo de visitantes nacionais e internacionais (Ministério do Turismo, 2025). Esse aumento populacional temporário, conhecido como população flutuante (Campanário, 2007), intensifica as entradas e saídas no sistema de saneamento, levando à operação próxima do limite e resultando em falhas, como interrupções no abastecimento. Nesse contexto, questiona-se se a ocorrência das DDAs está associada apenas às áreas de recreação ou a outros fatores, bem como quais grupos populacionais são mais afetados, reforçando a necessidade de compreender a distribuição dos casos.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a incidência das DDA no município de Florianópolis para o período de 2020 a 2025. A análise considera a distribuição espacial dos casos nas unidades de atendimento (Centros de Saúde e Unidades de Pronto Atendimento), além da relação com o acesso à rede de esgoto, bem como as diferenças de registros de casos entre faixas etárias distintas e a variação ao longo dos anos.

Materiais e Métodos

Levantamento dos dados e literatura

Os dados de registros de DDA utilizados no presente estudo foram disponibilizados pela Gerência de Vigilância Epidemiológica de Florianópolis (Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2026), em conformidade com os critérios estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 (BRASIL, 2017). O monitoramento e a análise basearam-se no número de atendimentos encerrados (CIDs: 09, A03, A04, A05, A06, A08, A084 e A085) nas Unidades de Pronto Atendimento (UPAs) Norte e Sul, bem como nos registros classificados como MDDA = “Sim”. Essas informações são consolidadas na Sala de Situação da Gerência de Vigilância Epidemiológica e no Sistema de Vigilância Epidemiológica da Doença Diarreica Aguda (SIVEP-DDA), ferramenta nacional voltada ao acompanhamento da tendência dos casos e à detecção precoce de surtos. Para a elaboração do mapa e a identificação da infraestrutura de esgotamento sanitário do município, utilizaram-se o mapa de abrangência disponibilizado pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN, 2023) e os dados geoespaciais referentes aos limites das áreas de abrangência dos Centros de Saúde e das Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS), disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Florianópolis. A classificação das áreas baseou-se na metodologia adotada por (Bezerra, 2024), considerou-se como sistema centralizado as regiões onde a rede de esgotamento sanitário já existe e encontra-se em efetiva operação. Por outro lado, foram classificadas como sistema descentralizado todas as demais áreas que não possuem o sistema operante, englobando desde regiões sem rede até áreas em fase de projeto, em obras ou com o sistema já implantado, mas sem operação.

Tratamento dos dados de casos de DDA e distribuição por faixa etária (2020 a 2025)

Para avaliar a distribuição dos casos de DDA por faixa etária, foram utilizados dados dos atendimentos registrados entre 2020 e 2025 no sistema de Monitoramento de DDA de Florianópolis, disponibilizados pela prefeitura municipal (Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2026). Os casos foram estratificados nas faixas etárias “menor de 1 ano”, “1 a 4 anos”, “5 a 9 anos” e “10 anos ou mais”, permitindo a identificação de padrões de diferenciação entre grupos e de variação temporal ao longo do período analisado. Os dados foram organizados em Excel e analisados em linguagem Python. A normalidade foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$), orientando a escolha dos testes estatísticos subsequentes. Para a comparação entre faixas etárias dentro de cada ano, empregaram-se os testes ANOVA One-way ou Kruskal-Wallis, conforme a distribuição dos dados. A variação temporal ao longo dos anos, para cada faixa etária, foi avaliada por meio de ANOVA de medidas repetidas ou teste de Friedman. Adicionalmente, a associação entre as faixas etárias foi investigada por meio da análise de correlação bivariada, utilizando o coeficiente de Spearman.

Resultados e discussão

Monitoramento de DDA em Florianópolis de 2020 a 2025

Entre 2020 e 2025, o monitoramento de DDA em Florianópolis evidenciou crescimento expressivo e contínuo dos registros, acompanhado por mudanças no perfil de distribuição entre os serviços de saúde. Segundo dados da Gerência de Vigilância Epidemiológica de Florianópolis (Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2026), em 2020 os atendimentos ainda se apresentavam relativamente distribuídos entre UPAs e Centros de Saúde (CS), com destaque para a UPA Norte da Ilha (1.565 casos; 18,5%) e UPA Continente (1.129; 13,4%), além da participação relevante da atenção básica, especialmente do CS Saco Grande (644; 7,6%) e CS Monte Cristo (410; 4,9%). Em contraste, unidades como CS Ribeirão da Ilha (4; 0,0%), CS Canto da Lagoa (3; 0,0%) e CS Jurerê (14; 0,2%) apresentaram baixa ocorrência.

A distribuição espacial observada sugere influência direta de fatores estruturais. Regiões com maior número de registros, como a área de abrangência do CS Monte Cristo, apresentam condições distintas daquelas com menor ocorrência, como Jurerê ou Ribeirão da Ilha (Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2026), incluindo presença de ocupações irregulares, maior adensamento populacional e limitações no tratamento de esgoto (Busato *et al.*, 2013; Instituto Trata Brasil, 2026). Nesses contextos, a maior proximidade entre domicílios e a exposição mais frequente a efluentes não tratados favorecem a manutenção de ciclos de transmissão fecal-oral no ambiente.

A diarreia aguda, definida pela redução da consistência das fezes e aumento da frequência evacuatória por período inferior a 14 dias (WGO, 2008), possui um quadro de etiologia diversa, incluindo causas infecciosas e não infecciosas (Moraes; Castro, 2014). No contexto epidemiológico observado, destaca-se a contribuição de agentes infecciosos, sobretudo vírus entéricos, como Norovírus e Rotavírus, frequentemente associados a surtos de origem hídrica e alimentar (Shi *et al.*, 2021). Estudos conduzidos em Santa Catarina demonstraram a presença desses vírus em águas superficiais e, inclusive, em água tratada, evidenciando limitações dos sistemas convencionais frente a patógenos mais resistentes (Mortari *et al.*, 2022).

O monitoramento rotineiro da qualidade da água microbiológica, realizado pelo Instituto do Meio Ambiente (IMA), é baseado em indicadores bacterianos (IMA, 2025), como *Escherichia Coli*, que nem sempre refletem adequadamente o risco associado a vírus entéricos. A literatura alerta que o foco exclusivo na pesquisa de coliformes totais e fecais apresenta limitações, pois esses indicadores bacterianos são menos tolerantes a condições adversas do que outros microorganismos (OMS, 2021). Patógenos emergentes e altamente resistentes, como os protozoários (*e.g.*, *Cryptosporidium*) são capazes de sobreviver por longos períodos no ambiente aquático (Mpindou; Bueno; Ramón, 2021). Por isso, mesmo em cenários com conformidade microbiológica aparente, pode haver circulação de patógenos capazes de desencadear surtos (Mortari *et al.*, 2022).

Em 2021, observou-se aumento dos atendimentos, com maior concentração nas UPAs, especialmente na UPA Continente (2.142 casos; 18,6%), UPA Norte da Ilha (1.880; 16,3%) e UPA Sul da Ilha (1.509; 13,1%), embora os CS ainda mantivessem participação relevante, com destaque para o CS Monte Cristo (684; 5,9%) e CS Saco Grande (603; 5,2%). A partir de 2022, houve intensificação dos casos e maior concentração nas UPAs. A UPA Norte da Ilha atingiu 4.620 casos (22,6%), enquanto a UPA Continente (3.627; 17,7%) e a UPA Sul da Ilha (2.894; 14,2%) também apresentaram aumento expressivo. Nos CS, apesar do aumento absoluto, houve redução proporcional, como observado no CS Monte Cristo (941; 4,6%) e CS Saco Grande (883; 4,3%). Em 2023, o crescimento foi ainda mais acentuado, com a UPA Norte da Ilha registrando 9.108 casos (25,1%), seguida pela UPA Continente (6.651; 18,3%) e UPA Sul da Ilha (6.270; 17,3%). Nos CS, Monte Cristo (1.167; 3,2%) e Saco Grande (960; 2,6%) também apresentaram aumento, possivelmente associado à ocorrência de surtos. Em 2024, manteve-se o elevado número de atendimentos, com destaque para a UPA Norte da Ilha (9.642; 26,5%), enquanto, em 2025, foi registrado o maior número de casos da série histórica, atingindo 12.824 atendimentos (38,1%), evidenciando forte centralização nas UPAs.

Durante a alta temporada, Florianópolis apresenta expressivo incremento populacional, podendo receber entre 2 e 2,5 milhões de pessoas, com pico geralmente observado no mês de janeiro (Dias *et al.*, 2025), o que amplia a pressão sobre os sistemas de saúde e saneamento. Paralelamente, os laudos de qualidade da água disponibilizados pelo IMA indicaram uma tendência histórica de comprometimento da balneabilidade, especialmente nos meses de verão, quando entre 30 e 35% dos pontos monitorados, a partir do ano de 2023, apresentaram-se impróprios para banho (IMA, 2026). Esse cenário foi agravado em janeiro de 2023, quando o índice atingiu 45,7%, período coincidente com o surto de Norovírus (IMA, 2026). Destaca-se que as áreas mais afetadas se concentram em regiões de maior densidade turística, particularmente no Norte da Ilha, coincidindo com a maior demanda por atendimentos na UPA dessa região. Esses registros reforçam a possível interação entre fatores ambientais, sanitários e demográficos na dinâmica de ocorrência das DDAs, especialmente em contextos de alta pressão sazonal.

O aumento dos atendimentos por DDA nas UPAs das regiões Norte e Sul da Ilha pode estar associado ao crescimento populacional do município. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), aponta que esse crescimento populacional ocorreu de forma concentrada em áreas específicas, principalmente na região Norte. Bairros como Ingleses e Rio Vermelho somaram, juntos, cerca de 40 mil novos moradores entre 2010 e 2022. Já o Campeche, situado na região Sul, também registrou aumento (10 mil habitantes), evidenciando um processo de crescimento em todo o território do município (IBGE, 2022).

Ainda, esse deslocamento progressivo para as UPAs não reflete apenas aumento da incidência, mas também a organização da rede assistencial. O crescimento populacional do município pode ter aumentado a pressão assistencial sobre os CS, dificultando o acesso em alguns momentos e contribuindo para o redirecionamento da demanda para as UPAs, que operam em regime 24 horas, ao contrário dos CS, com horários mais restritos. Esse padrão tende a se intensificar em períodos de maior fluxo populacional (*e.g.*, meses de verão), quando há aumento tanto da população quanto da procura por atendimento (Vieira, 2025). Além disso, a implantação de serviços como o Alô Saúde pode ter influenciado essa dinâmica, seja pela orientação da população quanto aos pontos de atendimento, seja pelo possível impacto no registro dos atendimentos.

A recorrência de maiores registros em determinadas áreas reforça a atuação de fatores estruturais. Em Florianópolis, embora o abastecimento de água seja próximo da universalização, o tratamento de esgoto ainda não atinge toda a população. No estado de Santa Catarina, cerca de 53,5% da população é atendida por rede de esgoto, o que evidencia a existência de lacunas importantes na infraestrutura sanitária (Instituto Trata Brasil, 2026). Esse cenário contribui para a manutenção de fontes de contaminação ambiental, sobretudo em áreas mais vulneráveis (*e.g.*, Monte Cristo), onde lançamentos irregulares e ligações clandestinas são mais frequentes, ampliando o risco de exposição a patógenos e ocorrência de casos de DDA registrados.

A Figura 01 espacializa os atendimentos de DDA por Centros de Saúde no ano de 2023, sobrepostos à infraestrutura de esgotamento sanitário e às ZEIS. A análise visual do mapa corrobora a influência das vulnerabilidades socioespaciais na incidência da doença. Nota-se que os CS com alta concentração de casos muitas vezes coincidem ou estão adjacentes às ZEIS, mesmo estando em regiões formalmente atendidas pelo sistema centralizado. Isso evidencia que a existência da rede coletora na rua não garante o tratamento efetivo. Embora a rede tenha sido instalada em bairros como o Monte Cristo, barreiras econômicas e estruturais dificultam a interligação domiciliar adequada e, muitas vezes, não há verificação de que a população efetivamente ligou suas redes domésticas ao sistema público. Como consequência, observa-se ligações clandestinas e o lançamento irregular de esgoto *in natura* na rede pluvial (CASAN, 2021). A persistência dessa dinâmica é confirmada por ações de fiscalização da CASAN, que atua em casos de irregularidades e vazamentos na região quanto por registros oficiais recentes. Em agosto de 2025, a Câmara Municipal de Florianópolis oficiou a concessionária exigindo reparos urgentes devido ao escoamento de esgoto a céu

aberto no bairro Monte Cristo, ressaltando o grave risco à saúde pública local (Câmara Municipal de Florianópolis, 2025). Tal cenário reflete diretamente a lacuna existente entre a disponibilidade da infraestrutura na via pública e a efetiva adequação sanitária das moradias.

Por outro lado, o mapa revela extensas porções do território que não possuem rede operante e dependem do sistema descentralizado. De acordo com a Vigilância Sanitária do município (Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2024), a adoção desses sistemas individuais de tratamento de efluente doméstico, tipicamente compostos por tanque séptico, filtro e sumidouro, é considerada adequada. Contudo, a realidade municipal esbarra em falhas críticas na construção e adequação desse tratamento individual. A gravidade desse cenário nas extremidades da ilha foi documentada por Gonçalves (2015), que ao analisar especificamente os Distritos Sanitários Norte e Sul de Florianópolis, constatou um aumento exponencial de casos de DDA diretamente relacionado à predominância de sistemas descentralizados ineficientes. O autor relata que a construção incorreta desses dispositivos e os lançamentos irregulares e clandestinos resultaram em forte impacto ambiental, culminando na perda histórica de balneabilidade em importantes praias turísticas dessas regiões, como Canasvieiras, Ingleses e Campeche (Gonçalves, 2015).

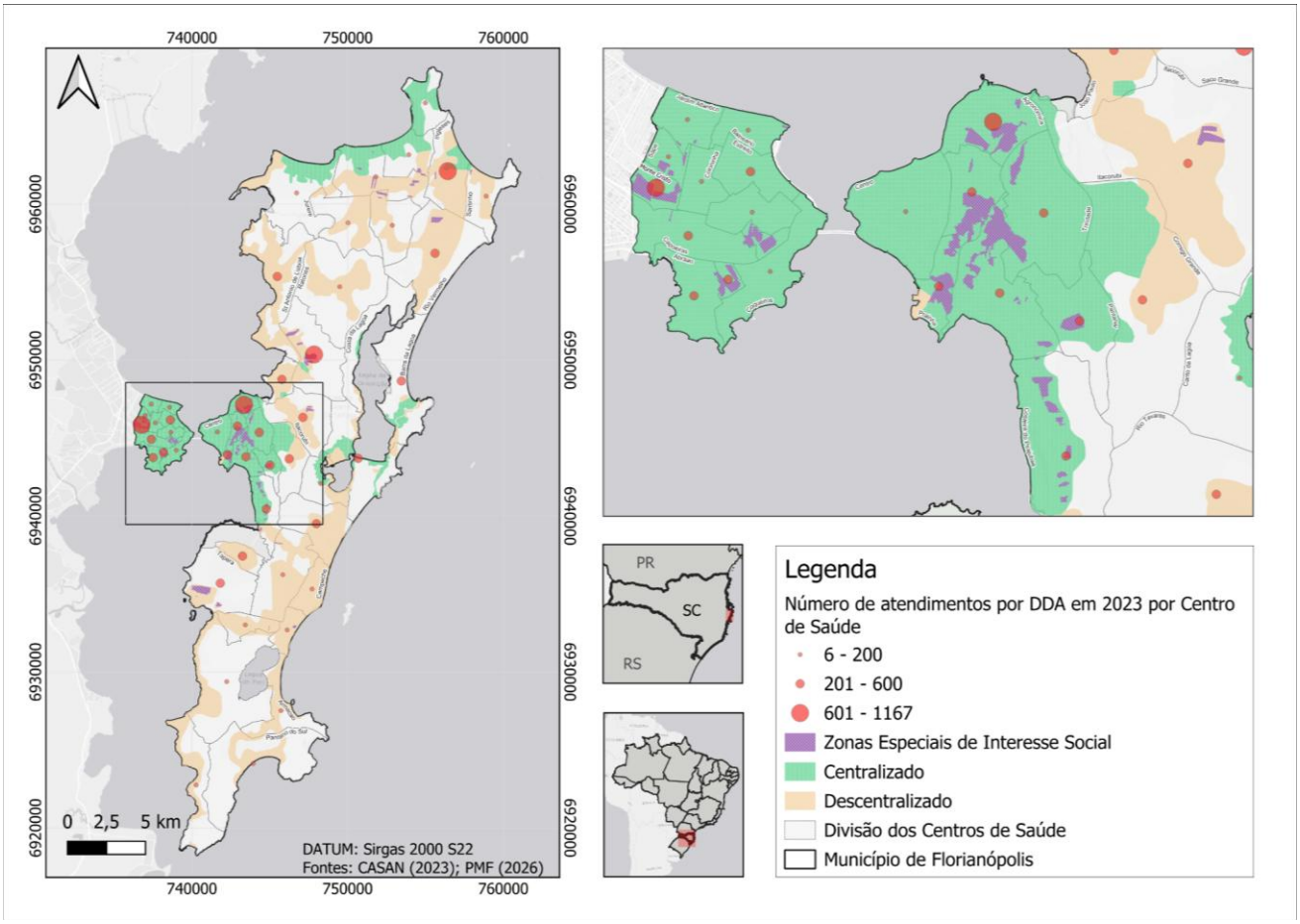


Figura 01: Atendimentos dos casos registrados de DDA por centro de saúde e infraestrutura sanitária no município de Florianópolis. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Como consequência dessas irregularidades sistêmicas, tanto nas áreas centralizadas, por falta de ligação, quanto nas descentralizadas, por saturação e clandestinidade, o efluente não tratado é lixiviado para o solo ou escoado diretamente para os corpos hídricos. Esse aporte contínuo de patógenos estabelece uma rota ambiental de exposição que retroalimenta o ciclo de transmissão das DDA. Tal dinâmica é agravada pela ineficácia da infraestrutura sanitária frente a patógenos resistentes, conforme apresentado por Mortari (Mortari, 2022). A autora detectou prevalência de Rotavírus e Norovírus nas águas superficiais e marinhas de Florianópolis, evidenciando que o recebimento de efluentes não tratados advindos de vazamentos, ligações clandestinas e inadequação da infraestrutura frente ao crescimento urbano atinge as áreas de banho. Como resultado, propiciam-se surtos severos que se intensificam substancialmente com o adensamento populacional na temporada turística.

Distribuição por faixa etária dos casos de DDA em Florianópolis de 2020 a 2025

Esse cenário de contaminação hídrica e pressão demográfica reflete-se diretamente na demanda por serviços de saúde, apresentando variações importantes conforme o perfil dos pacientes assistidos. Para compreender como esses surtos impactam a estrutura demográfica do município, a Figura 02 apresenta a distribuição dos casos de DDA, por faixa etária, entre o ano de 2020 e 2025.

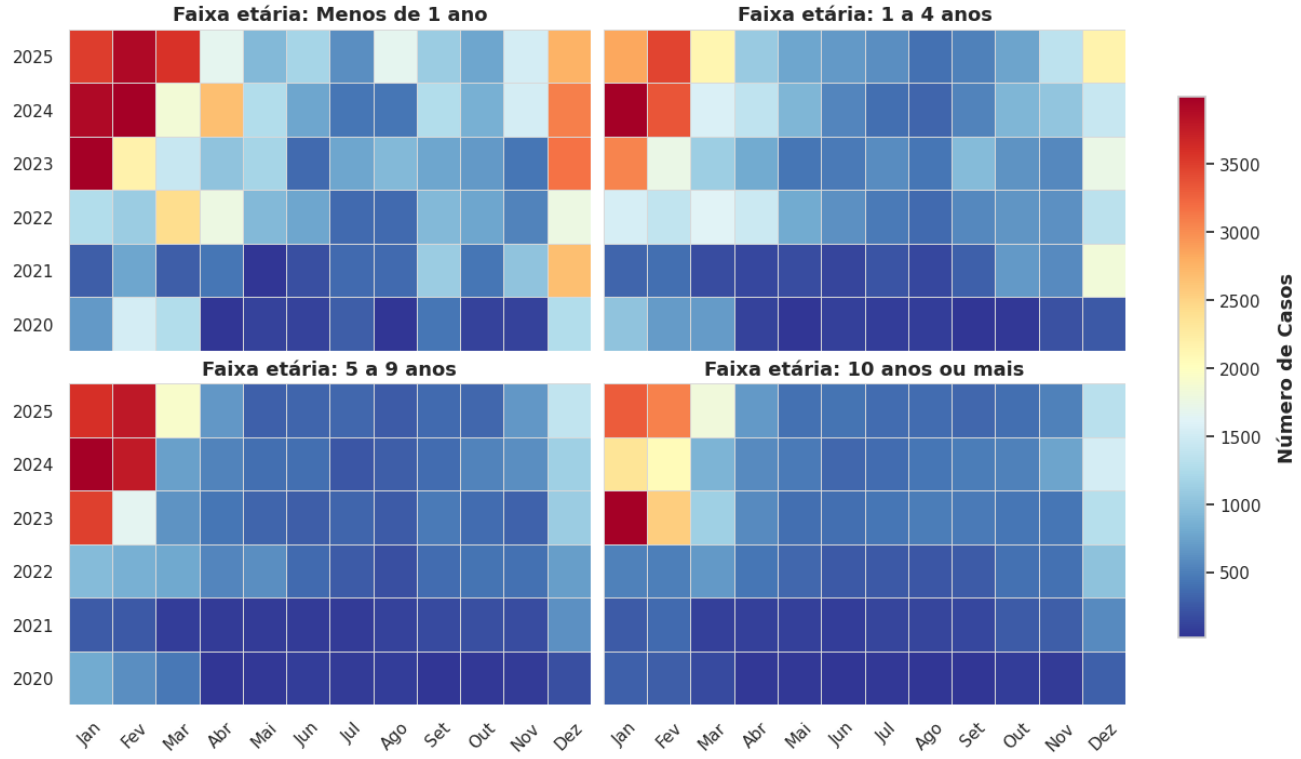


Figura 02: Distribuição por faixa etária dos casos registrados de DDA no município de Florianópolis, entre o ano de 2020 a 2025. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk indicou que os dados referentes a todas as faixas etárias ("menor de 1 ano", "1 a 4 anos", "5 a 9 anos" e "10 anos ou mais") não apresentaram distribuição normal ($p \leq 0,05$) ao longo do período analisado. Na comparação entre faixas etárias dentro de cada ano (2020-2025), observaram-se diferenças estatisticamente significativas (teste de Kruskal-Wallis, $p < 0,001$). De forma complementar, a análise temporal dentro de cada faixa etária também evidenciou variações significativas ao longo dos anos (teste de Friedman, $p < 0,001$), indicando que a incidência de casos de DDA não se manteve constante no período avaliado.

Em 2023 (Figura 02), observou-se aumento expressivo dos casos, especialmente no mês de janeiro, associado a surto de Norovírus (SeTIC-UFSC, 2023). Esse comportamento é consistente com a elevada transmissibilidade desses vírus e sua baixa dose infectante (Shi *et al.*, 2021). Em Florianópolis, esse padrão é intensificado durante o verão, quando o aumento da população decorrente do turismo pressiona os sistemas de abastecimento e esgotamento sanitário (Mortari *et al.*, 2022; Vieira, 2025).

A análise temporal indicou que o mês de dezembro não apresenta o mesmo padrão de crescimento observado nos meses subsequentes. Esse comportamento pode estar relacionado ao recesso escolar, que reduz a circulação de crianças em ambientes coletivos, além do deslocamento de famílias para fora do município. Padrão semelhante foi descrito na região oeste de Santa Catarina, onde se observou leve declínio na incidência nesse período (Busato *et al.*, 2013).

A análise de correlação bivariada, considerando todas as semanas epidemiológicas e anos combinados, evidenciou associações positivas e estatisticamente significativas entre todas as faixas etárias ($p < 0,001$ em todas as combinações). As correlações mais elevadas foram observadas entre as faixas "1 a 4" e "5 a 9" ($rs = 0,86$), seguidas por "5 a 9" e "10 ou mais" ($rs = 0,81$) e "1 a 4" e "10 ou mais" ($rs = 0,80$), indicando alta similaridade no comportamento dessas faixas (Hermans; van der Pas; Evenhuis, 2011).

A faixa "menor de 1 ano" apresentou correlação moderada ($rs = 0,64$) (Hermans; van der Pas; Evenhuis, 2011), sugerindo comportamento parcialmente distinto. Por outro lado, crianças entre 1 e 9 anos tendem a apresentar maior exposição e contato em ambientes coletivos, o que favorece a transmissão de agentes infecciosos. Segundo Babuji et al. (2023), determinados grupos populacionais apresentam maior vulnerabilidade às DVH, incluindo crianças e gestantes, em função de maior suscetibilidade a contaminantes presentes na água. Por outro lado, embora menos explorado (Figura 02), indivíduos idosos também podem representar um grupo de risco relevante, sendo DDAs uma condição frequentemente subestimada nessa faixa-etária, apesar de seu impacto significativo (Zhao *et al.*, 2025). Além disso, a maior vulnerabilidade observada nessas faixas etárias não se limita a aspectos biológicos, podendo estar também associada a condições sociais e sanitárias. Em áreas com menor cobertura de esgotamento sanitário e maior vulnerabilidade socioeconômica, a exposição a fontes contaminadas é mais frequente, o que contribui para a manutenção de maiores taxas de DDA nesses grupos.

Quando estratificadas por ano, as correlações permaneceram predominantemente significativas, porém com variações na intensidade das associações. Em 2020, todas as faixas obtiveram diferenças significativas ($p < 0,001$), com as faixas "menos de 1" e "1 a 4" obtendo uma baixa correlação ($rs = 0,45$) e as faixas restantes variando entre $rs = 0,55$ e $rs = 0,63$, classificadas

com uma correlação moderada (Hermans; van der Pas; Evenhuis, 2011). Em 2021, observou-se maior heterogeneidade, com redução das correlações envolvendo a faixa "menos de 1 ano", como nas comparações com "5 a 9 anos" (rs = 0,30; p = 0,0299) e "10 anos ou mais" (rs = 0,39; p = 0,0047), sugerindo baixa correlação desse grupo naquele ano (Hermans; van der Pas; Evenhuis, 2011). Nos anos subsequentes, verificou-se altas correlações, com destaque para a relação entre "1 a 4 anos" e "5 a 9 anos", que apresentou valores elevados e consistentes (rs = 0,82 em 2022; rs = 0,79 em 2023; rs = 0,74 em 2024; rs = 0,78 em 2025; todos com p < 0,001). De forma semelhante, as correlações entre "5 a 9 anos" e "10 anos ou mais" mantiveram-se moderadas a altas (Hermans; van der Pas; Evenhuis, 2011) ao longo do período (rs entre 0,60 e 0,76; p < 0,001).

Considerações finais

Em escala global, os impactos das DDAs são amplamente reconhecidos. No entanto, a formulação de estratégias eficazes exige a análise em escala local. Este trabalho analisou os dados de ocorrência de DDA nos postos de saúde públicos do município de Florianópolis no período de 2020 a 2025. Observou-se aumento contínuo e expressivo dos casos de DDA em Florianópolis nos anos avaliados, acompanhado por mudança no perfil assistencial, com progressiva centralização dos atendimentos nas UPAs, especialmente na região Norte da Ilha.

A análise por faixa etária indicou maior vulnerabilidade em crianças, com comportamento distinto em menores de 1 ano. No entanto, como idosos também constituem um grupo de risco (Zhao et al., 2025), recomenda-se a adoção de uma estratificação etária mais detalhada, a fim de aprimorar o monitoramento. Trata-se de uma medida de fácil implementação e sem custos adicionais, que amplia a compreensão sobre os impactos na população adulta. Ademais, sugere-se a inclusão específica do grupo de gestantes, dada sua relevância como população vulnerável (Babuji et al., 2023).

Destaca-se que este estudo apresenta limitações quanto ao estabelecimento de nexo causal entre o aumento dos casos de DDA e um possível colapso hidrossanitário. Fatores como crescimento populacional, turismo, sazonalidade, diferenças no acesso e na procura por serviços de saúde, além das condições de saneamento básico e socioeconômicas, podem estar associados à elevação dos registros.

Nesse contexto, o aumento populacional na alta temporada e a piora dos índices de balneabilidade, especialmente no verão de 2023, reforçam a influência de fatores ambientais na dinâmica das DDA. Os resultados apontam para a necessidade de fortalecimento das ações de saneamento e vigilância, especialmente em períodos de maior pressão populacional, bem como para o aprimoramento do monitoramento da qualidade da água, ainda predominantemente baseado em indicadores bacterianos, que podem não refletir adequadamente a presença de patógenos virais.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES-PROEX), por meio da concessão de bolsas de doutorado em Engenharia Ambiental a Mirella Klausen da Silveira, Beatriz Silvestre Puchalski e Giulianna Baron. Alessandro Waterkemper agradece ao Ministério da Saúde pela concessão de bolsa, bem como à Secretaria Municipal de Saúde de Florianópolis concedida no período de Residência em Medicina de Família e Comunidade (MFC).

Referências Bibliográficas

BABUJI, Preethi *et al.* Human Health Risks due to Exposure to Water Pollution: A Review. **Water**, [*s. l.*], vol. 15, nº 14, p. 2532, 2023.

BEZERRA, Gilles Giovani. **Sistematização da identificação da rede de serviço associada ao tratamento descentralizado de esgoto em Florianópolis, SC**. 2024. Monografia - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

BRASIL. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017.** 2017. Disponível em: https://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf.

BUSATO, Maria Assunta *et al.* DISTRIBUIÇÃO DE DOENÇAS DIARREICAS AGUDAS EM MUNICÍPIOS DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, [*s. l.*], vol. 9, nº 16, p. 18–27, 2013.

CÂMARA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **OFÍCIO N.º 00455/2025**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2025. Disponível em: https://www.cmf.sc.gov.br/proposicoes/oficios/0/1/0/108249. Acesso em: 29 abr. 2026.

CAMPANÁRIO, Paulo. **Florianópolis: dinâmica demográfica e projeção da população por sexo, grupos etários, distritos e bairros (1950-2050).** [*S. l.*]: Instituto de Planejamento de Florianópolis, 2007.

CASAN. **Blitz fiscaliza esgoto irregular em sete bairros, com lacres no Campeche, na Barra da Lagoa e no San**. [*S. l.*], 2021. Governamental. Disponível em: https://www.casan.com.br/noticia/index/url/blitz-fiscaliza-esgoto-irregular-em-sete-bairros-com-lacres-no-campeche-na-barra-da-lagoa-e-no-san. Acesso em: 29 abr. 2026.

CASAN. **Mapa de Abrangência do Sistema de Esgotamento Sanitário de Florianópolis**. Florianópolis: [*s. d.*], 2023. Disponível em: https://geoportal.pmf.sc.gov.br/downloads/camadas-em-sig-do-mapa.

DIAS, Julio da Silva *et al.* Estimating floating population based on the impact of solid waste generation. **Current Issues in Tourism**, [*s. l.*], vol. 0, nº 0, p. 1–17, 2025.

FERREIRA, Damile de Jesus; PROFICE, Christiana Cabicieri. ESPAÇOS AZUIS EM CENTROS URBANOS: AMBIENTES RESTAURADORES E BEM-ESTAR HUMANO. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, [*s. l.*], vol. 14, nº 9, p. e2762–e2762, 2025.

GONÇALVES, Daniel Lopes. **RELAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO COM A INCIDÊNCIA DE DOENÇAS DIARREICAS AGUDAS NOS DISTRITOS SANITÁRIOS NORTE E SUL DO MUNICÍPIO DE FLORIANÓPOLIS**. 2015. Monografia - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

HERMANS, Heidi; VAN DER PAS, Femke H.; EVENHUIS, Heleen M. Instruments assessing anxiety in adults with intellectual disabilities: A systematic review. **Research in Developmental Disabilities**, [*s. l.*], vol. 32, nº 3, p. 861–870, 2011.

IBGE. **Censo 2022: População e Domicílios - Primeiros Resultados.** [*S. l.*]: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2022.

IMA. **BALNEABILIDADE**. [*S. l.*], 2026. Disponível em: https://balneabilidade.ima.sc.gov.br/. Acesso em: 27 abr. 2026.

IMA. **Cronogramas de Coletas**. [*S. l.*], 2025. Disponível em: https://www.ima.sc.gov.br/index.php/qualidade-ambiental/balneabilidade/cronogramas-e-coletas. Acesso em: 3 nov. 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Benefícios econômicos da expansão do saneamento em Santa Catarina**: Trata Brasil. [*S. l.*]: Exante - Consultoria Econômica, 2026.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Doenças diarreicas agudas (DDA)**. [*S. l.*], 2026. Governamental. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/d/dda/doencas-diarreicas-agudas-dda. Acesso em: 23 abr. 2026.

MINISTÉRIO DO TURISMO. **Santa Catarina registra crescimento de 71,7% na chegada de turistas internacionais em 2024**. [*S. l.*], 2025. Governamental. Disponível em: https://www.gov.br/turismo/pt-br/assuntos/noticias/santa-catarina-registra-crescimento-de-71-7-na-chegada-de-turistas-internacionais-em-2024. Acesso em: 27 abr. 2026.

MORAES, Antônio Carlos; CASTRO, Fernando M. M. Diarreia Aguda. **Jornal Brasileiro de Medicina**, [*s. l.*], vol. 102, 2014.

MORTARI, Andreza Magnabosco. **Estudo da correlação de indicadores básicos de saúde com a ocorrência de Norovírus e Rotavírus em águas superficiais, de consumo humano e/ou área de malacocultura em Santa Catarina, Brasil.** 2022. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

MORTARI, Andreza *et al.* Norovirus and rotavirus in surface, malacoculture, and human consumption water in Santa Catarina State, Brazil. **Journal of Water and Health**, [*s. l.*], vol. 21, nº 1, p. 35–46, 2022.

MPINDOU, Gilver Odilon Mendel Kombo; BUENO, Ignacio Escuder; RAMÓN, Estela Chordà. Review on Emerging Waterborne Pathogens in Africa: The Case of Cryptosporidium. **Water**, [*s. l.*], vol. 13, nº 21, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/13/21/2966. Acesso em: 22 abr. 2026.

OMS. **Diarrhoeal disease**. [*S. l.*], 2024. Disponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diarrhoeal-disease. Acesso em: 22 abr. 2026.

OMS, World Health Organization. **Guidelines on recreational water quality. Volume 1: coastal and fresh waters**. [*S. l.*]: World Health Organization, 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Monitoramento de DDA em Florianópolis**. [*S. l.*], 2026. Governamental. Disponível em: https://salasituacaofpolis.shinyapps.io/painel_mdda/#section-mapa-epidemiol%C3%B3gico. Acesso em: 27 abr. 2026.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Vigilância Sanitária - OT 02 - Concepção Tratamento Esgoto**. [*S. l.*], 2024. Governamental. Disponível em: https://www.pmf.sc.gov.br/entidades/vigsanitaria/index.php?cms=orientacoes+tecnicas&menu=6&submenuid=1662. Acesso em: 30 abr. 2026.

SETIC-UFSC. UFSC identifica Norovírus em epidemia de diarreia em Florianópolis; vírus pode estar na água e alimentos. *In*: NOTÍCIAS DA UFSC. 21 jan. 2023. Disponível em: https://noticias.ufsc.br/2023/01/ufsc-identifica-norovirus-em-epidemia-de-diarreia-em-florianopolis/. Acesso em: 27 abr. 2026.

SHI, Danyang *et al.* Levels of human Rotaviruses and Noroviruses GII in urban rivers running through the city mirror their infection prevalence in populations. **Science of The Total Environment**, [*s. l.*], vol. 754, p. 142203, 2021.

TROEGER, Christopher *et al.* Estimates of global, regional, and national morbidity, mortality, and aetiologies of diarrhoeal diseases: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. **The Lancet Infectious Diseases**, [*s. l.*], vol. 17, nº 9, p. 909–948, 2017.

VIEIRA, Rafael dos Reis. **Surtos epidêmicos de gastroenterites no verão em Florianópolis: uma análise epidemiológica e importância do cuidado farmacêutico na farmácia privada.** 2025. Monografia - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.

WGO. **Guia Prática da Organização Mundial de Gastroenterologia: Diarréia Aguda**. [*S. l.*]: World Gastroenterology Organisation, 2008.

ZHAO, Wen-Zhuo *et al.* Global burden of diarrhea disease in the older adult and its attributable risk factors from 1990 to 2021: a comprehensive analysis from the global burden of disease study 2021. **Frontiers in Public Health**, [*s. l.*], vol. 13, 2025. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/public-health/articles/10.3389/fpubh.2025.1541492/full. Acesso em: 22 abr. 2026.

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA INCIDÊNCIA DE DENGUE NO SUL DO BRASIL: UM ESTUDO NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

1 Pedro Ernesto Machado Pare, 2 Caroline Wagner
1 Universidade Federal do Pampa, e-mail: pedropare.aluno@unipampa.edu.br; 2 Universidade Federal do Pampa, e-mail: carolinewagner@unipampa.edu.br;

Palavras-chaves: Dengue; mudanças climáticas; incidência epidemiológica.

Resumo

A dengue é uma arbovirose de grande relevância em saúde pública, cuja incidência tem sido associada a fatores climáticos, especialmente à temperatura e à pluviosidade. Este estudo teve como objetivo avaliar a relação entre variáveis climáticas e a incidência de dengue no município de Caçapava do Sul, bem como os dados de incidência e mortalidade de Santa Maria e Cachoeira do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizados dados secundários de casos de dengue e variáveis meteorológicas, incluindo temperatura mínima, temperatura máxima e precipitação acumulada, ao longo de uma série histórica. A análise estatística foi realizada por meio do coeficiente de correlação de Pearson, com o objetivo de identificar possíveis associações entre as variáveis. Os resultados indicaram correlação negativa fraca a moderada entre a temperatura mínima e a incidência de dengue ($r = -0{,}3536$), correlação positiva muito fraca entre a temperatura máxima e a incidência de dengue ($r = 0{,}111$) e correlação positiva fraca entre a pluviosidade e a incidência de dengue ($r = 0{,}339$). No entanto, nenhuma das correlações apresentou significância estatística ($p > 0{,}05$). Os achados sugerem que, embora exista uma tendência de associação entre variáveis climáticas e a incidência da doença, essas variáveis, isoladamente, não explicam de forma significativa a dinâmica da dengue na escala temporal do município de Caçapava do Sul. A ausência de significância pode estar relacionada à utilização de dados agregados em escala anual e à não consideração de defasagens temporais entre os fatores climáticos e a resposta epidemiológica. Dessa forma, destaca-se a necessidade de abordagens mais robustas, com maior detalhamento temporal e a inclusão de variáveis socioambientais, para uma melhor compreensão da dinâmica da dengue na região. Os resultados reforçam o caráter multifatorial da doença e contribuem para o aprimoramento de estratégias de monitoramento e controle do vetor.

Introdução

No Brasil, estudos demonstram a correlação entre fatores climáticos e a incidência da dengue. Geraldini (2024) observou que um aumento de 1 °C na temperatura média pode elevar a incidência da doença em até 40% em Campinas-SP. Em Foz do Iguaçu-PR e Maceió-AL, verificou-se uma correlação positiva entre os casos de dengue e a umidade e a pluviosidade (Meira et al., 2021). Além disso, desastres ambientais, como o ocorrido em Brumadinho em 2019, também demonstraram potencializar surtos da doença (FURGERI; DIAS; WAGNER, 2022). O estado do Rio Grande do Sul, historicamente menos afetado pela dengue em comparação com outras regiões do país, tem registrado um aumento significativo no número de casos nos últimos anos (RUBLESCKI, 2024). Fatores como o aumento das temperaturas médias, casos recorrentes de emergência climática causando cheias históricas, o desmatamento, a urbanização acelerada e o maior fluxo de viajantes têm contribuído para essa tendência preocupante em relação a relevantes crises sanitárias, como o aumento da incidência de casos e óbitos por dengue no estado (RIO GRANDE DO SUL, 2024).

A região central do Rio Grande do Sul, que abrange, entre outros, os municípios de Caçapava do Sul, Santa Maria e Cachoeira do Sul, apresenta importância econômica e ambiental significativa. A economia regional é diversificada, destacando-se a mineração e a pecuária em Caçapava do Sul, os serviços, a educação e a logística em Santa Maria, e o agronegócio, especialmente o arroz e a soja, em Cachoeira do Sul. Do ponto de vista climático, predomina o clima subtropical úmido (Cfa), com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, verões quentes e invernos frios com ocorrência de geadas. A precipitação média anual varia entre 1.400 e 1.700 mm, condição que favorece a produção agrícola e pecuária da região. Além disso, a área está sujeita a estiagens e eventos climáticos extremos, que influenciam diretamente as atividades econômicas locais.

O Aedes aegypti, mosquito transmissor da dengue, passa por um ciclo de desenvolvimento que inclui fases aquáticas — ovo, larva e pupa — e a fase adulta, terrestre. As fêmeas do mosquito depositam seus ovos preferencialmente em recipientes com água parada. Schreiber (2001) sugere que o aumento da temperatura pode reduzir o período de alimentação da fêmea do Aedes, aumentando a incidência de picadas e, consequentemente, a transmissão da dengue. Da Silva (2025) aponta que, com as mudanças climáticas, regiões que apresentavam temperaturas inadequadas à sobrevivência do mosquito passaram a se tornar ambientes propícios à sua reprodução. As mudanças climáticas, manifestadas pelo aumento das temperaturas globais e pelas alterações na precipitação, impactam diretamente a propagação de arboviroses. Estimativas indicam que, até 2085, entre 50% e 60% da população global residirá em áreas de risco de transmissão da dengue (CODEÇO, 2001; HALES et al., 2002). O IPCC (2022) reforça que o aumento da temperatura e da umidade amplia a distribuição geográfica do *Aedes aegypti*.

Se o aumento da temperatura pode agravar a incidência de dengue em áreas com climas tropicais quentes e úmidos, isso sugere que a febre dengue pode se expandir para regiões mais frias que devem aquecer devido às mudanças climáticas (GERALDINI, 2022). Dados epidemiológicos recentes indicam um crescimento expressivo dos casos de dengue no estado do Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2026), o que evidencia a necessidade urgente de medidas eficazes para compreender o perfil de transmissão da doença e as variáveis ambientais envolvidas para conter a propagação da doença.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar se mudanças nos padrões climáticos podem contribuir para o aumento dos casos de dengue observados nos municípios de Cachoeira do Sul, Caçapava do Sul e Santa Maria, localizados na região central do estado do RS. Para isso, foram coletados dados de uma série histórica de casos de dengue, obtidos na plataforma DATASUS, e dados climáticos (temperaturas mínimas e máximas e pluviosidade), obtidos no portal oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Metodologia

Os dados epidemiológicos referentes à dengue — incluindo número de casos, complicações da doença, casos de febre hemorrágica e óbitos, por ano, foram obtidos no sistema DATASUS, por meio das plataformas SIH/SUS e SINAN, abrangendo o período de 2001 a 2025. Para os dados de incidência, utilizaram-se os registros de notificações por ano de cada um dos municípios avaliados. Após foi calculada a taxa de incidência a partir da população anual dos municípios, estes dados foram coletados no IBGE e no SIDRA-IBGE. A partir destes dados, foi utilizada a equação:

$$\text{Incidência dengue por ano} = \frac{\text{Número de notificações por município (ano)}}{\text{População (ano)}} \times 100.000$$

Para os dados de complicações, foram coletados dados de internações a partir da evolução do caso, sendo separados os casos de dengue hemorrágica e de dengue com complicações, conforme dados disponibilizados no TABNET-DATASUS.

As informações climáticas do município de Caçapava do Sul, compostas por registros de temperaturas mínimas e máximas e de índices de pluviosidade, foram coletadas com base em dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), provenientes do Banco de Dados Meteorológicos do INMET (BDMEP), obtidos da estação de monitoramento no município avaliado. Não há dados climatológicos para toda a série histórica devido à estação meteorológica ter entrado em operação em períodos mais recentes, portanto, foram coletados dados de 2014 a 2025 que eram disponibilizados pela estação do município.

Resultados e Discussão

Os resultados sugerem um aumento na incidência de dengue nos municípios avaliados, especialmente a partir de 2020. Conforme a Figura 1, observa-se um aumento expressivo na incidência de casos de dengue a partir de 2021 nos três municípios avaliados. O município de Caçapava do Sul (figura 1A) apresentou crescimento no número de casos nos últimos anos, com a incidência máxima de 35,81 casos/100 mil habitantes em 2024. Cachoeira do Sul (Figura 1B) apresentou a incidência máxima em 2025, com 3.749,8 casos por 100 mil habitantes. Já Santa Maria (Figura 1C) apresentou incidência máxima em 2024, com 2.161,25 casos/100 mil habitantes. Cachoeira do Sul e Santa Maria apresentaram um aumento mais expressivo, provavelmente devido ao desenvolvimento urbano mais acentuado e à maior densidade populacional. Conforme dados do último Censo (IBGE), o município de Cachoeira do Sul tem uma população estimada de 82.222 pessoas e densidade demográfica de 21,43 hab/km², Santa Maria, 271.735 pessoas e densidade demográfica de 152,64 hab/km², e Caçapava do Sul, 32.515 cidadãos, com densidade demográfica de 10,67 hab/km² .

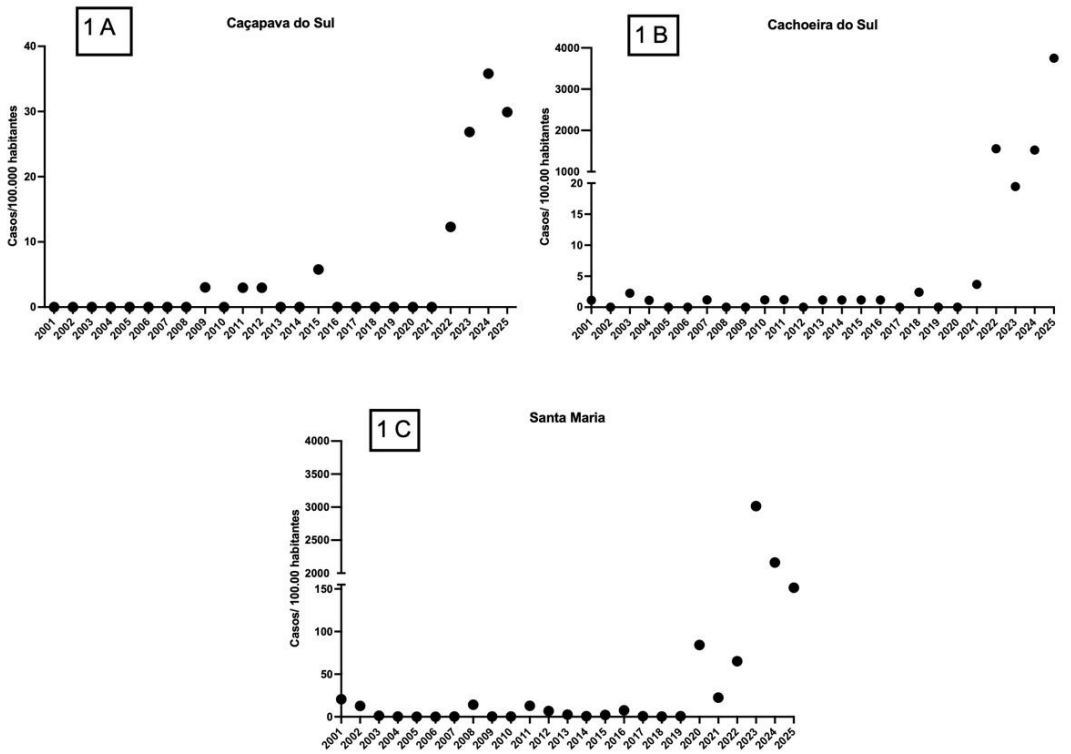


Figura 1 - Incidência de dengue nos municípios de Caçapava do Sul, Santa Maria e Cachoeira do Sul. Fonte: Autores

Já na Figura 2, observa-se o desenvolvimento de complicações decorrentes da dengue, como a dengue grave e a febre hemorrágica. Apesar de os municípios avaliados apresentarem historicamente baixa prevalência de complicações e de casos de febre hemorrágica, essa realidade passa a se modificar a partir de 2020, sendo 2025 o ano de maior porcentagem de complicações (figura 2A), especialmente no município de Caçapava do Sul, que registrou 20% dos casos com agravamento.

Nos anos mais recentes, especialmente entre 2022 e 2025, houve um aumento evidente das complicações, com destaque para Santa Maria, que apresentou os maiores picos entre os municípios analisados. Cachoeira do Sul também apresentou crescimento significativo, enquanto Caçapava do Sul registrou um aumento mais discreto. Na figura 2B, observa-se um aumento dos casos de febre hemorrágica causada pela dengue, especialmente no município de Santa Maria, nos anos de 2023 e 2024. O mesmo pode ser observado na figura 3, que apresenta o número de óbitos por dengue. Os primeiros óbitos por dengue ocorrem em 2021, e o maior número de mortes é registrado em 2024, com 14 óbitos no município de Santa Maria.

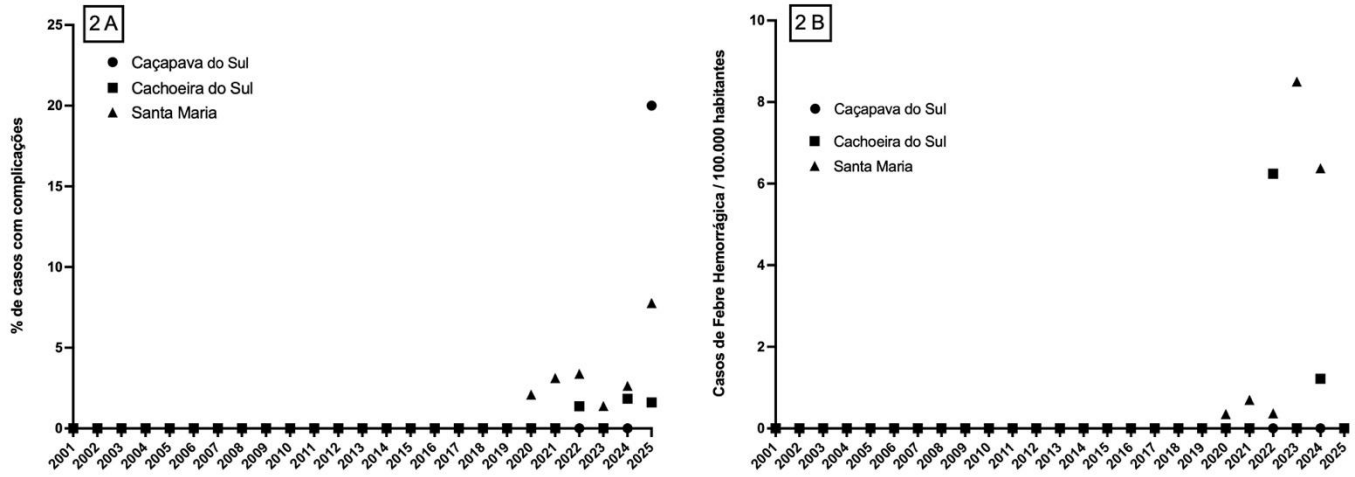


Figura 2 - Complicações decorrentes da dengue nos municípios de Caçapava do Sul, Santa Maria e Cachoeira do Sul.
Fonte: Autores

A Figura 3 mostra a taxa de mortalidade por dengue nos municípios avaliados, pode-se observar que os primeiros óbitos por dengue acontecem no ano de 2021 no município de Cachoeira do Sul, sendo o máximo de óbitos observado no município de Santa Maria, com 14 óbitos em 2024.

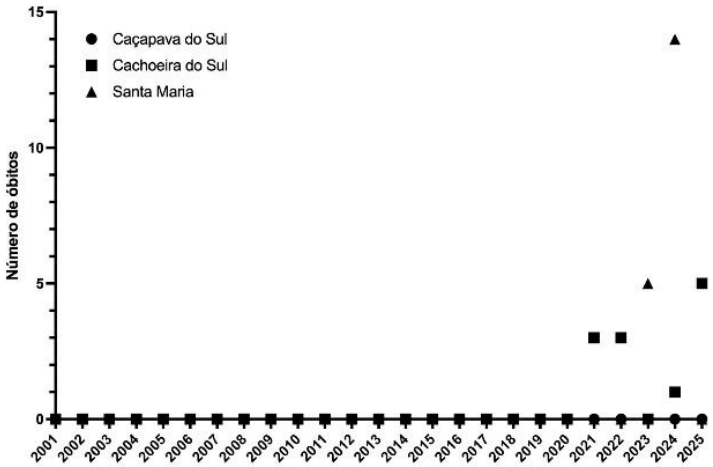


Figura 3 - Taxa de mortalidade por dengue nos municípios de Caçapava do Sul, Cachoeira do Sul e Santa Maria.
Fonte: Autores

A Tabela 1 apresenta os dados de temperatura mínima e máxima e de pluviosidade do município de Caçapava do Sul.

ANO	*Temperatura Mínima (°C)*	*Temperatura Máxima (°C)*	*Pluviosidade (mm)*
2014	**2,6**	**35,1**	**2071,8**
2015	**2**	**32,1**	**2192**
2016	**0,3**	**33,7**	**1845,2**

2017	**0**	**34,4**	**1887,8**
2018	**1,6**	**33,1**	**1751,4**
2019	**0,3**	**37,2**	**1917**
2020	**1,3**	**36**	**1255,8**
2021	**0,3**	**33,7**	**1123,4**
2022	**1**	**37,9**	**1448,8**
2023	**2**	**35,6**	**2244**
2024	**-0,1**	**33,3**	**2325,2**
2025	**-1,5**	**36,4**	**1498.5**

A Tabela 1 apresenta os dados climáticos de temperatura mínima e máxima e pluviosidade para o município de Caçapava do Sul no período de 2014 a 2025. A Tabela 1 apresenta a variação anual da temperatura mínima, da temperatura máxima e da pluviosidade no município de Caçapava do Sul ao longo de 11 anos. É possível observar oscilações anuais, sem tendência clara de aumento ou diminuição das temperaturas mínimas. A presença de valores próximos de 0 °C, com ênfase em 2024 (-0,1 °C) e 2025 (-1,5 °C), indica a ocorrência de períodos frios significativos. De forma geral, as temperaturas mínimas apresentaram um comportamento relativamente estável no período, com variabilidade interanual. As temperaturas máximas variaram entre 32,1 °C (2015) e 37,9 °C (2022). É possível observar alguns picos de temperaturas máximas nos anos de 2019 (37,2 °C) e 2022 (37,9 °C), sugerindo uma leve tendência de aumento em alguns anos recentes, mas sem padrão contínuo. A pluviosidade variou de 1123,4 mm (2021) a 2325,2 mm (2024), com alta variabilidade anual. Esse aumento nas temperaturas entre 2019 e 2022 pode favorecer o aumento dos casos de dengue observados nos municipios no período (SIMON, 2002; ERIN, 2017).

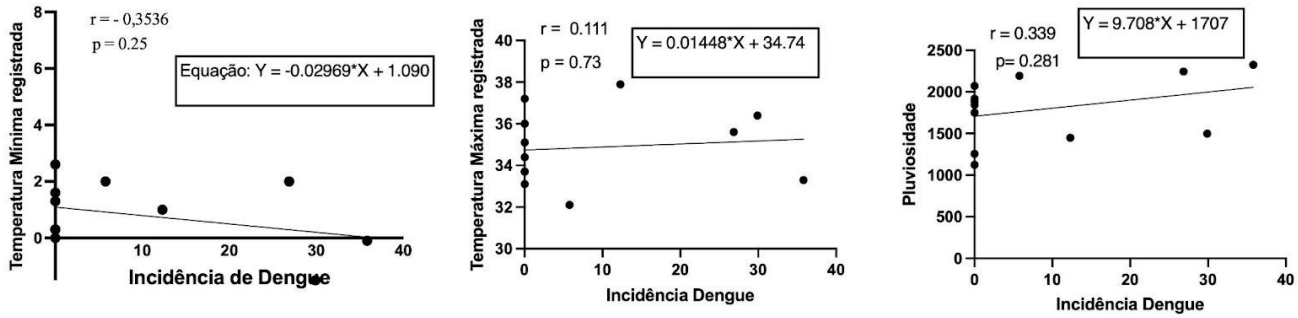


Figura 4 - Análise de correlação entre pluviosidade anual e incidência de dengue para o município de Caçapava do Sul
Fonte: Autores

A análise de correlação entre as variáveis climáticas e a incidência de dengue não revelou correlações estatisticamente significativas ($p > 0,05$). A temperatura mínima apresentou correlação negativa fraca a moderada ($r = -0,3536$), enquanto a temperatura máxima apresentou correlação positiva muito fraca ($r = 0,111$). A pluviosidade, por sua vez, apresentou correlação positiva fraca ($r = 0,339$), sugerindo uma possível tendência de aumento da incidência à medida que os índices de precipitação aumentam. No entanto, nenhuma dessas relações foi estatisticamente significativa, indicando que, no período analisado, as variáveis climáticas isoladamente não explicam a variação na incidência de dengue. Esses resultados podem estar associados à utilização de dados agregados em escala anual e à ausência de análise de defasagens temporais, além da influência de fatores socioambientais não considerados no estudo. Ressalta-se também que até o momento só foi possível fazer a análise para o município de Caçapava do Sul, a análise para os demais municípios está em andamento. Além disso, conforme sugerem Mordecai et al. (2017), a temperatura tem efeito no aumento dos casos de dengue, porém esse efeito não é linear. Como os primeiros casos de dengue para o município de Caçapava do Sul são recentes, talvez ainda não haja dados suficientes para uma análise mais completa.

Os resultados indicam que, embora haja uma tendência de associação entre variáveis climáticas e a incidência de dengue nos municípios analisados, nenhuma das correlações apresentou significância estatística ($p > 0,05$). A temperatura mínima demonstrou correlação negativa fraca a moderada ($r = -0,3536$), enquanto a temperatura máxima apresentou correlação positiva muito fraca ($r = 0,111$), sugerindo baixa ou nenhuma influência direta dessas variáveis térmicas sobre a incidência da doença no período avaliado.

A pluviosidade, por sua vez, apresentou correlação positiva fraca ($r = 0,339$), indicando uma possível tendência de aumento da incidência de dengue em anos com maiores volumes de precipitação. Esse comportamento é coerente com a literatura, que aponta a chuva como um fator relevante na formação de criadouros do *Aedes aegypti*, o que favorece a proliferação do vetor. No entanto, a ausência de significância estatística sugere que essa relação não pode ser confirmada de forma robusta com base nos dados analisados.

A falta de associações significativas pode ser explicada por limitações metodológicas importantes. Primeiramente, o uso de dados agregados em escala anual pode mascarar variações sazonais relevantes, uma vez que a dinâmica de transmissão

da dengue ocorre em escalas temporais mais curtas, frequentemente associadas a períodos de semanas ou meses. Além disso, a ausência de análise de defasagens temporais (lags) entre as variáveis climáticas e a incidência da doença pode ter reduzido a capacidade de detectar relações mais consistentes, considerando que o ciclo de desenvolvimento do vetor e a resposta epidemiológica não são imediatos, conforme sugere estudo de (SADIE, 2019)

Outro aspecto relevante é o caráter multifatorial da dengue, cuja incidência não depende exclusivamente de variáveis climáticas. Fatores como densidade populacional, condições de saneamento, urbanização e ações de controle vetorial exercem influência significativa na dinâmica da doença. Nesse sentido, os municípios de Santa Maria e Cachoeira do Sul, que apresentaram as maiores incidências, possuem maior densidade populacional e grau de urbanização, o que pode contribuir para a intensificação da transmissão. As análises de correlação entre os dados climáticos coletados nestes municípios e os casos de dengue estão em desenvolvimento.

Dessa forma, os resultados reforçam que, embora as variáveis climáticas sejam importantes, sua influência isolada pode não ser suficiente para explicar a variação da incidência de dengue em escala anual. Estudos futuros que considerem maior detalhamento temporal, a inclusão de variáveis socioambientais e abordagens estatísticas mais robustas poderão fornecer uma compreensão mais abrangente da relação entre o clima e a dengue na região analisada.

Conclusão

Os resultados deste estudo evidenciam um aumento expressivo na incidência de dengue nos municípios de Santa Maria e Cachoeira do Sul a partir de 2020, reforçando a relevância da doença como um importante problema de saúde pública na região. Embora tenha sido observada uma tendência de associação entre variáveis climáticas — especialmente a pluviosidade — e o número de casos no município de Caçapava do Sul, as análises estatísticas não indicaram correlações significativas, sugerindo que esses fatores, isoladamente, não são suficientes para explicar a dinâmica da doença.

A ausência de significância estatística, aliada às correlações fracas identificadas, aponta para a necessidade de uma abordagem mais abrangente, considerando a natureza multifatorial da dengue. Fatores como urbanização, densidade populacional, condições de saneamento, mobilidade humana e eficiência das ações de controle vetorial provavelmente desempenham um papel determinante na evolução dos casos, podendo explicar o aumento observado, independentemente das variações climáticas analisadas.

Em síntese, os achados reforçam que, embora o clima seja um fator relevante, o aumento da incidência de dengue na região está associado a um conjunto mais amplo de determinantes. Assim, estratégias de prevenção e controle devem ser integradas e contínuas, envolvendo não apenas o monitoramento climático, mas também ações estruturais e educativas que visem à redução de criadouros e à conscientização da população.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Pampa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo auxílio financeiro.

Referências

CODEÇO, C. T. Endemic and epidemic dynamics of dengue in three Brazilian states. *Tropical Medicine & International Health*, v. 6, n. 9, p. 725–731, 2001.

FURGERI, E. I.; DIAS, L. C.; WAGNER, C. Associação entre a incidência de dengue e o rompimento da barragem de Brumadinho, MG: association between the incidence of dengue and the collapse of the Brumadinho dam, MG. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 8, p. 56995–57005, 2022. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv8n8-142.

HALES, S.; DE WET, N.; MAINDONALD, J.; WOODWARD, A. Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: an empirical model. *The Lancet*, v. 360, n. 9336, p. 830–834, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/. Acesso em: 8 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Departamento de Informática do SUS (DATASUS). *TabNet: informações de saúde*. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2026. Disponível em: https://datasus.saude.gov.br/home/tabnet/. Acesso em: 8 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Departamento de Informática do SUS (DATASUS). *Doenças e agravos de notificação – SINAN*. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2026. Disponível em: https://datasus.saude.gov.br/epidemiologicas-e-morbidade/. Acesso em: 8 abr. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)*. Brasília, DF: INMET, 2026. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 8 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Portal IBGE*. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/. Acesso em: 8 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *SIDRA: Sistema IBGE de Recuperação Automática*. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/. Acesso em: 8 abr. 2026.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Saúde. *Painel de Casos de Dengue RS*. Porto Alegre: Secretaria da Saúde, 2026. Disponível em: https://dengue.saude.rs.gov.br. Acesso em: 8 abr. 2026.

MORDECAI, E. A. et al. Detecting the impact of temperature on transmission of Zika, dengue, and chikungunya using mechanistic models. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, [S.l.], v. 11, n. 4, e0005568, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005568. Acesso em: 8 abr. 2026.

NAISH, S. et al. Climate change and dengue: a critical and systematic review of quantitative modelling approaches. *BMC Infectious Diseases*, v. 14, 167, 2014.

BARCELLOS, C. et al. Climate change, thermal anomalies, and the recent progression of dengue in Brazil. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 14, p. 5948, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-024-56044-y. Acesso em: 8 abr. 2026.

GERALDINI, B.; JOHANSEN, I. C.; JUSTUS, M. Influence of temperature and precipitation on dengue incidence in Campinas, São Paulo State, Brazil (2013–2022). *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, [S.l.], v. 57, e00710-2024, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0037-8682-0080-2024. Acesso em: 8 abr. 2026.

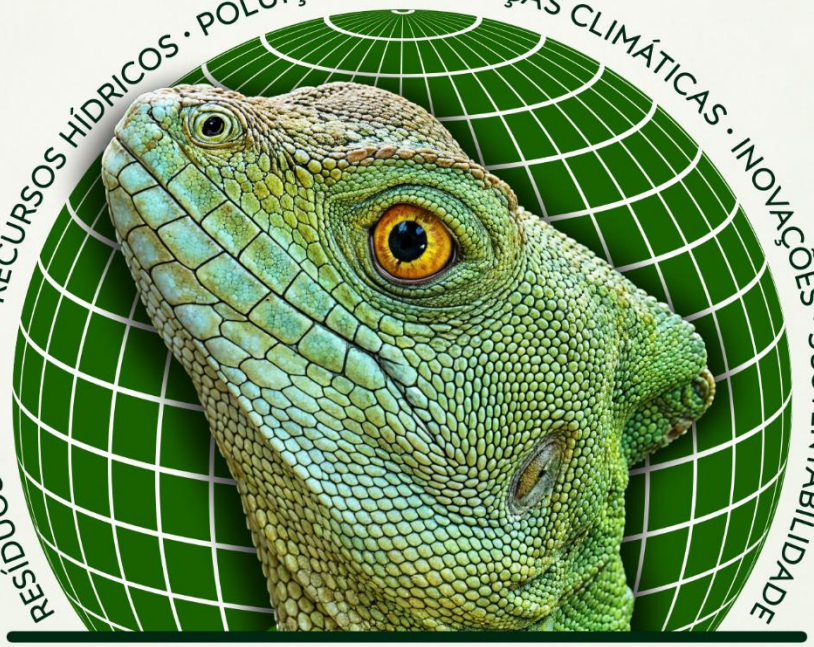
MEIRA, M. C. R. et al. Influência do clima na ocorrência de dengue em um município brasileiro de tríplice fronteira. *Cogitare Enfermagem*, [S.l.], v. 26, e76974, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.5380/ce.v26i0.76974. Acesso em: 8 abr. 2026.

KAKARLA, S. G. et al. Lag effect of climatic variables on dengue burden in India. *Epidemiology & Infection*, v. 147, e170, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1017/S0950268819000608. Acesso em: 8 abr. 2026.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Saúde. *Vigilância em saúde monitora aumento de casos de dengue no RS*. Porto Alegre, 2024. Disponível em: Portal SES-RS. Acesso em: 8 abr. 2026.

ÁREA TEMÁTICA 35

SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEIS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

INTEGRAÇÃO DE RESERVATÓRIOS SOB PAVIMENTO PARA REUSO DE ÁGUA DE CHUVA EM ESCOLAS PÚBLICAS DO RECIFE-PE

1Rayssa Suelen Maria de Lima, 2Adler de Albuquerque Cavalcanti, 3Evelyn Silva dos Santos, 4Raí Fernandes Muniz, 5Ester Campos de Oliveira, 6Tarcísio Moreira Zarzar dos Santos; 7Micaella Raíssa Falcão de Moura; 8Simone Rosa da Silva

1 Universidade de Pernambuco, e-mail: rsml@poli.br; 2 Universidade de Pernambuco, e-mail: adac@poli.br; 3 Universidade de Pernambuco, e-mail: ess7@poli.br, 4 Universidade de Pernambuco, e-mail: rfm1@poli.br, 5 Universidade de Pernambuco, e-mail: eco2@poli.br, 6 Universidade de Pernambuco, e-mail: tmzds@poli.br; 7 Universidade de Pernambuco, e-mail: micaella.raissa@upe.br; 8 Universidade de Pernambuco, e-mail: simonerosa@poli.br

Palavras-chave: Drenagem Urbana Sustentável; Reservatório Sob Pavimento; Sustentabilidade Ambiental.

Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma análise de reúso de água pluvial em escolas públicas, utilizando reservatórios sob pavimento implantados no bairro da Imbiribeira, Recife. A iniciativa surge diante da demanda crescente de soluções integradas para controlar o escoamento superficial em cidades altamente urbanizadas, associando a drenagem sustentável ao aproveitamento eficiente da água. Com o objetivo de integrar o controle de escoamento urbano com o aproveitamento sustentável da água captada visando promover o reuso da água em conjunto com uma educação ambiental. A metodologia adotada foi descritiva e aplicada, baseada em revisão bibliográfica, caracterização da área de estudo, visitas técnicas e análise de viabilidade técnica e econômica. O sistema de tratamento que foi idealizado para a Escola Municipal Milton Almeida dos Santos é composto por caixas de retenção, caixa de gordura e jardim filtrante, apresenta uma manutenção simples, além de alto potencial de conscientização ambiental entre os alunos da escola municipal. Sendo assim, a integração entre reservatórios sob pavimento e sistemas de reuso de água pluvial é uma alternativa sustentável e eficiente para mitigar alagamentos urbanos e incentivar o uso racional da água, trazendo benefícios técnicos, econômicos e pedagógicos.

1 Introdução

O uso estratégico da água da chuva pode ser um recurso complementar ao abastecimento humano, especificamente em regiões que têm um abastecimento de água escasso, ou até mesmo para onde possui um consumo elevado de água potável. Nesse âmbito, a captação e o armazenamento da água da chuva representam uma estratégia sustentável para uma redução da sobrecarga sobre os sistemas públicos de abastecimento. Considerando tempos de mudança climática e de eventos extremos como enchentes e secas, se torna ainda mais necessária a valorização da água como um recurso finito e estratégico, fazendo com que políticas e soluções inovadoras articulem o uso eficiente, a proteção dos recursos hídricos e a segurança sanitária das populações. Desta forma, é fundamental a criação de alternativas para que esse recurso seja utilizado da maneira mais adequada e sustentável possível.

Os eventos de inundação urbana têm se intensificado nas últimas décadas em função da expansão desordenada das cidades, da impermeabilização do solo e das alterações no regime climático (ARAÚJO; OLIVEIRA, 2022). Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018) e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2018), o Brasil apresenta um número crescente de municípios suscetíveis a desastres hidrológicos, com aproximadamente 9,5 milhões de brasileiros residindo em áreas de risco. A região Nordeste - em especial a Região Metropolitana do Recife - destaca-se pela alta vulnerabilidade, resultado da combinação entre relevo plano, alta impermeabilização do solo e ocupações irregulares em margens de rios.

A infraestrutura verde-azul (IVA) apresenta um conceito abrangente que reúne soluções baseadas na natureza e que são voltadas ao aumento da resiliência urbana em relação às mudanças climáticas. Essa abordagem sugere integrar elementos naturais e sistemas hídricos no planejamento das cidades, estimulando formas sustentáveis de mitigação e adaptação aos impactos ambientais, protegendo ecossistemas em áreas densamente urbanizadas, contribuindo também para o alívio de sistemas tradicionais de drenagem das cidades (PERINI; SABBION, 2017).

Diante do cenário atual, o uso de reservatórios de detenção sob pavimento surge como uma tecnologia de IVA que integra o controle do escoamento superficial urbano com o aproveitamento de águas pluviais. Esses sistemas são projetados com o intuito de armazenar temporariamente o volume de escoamento superficial durante eventos de chuva intensa, reduzindo o pico de vazão e retardando o escoamento para a rede de drenagem (TUCCI, 2017).

Além da função hidráulica, os reservatórios são pensados como solução para o reuso da água armazenada para fins não potáveis, destinada para atividades de jardins, limpezas de pátios e descargas sanitárias em escolas, por exemplo. A integração desses reservatórios com sistemas de filtragem e desinfecção permite alcançar a qualidade adequada para usos não potáveis, atendendo aos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 15527:2019, que regulamenta o aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis no Brasil (ABNT, 2019).

A aplicação dessa tecnologia em escolas apresenta benefícios técnicos e educativos. Do ponto de vista técnico, contribui para a redução da demanda de água potável fornecida pela rede pública e para o controle do escoamento superficial urbano. Já sob o aspecto social e pedagógico, possibilita a conscientização ambiental dos estudantes e da comunidade sobre o uso racional

da água e a importância da gestão sustentável dos recursos hídricos (SANTOS et al., 2022). Considerando o exposto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a proposta do uso de um reservatório sob pavimento no Recife para o reuso da água de chuva em escolas públicas. A proposta busca analisar tecnicamente a integração entre reservatórios de detenção sob pavimento e sistemas de aproveitamento de água pluvial na Escola Municipal Milton Almeida dos Santos.

2 Metodologia

O desenvolvimento deste estudo baseou-se em uma abordagem aplicada e descritiva, voltada ao desenvolvimento de uma solução técnica sustentável para o reuso de águas pluviais, utilizando a água armazenada em reservatórios sob pavimentos localizados no bairro da Imbiribeira, na cidade do Recife, com aplicação prática em escolas públicas municipais no entorno dos reservatórios. A metodologia foi organizada de forma cronológica e estruturada em cinco etapas principais, conforme representado no fluxograma metodológico na Figura 01.

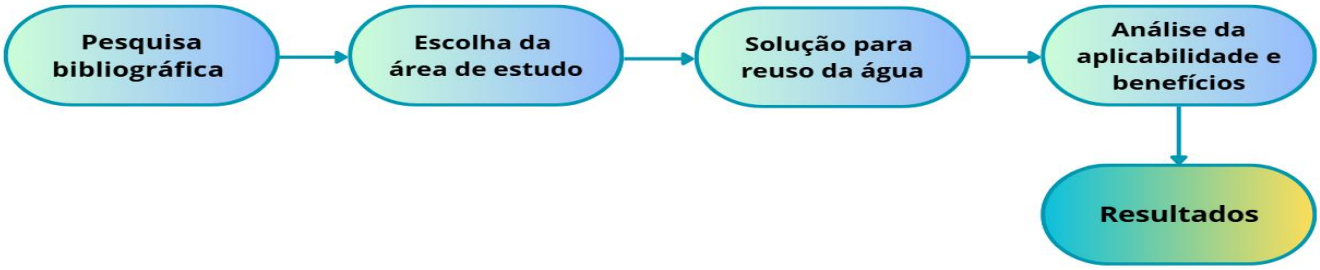


Figura 01: Fluxograma Metodológico.
Fonte: Autores (2025)

A pesquisa bibliográfica constituiu a base conceitual do trabalho. Foram consultados artigos científicos, normas técnicas e estudos técnicos, com destaque para as ABNT NBR 15527:2019 e ABNT NBR 16783:2020, que orientam o aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis. Essa revisão abrangeu temas como drenagem urbana sustentável, infraestrutura verde-azul e reuso hídrico em escolas, permitindo compreender as boas práticas e fundamentos técnicos aplicáveis ao contexto recifense.

A caracterização da área de estudo teve como foco o bairro da Imbiribeira, na zona sul da cidade do Recife, reconhecido por sua alta vulnerabilidade a alagamentos devido à baixa cota altimétrica, baixa permeabilidade do solo e sistema de drenagem deficiente. O bairro ainda está situado em uma área de planície de inundação, próxima a canais e corpos hídricos como o Canal do Jordão e o Rio Tejipió, que frequentemente transbordam em períodos de chuva intensa, tornando-o uma das áreas mais impactadas pelas chuvas na cidade. De acordo com o Plano de Contingência Recife (2024), a Imbiribeira figura entre os bairros com maior incidência de pontos críticos de alagamento da cidade, especialmente entre os meses de maio e julho, período de maior pluviosidade. As Figuras 02 e 03 mostram as obras dos reservatórios nas Ruas Itamaracá e Itacaré.





Figuras 02 e 03: Obras dos reservatórios nas Ruas Itamaracá e Itacaré.
Fonte: Prefeitura do Recife (2024)

A região, onde se localizam os primeiros reservatórios sob pavimento implantados pela Prefeitura do Recife, nas Ruas Itacaré e Itamaracá, foi escolhida por seu potencial para integrar ações de mitigação de enchentes e reuso de águas pluviais. Foram realizadas visitas técnicas, levantamentos fotográficos e mapeamento das escolas próximas aos reservatórios, com destaque para a Escola Municipal Milton Almeida, localizada em média a 700 m de distância dos reservatórios, e selecionada como unidade-piloto por reunir condições adequadas para implantação do sistema proposto. Na Figura 04 abaixo é mostrado imagens da escola.



Figura 04: Escola Municipal Milton Almeida Santos. (A) Fachada, (B, C) Área externa.
Fonte: Autores (2025)

Com base nas informações coletadas sobre capacidade dos reservatórios e volume de água disponível para reuso, foi elaborada uma solução técnica e sustentável para o reuso e tratamento natural da água, integrando transporte, armazenamento e filtragem biológica, adequadas ao contexto escolar e às normas de qualidade para o uso não potável.

3 Discussão dos Resultados

3.1 Análise dos dados coletados

A análise dos dados coletados durante as visitas técnicas e levantamento de informações, permitiu compreender o potencial de reuso da água armazenada nos reservatórios sob pavimento localizados no bairro da Imbiribeira, bem como a viabilidade técnica e ambiental da proposta de aproveitamento em escolas públicas municipais. Os resultados obtidos estão organizados em sete eixos: Diagnóstico da área de estudo, Potencial de reuso de água na escola, Sistema de tratamento com jardim filtrante, Viabilidade técnica e econômica e Possíveis limitações e recomendações técnicas.

3.2 Diagnóstico da área de estudo

As visitas técnicas e o levantamento de informações sobre o bairro da Imbiribeira confirmaram sua alta suscetibilidade a inundações, resultante da impermeabilização excessiva do solo, da baixa cota altimétrica e da proximidade com o Canal do Jordão e o Rio Tejipió. Durante o período chuvoso (maio a julho), observou-se a formação recorrente de pontos de alagamento em vias secundárias e no entorno das escolas municipais, como é possível observar na Figura 05 e 06.



Figura 05: Alagamento na Av. Mascarenhas de Moraes
Fonte: JC (2025)



Figura 06: Alagamento na Av. Mascarenhas de Moraes
Fonte: Folha de Pernambuco (2025)

Os reservatórios sob pavimento implantados pela Prefeitura do Recife foram avaliados quanto à sua função hidráulica e potencial de reuso. Estes dispositivos atuam como sistema de detenção temporária do escoamento superficial, reduzindo o pico de vazão e retardando o escoamento para a rede de drenagem. No entanto, verificou-se que o volume armazenado não é utilizado, já que, após as chuvas, a água é normalmente descartada no sistema de drenagem, sem aproveitamento. Essa constatação reforça a relevância da proposta de reuso local, transformando uma medida de controle de cheias em fonte alternativa de abastecimento não potável.

Segundo João Charamba, Chefe de Gabinete do Promorar, em entrevista concedida ao site da Prefeitura do Recife (2024), os reservatórios fazem parte de um conjunto de ações para melhorar a macrodrenagem do Recife, os reservatórios são três unidades, sendo dois deles localizados na Rua Itacaré com dimensões de 60 metros de comprimento, 1,5 metros de largura

e 70 centímetros de profundidade; e uma outra unidade na Rua Itamaracá com 60 metros de comprimento, 3,0 metros de largura, e 50 centímetros de profundidade, resultando em conjunto num volume de cerca de 240.000 litros de água captada. As Figuras 07 e 08 abaixo mostram as dimensões dos reservatórios.

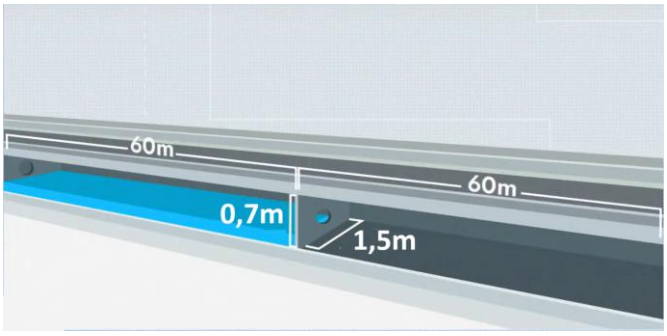


Figura 07: Reservatório na Rua Itacaré.
Fonte: Prefeitura do Recife (2024)

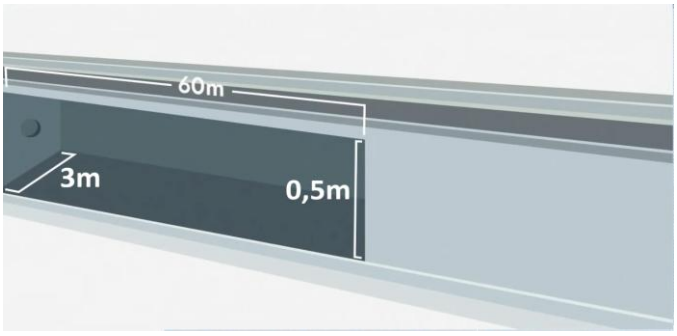


Figura 08: Reservatório na Rua Itacaré.
Fonte: Prefeitura do Recife (2024)

O volume calculado de acordo com as dimensões dos reservatórios foi de 216 m³, conforme mostrado na Tabela 1.

Reservatórios	Comprimento (m)	Largura (m)	Profundidade (m)	Volume útil (m³)
R1 - Rua Itacaré	60	1,5	0,7	63
R2 - Rua Itacaré	60	1,5	0,7	63
R3 - Rua Itamaracá	60	3	0,5	90
TOTAL				**216**

Tabela 01: Capacidade do Volume Útil dos Reservatórios.
Fonte: Autores (2025)

3.3 Potencial de reuso da água na escola

A análise do conjunto de reservatórios sob pavimento implantados no bairro da Imbiribeira demonstra alto potencial de aproveitamento da água pluvial para fins não potáveis, especialmente em equipamentos públicos, como escolas municipais. Conforme apresentado na Tabela 01, os reservatórios, situados nas Ruas Itacaré e Itamaracá, possuem capacidade total de 216.000 litros. Considerando o cenário climático do Recife, com índices pluviométricos médios mensais acima de 300 mm entre maio e julho (APAC, 2025) e uma taxa de recarga efetiva de 70%, em virtudes de perdas por evaporação e detritos, obteve-se um volume útil de 151.200 litros.

Foram mapeados equipamentos públicos para o futuro reuso da água captada dos reservatórios, dentre eles estão Unidades de Saúde Familiar, Equipamentos educacionais e Academias da cidade. A Escola Municipal Milton Almeida dos Santos foi escolhida como piloto para esse estudo devido a sua localização mais próxima aos reservatórios. A água captada pelos reservatórios deverá ser utilizada para fins não potáveis como descargas sanitárias, irrigação de jardins e limpeza da instituição.

Para o cenário da Escola Municipal Milton Almeida dos Santos, foi levantado que a escola possui 148 pessoas que frequentam a escola, incluindo alunos e funcionários. Utilizando como base estimativas de consumo médio para escolas públicas, temos que em uma escola municipal tem um consumo entre 25 a 30 L/pessoa.dia, para 28,8 L/pessoa.dia de água potável (Fasola et al., 2011). O consumo diário estimado foi calculado utilizando a seguinte Equação (01) :

$$Qd = N \times Cm \qquad (01)$$

Onde: Qd é o consumo diário total, N é o número de usuários e Cm o consumo médio per capita.

Para o número de usuários (N) foi utilizado a quantidade de 148 alunos matriculados na escola. Para o consumo médio foi utilizado 28,8 L/pessoa.dia. Logo, obtemos um consumo diário estimado de 4.204,8 L/dia. Com isso, fica em evidência o aproveitamento do sistema em termos de redução do consumo de água potável no ambiente escolar. A Tabela 2 evidencia o tempo de abastecimento.

A partir do potencial de reuso da água pluvial, obteve-se um tempo de abastecimento de aproximadamente 36 dias, considerando o volume útil total dos reservatórios. Logo, foi constatado que o volume total disponível para reuso é significativo para a demanda da escola, permitindo suprir as necessidades não potáveis por mais de um mês, como evidenciado na Tabela 2 abaixo.

Reservatórios	Capacidade (m³)	Volume Efetivo 70% (L)	Demanda da Escola (L/dia)	Tempo de Abastecimento (dias)	Principais usos do reuso
Rua Itacaré - Reservatório 1	63	44.100	4.204,8	10,49	Descarga sanitárias, irrigação e limpezas em geral
Rua Itacaré - Reservatório 2	63	44.100	4.204,8	10,49	
Rua Itamaracá - Reservatório 3	90	63.000	4.204,8	14,98	
TOTAL	**216**	**151.200**	**12.614**	**35,96**	

Tabela 02: Potencial de Reuso da Água Pluvial na Escola Milton Almeida dos Santos.
Fonte: Autores (2025)

Os reservatórios 1 e 2 da Rua Itacaré possuem tempo de abastecimento semelhantes, refletindo suas capacidades iguais. Já o reservatório 3 apresenta maior tempo de abastecimento devido ao seu volume superior de 90 m³. Em conjunto, o sistema demonstra o potencial de reuso da água pluvial para reduzir o consumo de água potável.

3.4 Dimensionamento do Sistema de Tratamento

O sistema foi projetado com três unidades principais: caixa de retenção de sólidos, caixa de gordura e jardim filtrante. Segue abaixo o dimensionamento técnico. a) Caixa de Retenção de Sólidos Função: remoção de sólidos grosseiros. Vazão de projeto: 1,0 m³/h (transporte por caminhão-pipa). Volume recomendado: 300 L Tempo de detenção: 15–20 min. b) Caixa de Gordura Função: retenção de óleos e graxas. Volume adotado: 200 L Tempo de detenção: 10–15 min. c) Jardim Filtrante (Wetland Construído) Tipo: fluxo horizontal subsuperficial. Dimensionamento: - Vazão de tratamento: 1.000 L/h (transporte por caminhão). - Taxa de aplicação típica: 2–6 cm/dia. - Área necessária: A = Qd / Taxa Considerando Qd = 4.205 L/dia e taxa = 4 cm/dia: A = 4.205 / 40 = 105 m² Estrutura: • Camada de brita nº 1 – 20 cm • Camada de areia grossa – 30 cm • Vegetação macrófita recomendada: Typha sp. ou Vetiver Tempo de detenção hidráulica recomendado: 1–3 dias.

3.5 Sistema de Tratamento com Jardim Filtrante

Para reuso da água da chuva, é necessário antes submetê-la a um tratamento, mesmo que para fins não potáveis, onde será feito a remoção de resíduos sólidos, de matéria orgânica, microrganismos patogênicos, metais pesados e graxas. Este processo de tratamento funcionará na área externa da própria escola, para isso será utilizado um caminhão-pipa que fará o transporte da água após a captação nos reservatórios.

Após chegada na escola, a água será depositada em uma caixa d'água, onde será responsável pelo armazenamento temporário da água e pela liberação do fluxo de forma controlada antes de seguir para as etapas de tratamento. Na sequência, a água passa por uma caixa de retenção de resíduos sólidos, a qual tem a função de remover materiais grosseiros como folhas, plásticos, areia e outras partículas suspensas (etapa fundamental para evitar o entupimento e comprometimento das próximas unidades do sistema).

Após isso, a água segue para uma caixa de retenção de gordura, responsável por separar e reter óleos e graxas que possam estar presentes, evitando que essas substâncias sejam formadas nas superfícies e garantindo um bom seguimento nas próximas etapas.

Um jardim filtrante é imprescindível para a etapa de tratamento da água, trazendo modernidade e descrição do processo; ele será acionado após a caixa de retenção de gordura, onde esse será formado por camadas de areia, brita e plantas macrófitas. Nesta etapa a água é limpa devido a processos físicos, químicos e biológicos, com auxílio das raízes das plantas e dos microrganismos com que elas vivem nelas.

De forma geral, o sistema de reuso proposto demonstra eficiência técnica e sustentabilidade, podendo servir como modelo replicável para outras escolas públicas da cidade.

3.5.1 Jardim Filtrantes

O Jardim Filtrante se apresenta como uma ótima alternativa ao tratamento de águas, que utiliza a raiz de plantas e os microrganismos presentes nelas e no meio para filtrar os poluentes químicos do efluente. É uma tecnologia considerada de baixo custo se comparada a outros sistemas, além de possuir manutenção simples e com baixa frequência, por sua composição se basear em areia, brita e plantas. O sistema padrão dos Jardins Filtrantes é composto por três etapas. A primeira, chamada jardim vertical, o efluente passa em um filtro vegetal vertical onde ocorre a degradação de matéria orgânica e nitrogênio. Após isso, passa para a segunda etapa do filtro vegetal horizontal onde o tratamento realizado é sem presença de oxigênio (anaeróbico). Em seguida, é realizada a última etapa, denominada de lagoa terminal, onde a água que chega pode ser utilizada para fins não potáveis, como irrigação de áreas verdes, lavagem de pátios, descargas sanitárias, dentre outros (RIBEIRO; BLAUTH; BEATI, 2018).

No contexto da Escola Municipal Milton Almeida Santos, o sistema ganhará espaço para ser ferramenta social e de conscientização ecológica, com uma educação ambiental prática, permitindo que alunos e professores compreendam, de forma visual e participativa, o funcionamento de um sistema natural de tratamento de água. Essa abordagem transforma o sistema em

um laboratório vivo, reforçando valores de responsabilidade ambiental, cidadania e conservação dos recursos hídricos (NASSEN, 2024). A Figura 9 a seguir demonstra um esquema do sistema de tratamento.

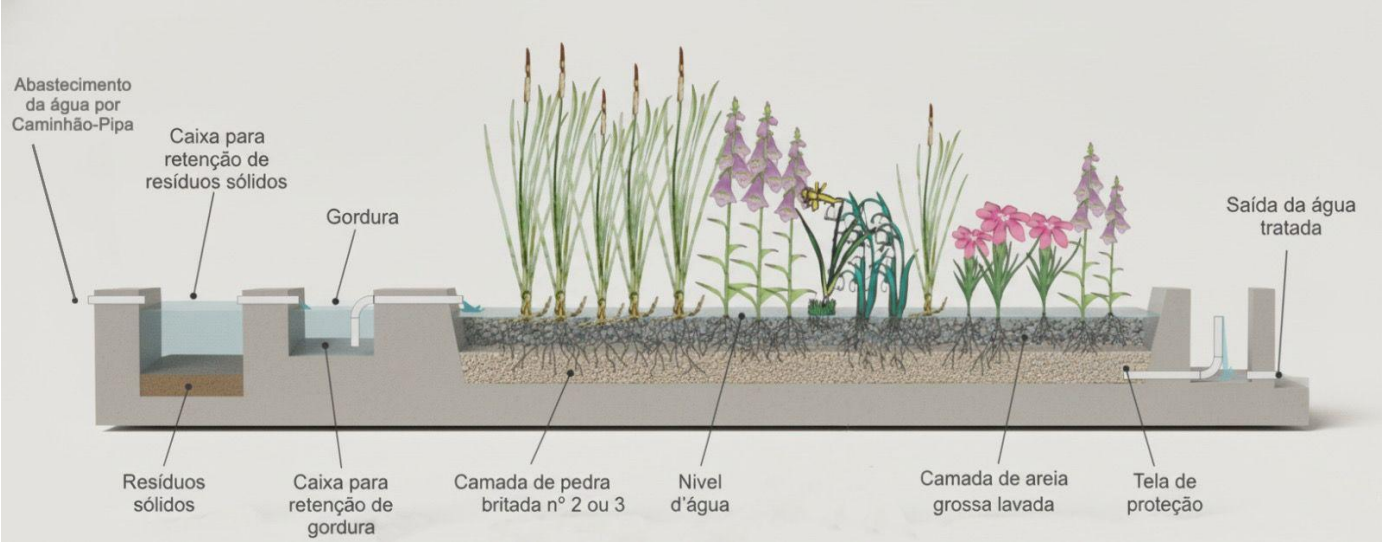


Figura 09: Esquema do Sistema de Tratamento
Fonte: Autores (2025), adaptado de Embrapa ([s.d.])

3.6 Viabilidade Técnica e Econômica

Do ponto de vista técnico, a solução se destaca pelo alto grau de facilidade de execução, visto que a estrutura de captação de água já existe, evitando um alto custo com construções que façam esse papel. O transporte da água até a escola, realizado por meio de caminhão-pipa, elimina a necessidade de instalação de redes hidráulicas de longa distância, o que geraria um custo alto e uma série de impactos sociais no entorno.

Os Caminhões-pipa e materiais do sistema de tratamento devem ser custeados pela Prefeitura Municipal do Recife, por meio de programas voltados à educação ambiental e sustentabilidade urbana, tendo provocado o interesse de um potencial retorno financeiro com a redução do consumo de água potável, desenvolvimento e educação sustentável em termos da escola. Em termos de custos, os materiais utilizados no sistema de tratamento em questão, composto por caixa de retenção de resíduos sólidos, caixa de gordura e jardim filtrante, são de baixo custo e de fácil aquisição, como areia, brita e plantas macrófitas, favorecendo sua implementação e manutenção periódica pela equipe de apoio da escola, sem fazer a necessidade de mão de obra especializada. A manutenção é simples e de baixa frequência, sendo apenas a limpeza das caixas de retenção e o manejo periódico das plantas do jardim filtrante, o que leva a redução de gastos operacionais e também vai prolongar a vida útil do sistema de tratamento.

Portanto, o sistema de tratamento com jardim filtrante apresenta viabilidade técnica e economicamente vantajosa, tendo um conjunto de baixo custo de implementação, operação simplificada e benefícios ambientais expressivos. Além disso, o projeto segue princípios de infraestrutura verde-azul, priorizando soluções baseadas na natureza, de baixo impacto ambiental e alta eficiência.

3.7 Possíveis limitações e recomendações técnicas

A primeira limitação está relacionada à dependência da quantidade e regularidade das chuvas, que se evidencia sobretudo nos três meses mais chuvosos. Mesmo assim, o volume do reservatório não é suficiente para garantir o fornecimento contínuo de água para as atividades não potáveis, o que pode comprometer temporariamente a eficiência do sistema. Além disso, existem desafios a serem considerados no processo de transferência da água dos reservatórios para a escola por meio de caminhão-pipa.

A gestão e o financiamento dessa intervenção devem ser de responsabilidade da Prefeitura do Recife, por meio de suas agências de infraestrutura, uma vez que a operação integra uma política pública voltada à drenagem urbana e à sustentabilidade. À escola cabe limitar-se ao recebimento, armazenamento e uso da água conforme os parâmetros técnicos estabelecidos. Também é necessário estruturar um planejamento logístico para o transporte, definindo a periodicidade de abastecimento e as rotas dos caminhões. A definição clara dessas atribuições contribui para evitar sobrecargas nas unidades escolares e garante a continuidade e o bom desempenho do sistema de reúso.

Outra limitação relevante diz respeito à adequação física e estrutural da escola receptora. As dimensões reduzidas do terreno podem restringir a implantação do sistema de tratamento de água, pois a construção das unidades de tratamento e do reservatório requer espaço tanto para a instalação dos tanques quanto para o acesso à manutenção e às conexões hidráulicas. Essa condição pode inviabilizar a instalação subterrânea e demandar soluções alternativas, como tanques modulares, verticais ou de menor capacidade.

4. Considerações Finais

A integração entre os sistemas de reservatórios sob pavimentos e o aproveitamento de águas pluviais nas escolas demonstrou ser uma alternativa sustentável e eficiente frente aos desafios urbanos de drenagem e abastecimento hídrico. O estudo apresentado evidencia como uma solução verde-azul pode trabalhar simultaneamente para a mitigação de alagamentos e uso racional (consciente) de água.

Os resultados evidenciaram que os reservatórios avaliados apresentam capacidade adequada para atender as demandas da escola, promovendo uma grande redução no consumo de água tratada e nos custos operacionais. Além dos benefícios técnicos e sustentáveis, o projeto se destaca também pelo caráter educativo, ao converter o sistema de reuso e tratamento natural da água em um instrumento com pedagogia ativa, já que estimula a conscientização sobre sustentabilidade e cidadania ambiental.

Apesar dos resultados serem bastantes promissores, é importante ressaltar que a proposta ainda se encontra em estágio inicial de pesquisa e desenvolvimento, com necessidade de um maior aprofundamento técnico, operacional e de monitoramento. Estudos complementares sobre a eficiência do sistema ao longo do tempo, a qualidade da água após os tratamentos, e custos de manutenção serão essenciais para validação e aperfeiçoamento do modelo proposto, para que assim possamos garantir sua aplicabilidade em larga escala.

Assim, este estudo pode ser considerado um ponto inicial para novas pesquisas e avanços voltados às áreas de drenagem urbana e sustentabilidade. A ampliação das investigações e a aplicação do projeto piloto em diferentes locais têm potencial para aprimorar e validar a tecnologia proposta, reforçando a importância das soluções baseadas na natureza na criação de cidades mais eficientes e comprometidas com o uso responsável dos recursos hídricos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE) pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABNT, 2019. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15527**: Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis – Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ARAÚJO; OLIVEIRA, 2022. ARAÚJO, Yuri Rommel Vieira; OLIVEIRA, Habyhabanne Maia de.2022.*: Desenvolvimento, desastres e regulação*. Campina Grande: Editora Licuri, 2022. p. 161-173.

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. *Climatologia – Precipitação mensal do Recife*. Recife: APAC, 2025. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/climatologia/519-climatologia**.**
EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Saneamento Básico Rural: Jardim Filtrante. Brasília: Embrapa Instrumentação, [s.d.]. Disponível em: https://www.embrapa.br/tema-saneamento-basico-rural/sobre-o-tema. 2025.

FASOLA et al., 2011. FASOLA, Gabriel Balparda et al. Potencial de economia de água em duas escolas em Florianópolis, SC. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 65-78, out./dez. 2011.

IBGE, 2018. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *População em áreas de risco no Brasil*. Rio de Janeiro, 2018.

NASSEN, 2024. NANSEN, Christian. Active Learning, Living Laboratories, Student Empowerment, and Urban Sustainability. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 10, p. 3902, 2024.

PERINI; SABBION, 2017. PERINI, Katia; SABBION, Paola. Urban sustainability and river restoration: green and blue infrastructure. United Kingdom: Wiley Blackwell, 2017.

RECIFE (PE). Secretaria Executiva de Defesa Civil. *Plano de Contingência 2024*. Recife, 2024

RIBEIRO; BLAUTH; BEATI, 2018. RIBEIRO, Beatriz de Fátima; BLAUTH, Gabrielle Peruch; BEATI, André A. Gutierrez Fernandes. Estudo da efetividade dos jardins filtrantes no tratamento de efluentes sanitários.

TUCCI, C.E.M. Gestão de Águas Pluviais Urbanas. Brasília: RHAMA / Cap-Net Brasil, [2017]. Material didático de curso. Disponível em: http://www.rhama.com.br.

TANQUE DE RETARDO COMO ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE ALAGAMENTOS: ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO NA ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO

1Ana Lívia Peixinho da Silva Guimarães, 2Lucas Matheus Soares de Oliveira, 3Larissa Nataly Roque da Silva, 4Diego Henrique Barbosa Santos, 5Manuella Maria Rodrigues de Souza, 6Maria Cecília Souza Xavier, 7Micaella Raíssa Falcão de Moura, 8Anna Elis Paz Soares

1 Universidade de Pernambuco, e-mail: alpsg@poli.br; 2 Universidade de Pernambuco, e-mail: lmso2@poli.br; 3 Universidade de Pernambuco, e-mail: lnrs@poli.br;4 Universidade de Pernambuco, e-mail: dhbs@poli.br; 5 Universidade de Pernambuco, e-mail: mmrs1@poli.br; 6 Universidade de Pernambuco, e-mail: mcsx@poli.br; 7 Universidade de Pernambuco, e-mail: micaella.raissa@upe.br; 8 Universidade de Pernambuco, e-mail: anna.soares@poli.br

Palavras-chave: Drenagem urbana; Eventos extremos; Técnica Compensatória.

Resumo

O processo de urbanização do Recife, associado à sua geografia vulnerável de planície estuarina e à forte influência das marés, agrava os problemas de alagamentos. Este cenário impacta diretamente a Escola Politécnica de Pernambuco (Poli-UPE), no bairro da Madalena, causando transtornos à mobilidade e interrupções no calendário acadêmico. Este artigo tem por objetivo analisar a viabilidade da implantação de um tanque de retardo no campus, em conformidade com a Lei Municipal nº 18.112/2015. A partir da metodologia da lei, aplicada ao lote de 8.084 m², dimensionou-se um volume de retardo de 121,26 m³, com uma vazão de restrição de 0,02021 m³/s. O dispositivo de saída, um tubo de PEAD, foi calculado em DN 150 mm. Conclui-se que a solução é tecnicamente viável, cumpre os requisitos legais e pode ser instalada sob o estacionamento do campus, mitigando os impactos das cheias no entorno.

Introdução

Com o aumento dos níveis de urbanização, que resultou na ampliação de áreas impermeabilizadas, o destino das águas pluviais sofreu significativas alterações, causando mudanças no ciclo hidrológico natural (Gonçalves; Baptista; Ribeiro, 2016). Eventos pluviométricos extremos tornaram-se cada vez mais recorrentes, e suas consequências são agravadas devido a uma maior velocidade de escoamento, elevações de vazões de pico e diminuição no tempo de concentração.

Na cidade do Recife, este avanço urbano ocorreu sobre uma geografia intrinsecamente vulnerável. É uma cidade caracterizada por estar próxima ao nível do mar, cerca de quatro metros acima, de caráter estuarino, ou seja, ela abarca um espaço de encontro entre os rios e o oceano (Silva; Santos; Melo, 2024). A problemática dos alagamentos urbanos também é agravada pelas condições topográficas. O relevo da cidade é formado por dois grupos: as planícies localizadas na porção Centro-Leste e os morros adjacentes nas porções Norte, Oeste e Sul (Silva *et al.,* 2018).

A dinâmica das inundações em Recife é determinada, em grande medida, pela forte influência das marés. Durante a preamar, particularmente nas marés de sizígia (lua nova e cheia) quando o nível do oceano atinge sua elevação máxima, ocorre um efeito de represamento no estuário dos rios (Harari, 2021). Essa elevação do nível do mar funciona como uma barreira hidráulica natural, obstruindo o fluxo fluvial e impedindo a descarga da água drenada da cidade. Por essa razão, a ocorrência simultânea de chuvas e maré alta resulta, frequentemente, no transbordamento de rios e canais, gerando alagamentos severos mesmo com precipitações moderadas.

O bairro da Madalena, localizado na Zona Oeste do Recife, configura-se como um importante polo de mobilidade e educação. Margeado pelo Rio Capibaribe, seu território é um ponto de confluência para grandes vias da cidade, como as Avenidas Caxangá, Abdias de Carvalho e Agamenon Magalhães. Além disso, a região concentra um significativo número de instituições de ensino, com destaque para o campus Benfica da Universidade de Pernambuco (UPE), onde se localiza a Escola Politécnica (POLI/UPE), objeto deste estudo.

A vulnerabilidade do bairro às inundações é um problema crônico, com registros de eventos históricos como a grande cheia de 1970. Atualmente, os alagamentos recorrentes causam severo impacto na mobilidade urbana pelo bloqueio de vias estratégicas e afetam de forma igualmente crítica a comunidade acadêmica. No entorno da Escola Politécnica, as inundações comprometem a segurança dos discentes e o andamento do calendário letivo, a ponto de a própria UPE ter regulamentado a suspensão das atividades em dias de chuvas intensas, formalizando uma disrupção que afeta diretamente o planejamento educacional da instituição.

Na cidade do Recife, foi sancionada, em 2015, a Lei Municipal nº 18.112, um marco na legislação de drenagem urbana do Recife. A norma institui a obrigatoriedade de técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais, focando em duas frentes: a implantação de “telhados verdes” em edificações com mais de quatro pavimentos e área de coberta superior a 400m², e a construção de reservatórios de retardo ou acúmulo em lotes maiores que 500m², desde que a área impermeabilizada ultrapasse 25% da área total (Recife, 2015).

As técnicas compensatórias apresentam-se como uma alternativa de controlar os impactos, promovendo infiltração, retenção e evaporação da água da chuva. Melo *et al.,* (2023) definem como os objetivos das técnicas compensatórias minimizar os efeitos da urbanização, diminuir a geração dos volumes de escoamento e vazões a jusante, maximizar o controle na fonte, resgatar os processos envolvidos no ciclo hidrológico e potencializar o controle da qualidade das águas e a recarga de aquíferos.

Silva; Silva Junior; Alcoforado (2020), analisaram a viabilidade do uso de um reservatório de retardo e um reservatório de acúmulo num empreendimento localizado no centro da cidade do Recife. Como resultado, os autores observaram que os métodos foram eficazes para reduzir o volume e a vazão do escoamento superficial, aliviando a carga sobre o sistema público de drenagem. Além disso, permite o aproveitamento da água acumulada em outras atividades, contribuindo para o uso sustentável dos recursos hídricos.

Diante deste cenário, que une a vulnerabilidade hidrológica local, o impacto direto na comunidade acadêmica e o incentivo da legislação municipal, o objetivo do presente pesquisa é analisar a viabilidade da implantação de um tanque de retardo no campus da Escola Politécnica de Pernambuco como estratégia de controle de alagamentos na fonte.

Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho, sintetizada no fluxograma abaixo (Figura 01), seguiu seis etapas principais: iniciou-se pela definição do problema, identificando os alagamentos recorrentes no campus da Escola Politécnica como um transtorno crônico à mobilidade e ao calendário acadêmico. Seguiu-se para a revisão de literatura, que fundamentou a pesquisa nas características hidrológicas de Recife , no impacto da urbanização e no arcabouço legal da Lei Municipal nº 18.112/2015. A caracterização da área de estudo detalhou a localização do campus no bairro da Madalena e o histórico de alagamentos locais, seguida pelo levantamento de dados, que focou na coleta da área total do lote e dos coeficientes de cálculo (K, I, Cr) estipulados pela legislação. Na consolidação dos resultados e proposta, foram aplicadas as equações para dimensionar o volume, a vazão de restrição e o dispositivo de saída, propondo as dimensões e a locação do reservatório, culminando com a etapa de viabilidade técnica.

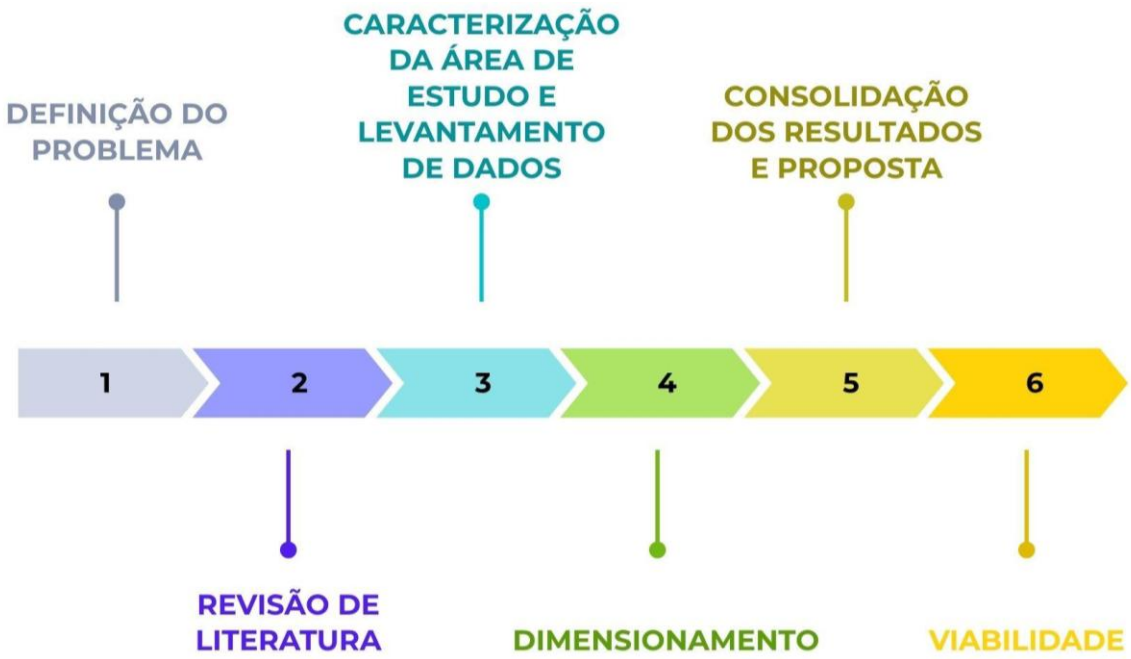


Figura 01: Fluxograma com as etapas da metodologia
Fonte: Autores (2025)

Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde à Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE), cujo lote (Figura 2) possui 8.084,00 m². Está localizada no bairro da Madalena, na cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco, na região Nordeste do Brasil. A instituição está situada na Rua Benfica, nº 455, uma via de grande importância urbana que conecta diferentes pontos do bairro e apresenta intenso fluxo de veículos e pedestres. O acesso principal à escola é realizado pela Rua Professor Benedito Monteiro, que interliga a Rua Benfica à Avenida Engenheiro Abdias de Carvalho, constituindo uma das principais rotas de circulação na região.



Figura 02: Escola Politécnica (destacada em vermelho) e entorno.
Fonte: Autores (2025).

Dimensionamento do Tanque de Retardo

A metodologia para o dimensionamento do tanque de retardo foi integralmente fundamentada nas diretrizes e equações da Lei Municipal nº 18.112/2015. Foi adotado o tanque de retardo, cujo objetivo é a redução do pico de escoamento superficial por meio de uma vazão de restrição que será liberada para a rede pública de drenagem. O dimensionamento foi dividido em duas etapas principais: primeiro, o cálculo do volume de armazenamento obrigatório e, segundo, o cálculo da vazão de restrição e o dimensionamento do orifício de saída.

Dimensionamento do Volume do Reservatório (V)

O cálculo inicia-se pela determinação do volume de armazenamento necessário, conforme estipulado pela lei para tanques de retardo, utilizando a Equação (1):

$$V = K.A.I \qquad (1)$$

Onde: V é o volume calculado do reservatório (m³), K é o coeficiente de abatimento, A é a área total do lote (m²) e I é a intensidade da chuva de vazão média de cheias na cidade do Recife (m/h). A própria legislação dispõe que para o tanque de retardo, devem ser adotados os coeficientes K = 0,25 e I = 0,06 m/h.

Cálculo da Vazão e Dimensionamento do Orifício de Saída (Qr)

Definido o volume, a lei exige que seu escoamento para o sistema público se dê através de um orifício, dimensionado para uma "vazão de restrição" (Qr) específica. O modelo adotado pela norma para esta vazão é o Método Racional, expresso na Equação (2):

$$Qr = Cr.I.A\ /\ 360 \qquad (2)$$

Onde: Qr é a vazão de restrição (m³/s), Cr é o coeficiente de escoamento (runoff) de pré-urbanização (adimensional), I é a intensidade da chuva de projeto (fixada pela lei em 0,06 m/h ou 60 mm/h), A é a área total do lote (ha) e 360 é o fator de conversão de unidades. Neste trabalho, adotou-se o coeficiente de escoamento de pré-urbanização (Cr) igual a 0,15, valor referente ao início do processo de urbanização do Recife (EMLURB, 2016).

Finalmente, para o dimensionamento físico do orifício de saída, capaz de garantir a vazão de restrição (Qr) calculada, a lei recomenda a utilização da Fórmula de Chézy/Manning, dada pela Equação (3):

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}}.S^{\frac{1}{2}}}{N.P^{\frac{2}{3}}} \qquad (3)$$

Onde: Q é a vazão (m³/s), N é o coeficiente de rugosidade de Manning, A é a área molhada (m²), P é o perímetro molhado (m) e S é a declividade (m/m). Foi adotada a declividade (S) de 1% (0,01) e o coeficiente de rugosidade de Manning (N) para PEAD de 0,009.

Resultados e Discussão

Para avaliar o impacto potencial dos resultados deste estudo, é crucial primeiro analisar o cenário atual e o histórico de intervenções na área. Pesquisou-se o histórico de obras recentes com objetivo de mitigar o problema recorrente, e a Figura 02 evidencia algumas dessas obras realizadas no entorno da área em estudo. Destaca-se o ano 2017, com a requalificação da rede de drenagem (implantando 50 metros de tubos com 600 milímetros de diâmetro e caixas coletoras), e o ano de 2018, com a substituição de 12 metros de tubulação da rede. Mais recentemente, em 2022, implementou-se um projeto piloto de instalações de ecocestos em bocas de lobo localizadas na Rua Prof. Benedito Monteiro, após mapeamento de pontos com acúmulo frequente de resíduos (Recife, 2017; Recife, 2018; Recife, 2019; Santos, 2023).

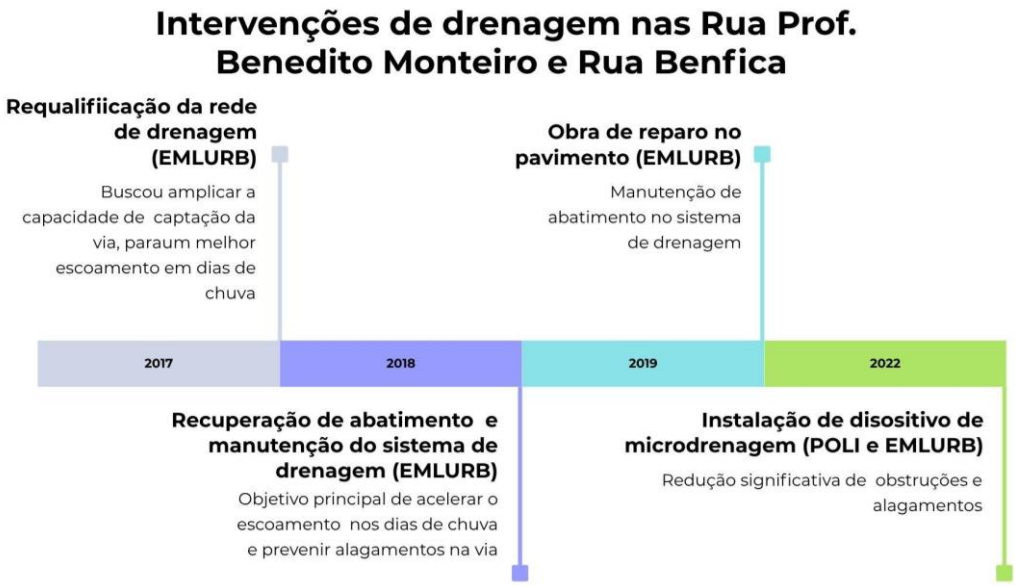


Figura 02: Fluxograma principais obras de drenagem no entorno.
Fonte: Autores (2025).

Embora tenham sido implementadas essas intervenções ao longo dos últimos anos, a ocorrência de alagamentos ainda é verificada em períodos de elevada pluviosidade, evidenciando que, apesar dos avanços proporcionados, as ações realizadas até o momento não se mostraram plenamente eficazes. A Figura 03 registra os episódios de acúmulo de água nas vias adjacentes à instituição, especialmente na Rua Professor Benedito Monteiro, durante o período de maior intensidade pluviométrica, entre abril a julho (APAC, 2025). A persistência de lâminas significativas de alagamento, que ocasionam prejuízos à mobilidade urbana e interrupções temporárias nas atividades acadêmicas, demonstra que as melhorias na macrodrenagem são insuficientes sozinhas. Este cenário valida a necessidade dos resultados apresentados neste trabalho, uma solução de microdrenagem para controlar o volume de escoamento antes que ele sobrecarregue o sistema público. Assim, justifica-se a implantação de um tanque de retardo.



Figura 03: Episódios de alagamento na Escola Politécnica
Fonte: Autores (2025)

Para o dimensionamento, o primeiro passo foi o levantamento das características físicas do lote. Com base na análise dos projetos do campus, identificou-se uma Área total do lote (A) de 8.084,00 m² (ou 0,8084 ha). Foram utilizados os coeficientes de escoamento e abatimento definidos pela lei nos cálculos subsequentes.

Conforme a Equação (1) da metodologia e utilizando os parâmetros estabelecidos pela legislação para tanques de retardo (K = 0,25 e I = 0,06 m/h), foi determinado o volume de armazenamento (Quadro 1). O resultado indica a necessidade de um reservatório capaz de armazenar, no mínimo, 121,26 m³ de águas pluviais.

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
K	Coeficiente de abatimento	0,25	adimensional	Lei Nº 18.112/2015
A	Área total do terreno	8.084	m²	Projeto As Built
I	Intensidade da chuva	0,06	m/h	Lei Nº 18.112/2015
V	Volume Calculado (K·A·I)	121,26	m³	Calculado

Quadro 01: Cálculo do volume do tanque de retardo
Fonte: Autores (2025)

A vazão de saída do reservatório foi calculada pela Equação (2), utilizando os parâmetros de pré-urbanização. O cálculo da vazão de restrição (Quadro 02) demonstra que o tanque deverá liberar a água para a rede pública com uma vazão máxima de 0,02021 m³/s (ou 20,21 litros por segundo), garantindo que o volume de pico seja amortecido.

Para atender ao volume calculado de 121,26 m³ e à vazão de restrição de 0,02021 m³/s, foi realizado o dimensionamento físico do reservatório e do seu orifício de saída. Visando otimizar o espaço em um campus densamente ocupado, propõe-se a execução de um reservatório subterrâneo, localizado sob a área do estacionamento da Escola Politécnica (Figura 04). Esta localização aproveita uma área já impermeabilizada, minimiza a necessidade de remoção de áreas verdes e facilita a captação do escoamento superficial. Para armazenar o volume necessário, definiu-se uma altura útil de 2,0 metros. Desta forma, as dimensões propostas para o tanque são: Área em planta 61,00 m², sendo 10,00 m de comprimento por 6,10 m de largura, totalizando 122 m³ (Figura 05). O diâmetro calculado do orifício de saída (Equação 03) foi de 0,145 m, adotou-se o diâmetro nominal (DN) de 150 mm.

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
Cr	Coeficiente de pré-urbanização	0,15	adimensional	EMLURB (2016)
I	Intensidade da chuva	60	mm/h	Lei Nº 18.112/2015
A	Área total do terreno	0,8084	ha	Projeto As Built
Qr	Vazão de Restrição	0,02021	m³/s	Calculado

Quadro 02: Cálculo da vazão de restrição
Fonte: Autores (2025)

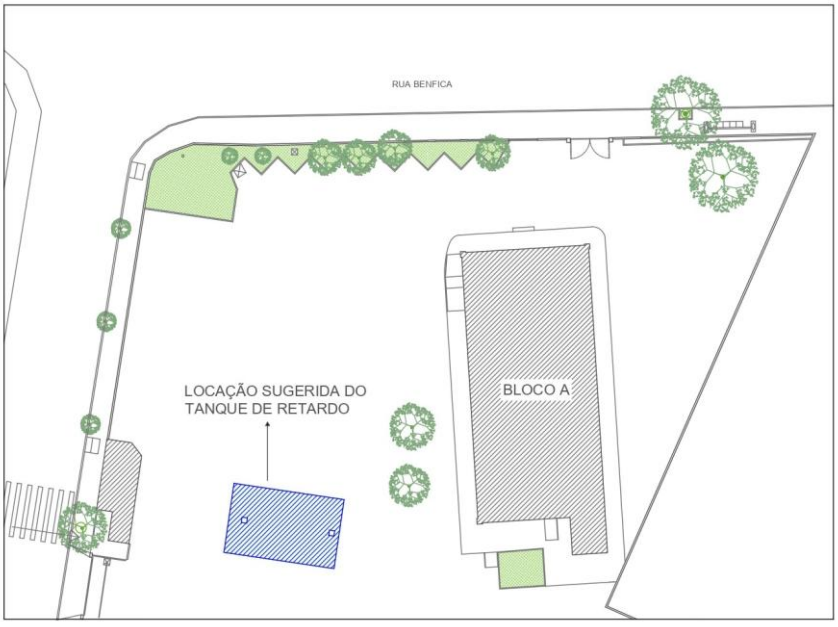


Figura 04: Locação sugerida para o tanque de retardo
Fonte: Autores (2025)

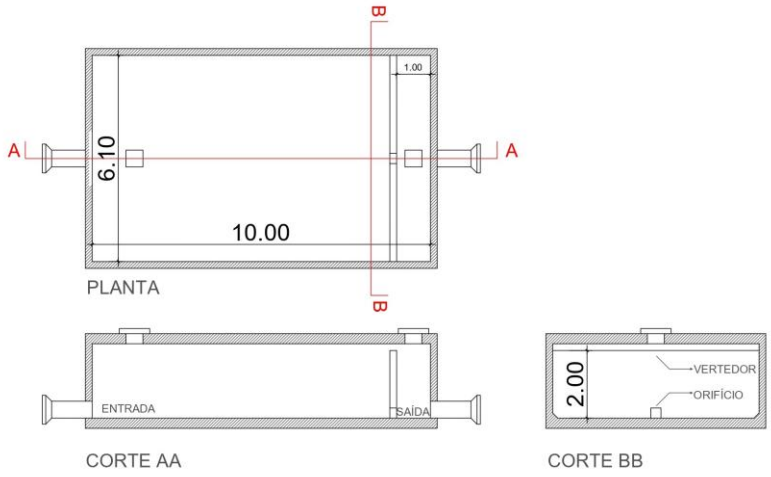


Figura 05: Dimensões propostas para o tanque de retardo
Fonte: Autores (2025)

Considerações Finais

Este trabalho analisou a viabilidade da implantação de um tanque de retardo na Escola Politécnica de Pernambuco (Poli-UPE), visando mitigar os alagamentos locais (Rua Benfica) em conformidade com a Lei Municipal Nº 18.112/2015. O estudo foi motivado pelos impactos diretos das inundações na comunidade acadêmica e na mobilidade do entorno.

Aplicando a metodologia da lei para a área do lote (8.084 m²), o dimensionamento hidrológico resultou em um volume de retardo necessário de 121,26 m³. A vazão de restrição de saída (Qr) foi calculada em 0,02021 m³/s (20,21 L/s). Para esta vazão, utilizando a fórmula de Manning para um tubo de PEAD (N=0,009, S=1), o dispositivo de saída foi dimensionado com um diâmetro interno de 145,3 mm, adotando-se o DN 150 mm comercial.

Conclui-se que a solução é tecnicamente viável, cumpre os requisitos legais e possui potencial para reduzir a contribuição do campus aos alagamentos, sendo proposta a implantação de um reservatório subterrâneo sob o estacionamento. Recomenda-se, para futuros trabalhos, o detalhamento do projeto executivo, incluindo a análise de custos e a integração com outras técnicas compensatórias.

Referências Bibliográficas

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **1º de abril: início da quadra chuvosa do leste de Pernambuco.** Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/noticias/23-noticias/meteorologia/632-1-de-abril-inicio-da-quadra-chuvosa-do-leste-de-pernambuco . Acesso em: 20 out. 2025.

EMLURB - Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (2016). **Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas do Recife (Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente)**. Recife, 2016. 333 p.

GONÇALVES, L. M.; BAPTISTA, L. F. da Silva; RIBEIRO, R. A. O uso de técnicas compensatórias de drenagem para controle dos impactos da urbanização. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 12, n. 1, 2016.

HARARI, J. (Org.). **Noções de oceanografia**. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021.

MELO, T. dos A. T. de *et al.* Desafios para o manejo das águas pluviais na cidade do Recife: a contribuição da UFPE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais** [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2013. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=1348. Acesso em: 26 set. 2025.

RECIFE. **Emlurb inicia obra para reparo no pavimento da Rua Benfica.** Recife, 06 fev. 2019. Disponível em: https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/06/02/2019/emlurb-inicia-obra-para-reparo-no-pavimento-da-rua-benfica. Acesso em: 11 out. 2025.

RECIFE. **Emlurb realiza obra de drenagem na Madalena.** Recife, 21 mai. 2018. Disponível em: https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/21/05/2018/emlurb-realiza-obra-de-drenagem-na-madalena. Acesso em: 16 out.. 2025.

RECIFE. **Lei nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015:** Institui sobre a obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais em novas edificações no Recife. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/a1/pe/r/recife/lei-ordinaria/2015/1812/18112/lei-ordinaria-n-18112-2015-dispoe-sobre-a-

melhoria-da-qualidade-ambiental-das-edificacoes-por-meio-da-obrigatoriedade-de-instalacao-do-telhado-verde-e-construcao-de-reservatorios-de-acumulo-ou-de-retardo-do-escoamento-das-aguas-pluviais-para-a-rede-de-drenagem-e-da-outras-providencias. Acesso em: 4 out. 2025.

RECIFE. **Prefeitura do Recife inicia obra para eliminar ponto de alagamento na Rua Benfica**. Recife, 26 jul. 2017. Disponível em: https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/26/07/2017/prefeitura-do-recife-inicia-obra-para-eliminar-ponto-de-alagamento-na-rua. Acesso em: 11 out. 2025.

SILVA, A. C. *et al.* Medidas para a reabilitação da microdrenagem no entorno da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI/UPE). In: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 12., 2018. **Anais** [...]. Maceió: ABRHidro, 2018. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4407. Acesso em: 12 out. 2025.

SILVA, L. M. A.; SANTOS, Z. G.; MELO, T. A. T. Uso do software TECALT 1.0 como sistema básico de apoio ao manejo das águas pluviais urbanas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 15., 2024, Recife. **Anais** [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2024. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/238/XV-ENAU0016-1-0-20240801-213044.pdf. Acesso em: 1 nov. 2025.

SILVA, R. C. S.; SILVA JUNIOR, M. A. B. da; ALCOFORADO, R. de M. G. VIABILIDADE DO USO DE RESERVATÓRIOS DE ACÚMULO E RETARDO EM ÁREA DE LOTE NO RECIFE-PE. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 15., 2020, [Evento Virtual]. **Anais** [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2020. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/130/XV-SRHNE0139-1-20200802-012230.pdf. Acesso em: 7 nov. 2025.

SANTOS, C. R. L. dos. **Implantação de dispositivos móveis para retenção de resíduos sólidos nos sistemas de micro e macrodrenagem da Cidade do Recife-PE**. 2023. 82 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil , Escola Politécnica de Pernambuco , Universidade de Pernambuco , Recife, 2023.

GESTÃO HÍDRICA URBANA: ANÁLISE COMPARATIVA DOS INDICADORES LEED ND v4 E SITES v2 APLICADOS AO BAIRRO URBITÁ, BRASÍLIA-DF

1Renata Konzen, 2Alessandra Gobbi Santos
1 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: renatakonzen@mx2.unisc.br; 2 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: alessandragobbi@unisc.br

Palavras-chave: Drenagem urbana sustentável; Infraestrutura verde e azul; Certificação ambiental.

Resumo

O crescimento urbano acelerado tem provocado alterações profundas no funcionamento dos sistemas hidrológicos naturais, especialmente em decorrência da impermeabilização do solo, da supressão da cobertura vegetal e da ocupação de áreas naturalmente inundáveis. Esses processos contribuem para o aumento da frequência e da intensidade de eventos de inundação em áreas urbanizadas, além de comprometer a qualidade ambiental dos corpos hídricos urbanos. Nesse contexto, abordagens contemporâneas de planejamento urbano têm incorporado estratégias de drenagem urbana sustentável e soluções baseadas na natureza (SBN) como instrumentos capazes de restaurar processos hidrológicos naturais e aumentar a resiliência das cidades. Paralelamente, sistemas de certificação ambiental aplicados ao ambiente construído passaram a incluir indicadores voltados à gestão hídrica e ao desempenho ambiental de empreendimentos urbanos. Entre esses sistemas destacam-se o *Leadership in Energy and Environmental Design for Neighborhood Development* (LEED ND v4 — Plan) e o *Sustainable Sites Initiative* (SITES v2). O presente estudo tem como objetivo analisar comparativamente os indicadores relacionados à gestão hídrica presentes nesses sistemas de certificação e aplicá-los ao estudo de caso do bairro Urbitá, no Distrito Federal (DF). A metodologia baseou-se em revisão bibliográfica e análise documental de relatórios técnicos elaborados pelo Centro de Tecnologia de Edificações (CTE), a partir dos quais foi construída uma matriz comparativa de indicadores organizada com base na classificação de atendimento utilizada pela consultoria. Os resultados evidenciam convergências entre os sistemas no que se refere à conservação de corpos hídricos, à proteção de áreas inundáveis e ao manejo das águas pluviais. A matriz desenvolvida permitiu identificar oportunidades de aprimoramento no planejamento do empreendimento, especialmente relacionadas à incorporação de estratégias de drenagem urbana sustentável e infraestrutura verde e azul (IVA).

Introdução

O processo de urbanização tem provocado transformações significativas no funcionamento do ciclo hidrológico natural. A substituição da cobertura vegetal por superfícies impermeáveis altera os processos de infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial, aumentando as vazões máximas e reduzindo o tempo de concentração das bacias urbanas (TUCCI, 2008).

Esse processo tem sido amplamente associado ao agravamento dos problemas de enchentes urbanas, uma vez que a urbanização tende a remover a cobertura vegetal original, impermeabilizar o solo e ocupar áreas naturalmente sujeitas a inundações, como planícies aluviais e margens de rios (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Historicamente, os sistemas de drenagem urbana foram concebidos a partir de uma lógica hidráulica baseada na rápida condução das águas pluviais para fora das áreas urbanizadas. Essa abordagem, frequentemente associada à chamada infraestrutura cinza, prioriza soluções de canalização e condução da água por meio de galerias pluviais e canais artificiais (MASCARÓ, 2016).

Entretanto, essa estratégia apresenta limitações significativas, pois ignora o papel fundamental do solo e da vegetação na regulação do ciclo hidrológico urbano. Solos naturais apresentam elevada capacidade de infiltração e armazenamento de água, enquanto superfícies impermeáveis reduzem drasticamente essa capacidade, ampliando o volume de escoamento superficial (MASCARÓ, 2016).

Diante dessas limitações, novas abordagens de planejamento urbano têm buscado integrar princípios de sustentabilidade e resiliência ao desenvolvimento das cidades. O conceito de cidade sustentável reconhece que o espaço urbano deve equilibrar objetivos sociais, ambientais e econômicos, promovendo uma relação mais harmoniosa entre o ambiente construído e os sistemas naturais que sustentam a vida urbana (ROGERS, 2001).

Nesse contexto, abordagens contemporâneas de drenagem urbana passaram a incorporar estratégias baseadas em IVA e SBN. Sistemas como *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e *Green Stormwater Infrastructure* (GSI) buscam reproduzir processos hidrológicos naturais por meio da retenção, infiltração e evapotranspiração das águas pluviais no próprio local onde são geradas (FLETCHER et al., 2015).

Essas abordagens estão alinhadas ao conceito de IVA, que propõe a integração entre sistemas naturais e infraestrutura urbana, utilizando áreas verdes e dispositivos paisagísticos como elementos funcionais para a gestão das águas pluviais (MASCARÓ, 2016).

Além disso, o planejamento urbano contemporâneo tem incorporado conceitos como cidades sensíveis à água e cidades-esponja, que propõem o redesenho da infraestrutura urbana para absorver, infiltrar e reutilizar as águas pluviais, reduzindo o risco de inundações e promovendo maior resiliência urbana (YU, 2014).

Nesse cenário, certificações ambientais aplicadas ao ambiente construído passaram a desempenhar papel relevante na promoção de práticas de desenvolvimento urbano sustentável. Sistemas como LEED ND v4 e SITES v2 estabelecem indicadores voltados à conservação ambiental, à gestão eficiente dos recursos naturais e ao manejo sustentável das águas pluviais em empreendimentos urbanos (USGBC, 2014; SITES INITIATIVE, 2014).

No contexto das estratégias contemporâneas de planejamento urbano sustentável, o bairro Urbitá, localizado no DF, constitui um caso relevante para análise da aplicação de instrumentos de certificação ambiental em projetos urbanos de grande escala. O empreendimento encontra-se em fase de planejamento e desenvolvimento e tem incorporado diretrizes voltadas à qualificação ambiental e à gestão sustentável dos recursos hídricos.

Assim, o presente artigo tem como objetivo analisar comparativamente os indicadores relacionados à gestão hídrica presentes nas certificações LEED ND v4 e SITES v2, aplicando-os ao estudo de caso do bairro Urbitá.

Estratégia Metodológica para Avaliação da Gestão Hídrica Urbana

A pesquisa apresenta caráter qualitativo e exploratório, estruturando-se a partir da integração entre revisão bibliográfica, análise documental e estudo de caso aplicado.

Inicialmente, realizou-se revisão bibliográfica sobre drenagem urbana sustentável, IVA e planejamento urbano sustentável, com base em autores que discutem os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico urbano e as estratégias contemporâneas de gestão das águas pluviais (TUCCI, 2008; MASCARÓ, 2016; MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016). Nesse contexto, o conceito de IVA refere-se a uma rede estrategicamente planejada de áreas naturais, seminaturais e sistemas hídricos urbanos capaz de fornecer múltiplos serviços ecossistêmicos, como regulação hidrológica, melhoria da qualidade ambiental e aumento da resiliência urbana (EUROPEAN COMMISSION, 2020; VEERKAMP et al., 2021).

Posteriormente foi realizada análise documental dos relatórios técnicos elaborados pelo CTE para o empreendimento Urbitá – Etapa 1, os quais apresentam intervenções potenciais relacionadas às certificações LEED ND v4 e SITES v2.

A partir da análise desses documentos foram identificadas as dimensões de desempenho ambiental diretamente relacionadas à gestão hídrica urbana e à infraestrutura verde e azul, incluindo proteção de ecossistemas aquáticos, proteção de áreas inundáveis, implantação ambientalmente sensível, recuperação ecológica de ambientes aquáticos, conservação ecológica de longo prazo, gestão de águas pluviais, gestão avançada de drenagem, uso eficiente da água em paisagismo, gestão da água em áreas externas, infraestrutura de drenagem sustentável, conservação do solo e vegetação, preservação de vegetação significativa e conforto térmico urbano.

Com base nessas dimensões foi elaborada uma matriz comparativa entre os sistemas de certificação LEED ND v4 e SITES v2, permitindo identificar convergências conceituais e operacionais entre os critérios relacionados à gestão hídrica presentes em cada sistema. A avaliação dos critérios foi realizada considerando a classificação adotada nos relatórios técnicos elaborados pelo CTE (2021a; 2021b), que categoriza os requisitos conforme seu grau de atendimento ou necessidade de intervenção no empreendimento.

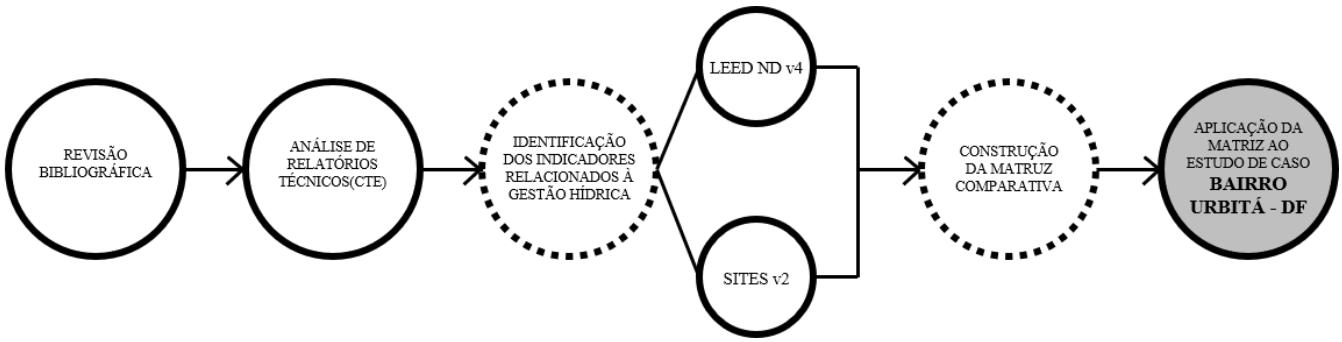


Figura 01: Fluxograma metodológico da pesquisa.
Fonte: elaboração própria (2026)

O projeto do Bairro Urbitá, localizado em Brasília–DF possui uma área de 658,70 ha, estimando-se uma população de 118.607 habitantes (URBANIZADORA PARANOAZINHO, 2018), e sua previsão de implantação é de aproximadamente 30 anos. O sítio escolhido para a implantação do novo bairro corresponde a uma parcela de terra – da antiga Fazenda Paranoazinho (a área privada total da antiga fazenda Paranoazinho possui 1.600 ha, no entanto, o projeto para o novo bairro Urbitá contempla 658,70 ha) – localizada na Região Administrativa de Sobradinho e Grande Colorado, DF, distanciando-se cerca de dez quilômetros do Plano Piloto.

O Plano de Urbanização para o bairro está estruturado através de uma concepção geral urbanística (um *masterplan*) – resultados de diversas assessorias e consultorias como: o escritório Skidmore, Owings and Merrill – SOM (2013), o escritório Gehl Architects – Urban Quality Consultants (2014) e equipe da PPS (Project for Public Spaces) em 2014. A partir do *masterplan*, desdobra-se em projetos urbanísticos menores, organizados em etapas – denominadas etapas 1,2,3 e 4.

Para a Etapa 1, com base no projeto urbanístico do empreendimento, a Urbanizadora Paranoazinho (UP) contratou, entre 2020 e 2021, o CTE para realizar uma análise técnica e simulação preliminar do potencial de certificação, considerando as

categorias de sustentabilidade e os indicadores estabelecidos pelos sistemas LEED ND v4 e SITES v2 aplicáveis ao empreendimento. O estudo resultante foi denominado *Diagnóstico e Diretrizes Smart Cities para o Bairro Urbitá* (CTE, 2021c).

A partir de uma série de indicadores entre os dois selos de qualidade, treze foram voltados diretamente à gestão de recursos hídricos e à IVA, a qual corresponde à rede integrada de espaços vegetados e sistemas hídricos urbanos capaz de reproduzir processos naturais de regulação da água, fornecendo serviços ecossistêmicos e contribuindo para a resiliência climática das cidades.

Na sequência, a matriz foi aplicada ao estudo de caso do empreendimento Urbitá, possibilitando a análise da aderência dos indicadores ao contexto do projeto. Para fins de aprofundamento analítico, foi selecionado um dos indicadores relacionados à gestão de águas pluviais, permitindo explorar de forma mais detalhada a relação entre os critérios das certificações e as estratégias projetuais adotadas no empreendimento.



Figura 02: Localização do bairro Urbitá no contexto regional e organização espacial do empreendimento, com destaque para a delimitação da Etapa 1 adotada neste estudo.
Fonte: adaptado de SANTOS (2025)

Resultados e Discussão

A análise comparativa entre os critérios relacionados à gestão hídrica presentes nas certificações LEED ND v4 e SITES v2 foi sistematizada por meio da matriz apresentada na Tabela 1. A matriz relaciona os critérios identificados nos relatórios técnicos do empreendimento Urbitá com dimensões de desempenho ambiental associadas à gestão hídrica urbana, permitindo comparar a abordagem adotada por cada sistema de certificação e avaliar o grau de atendimento dos requisitos no projeto analisado.

A classificação dos critérios foi realizada com base na metodologia adotada nos relatórios técnicos elaborados pelo CTE, que categoriza os requisitos conforme seu grau de atendimento ou necessidade de intervenção no projeto, classificando-os nas categorias: Atendido (AT); Intervenção nível 1 (IT1); Intervenção nível 2 (IT2); Não atendido (NA); Não pleiteado (NPL); e Não aplicável (NAP).

Os resultados indicam que parte dos critérios analisados corresponde a requisitos obrigatórios das certificações, especialmente aqueles relacionados à proteção de ecossistemas aquáticos, à proteção de áreas inundáveis e ao manejo das águas pluviais no terreno. Esses critérios evidenciam a importância atribuída pelos sistemas de certificação à conservação de processos hidrológicos naturais e à proteção de ambientes sensíveis à urbanização.

A análise da matriz demonstra que critérios associados à conservação de corpos hídricos, proteção de áreas alagáveis e conservação de ecossistemas aquáticos aparecem como requisitos estruturais nos dois sistemas de certificação. Esses critérios refletem a necessidade de integrar o planejamento urbano à proteção de ambientes naturais, evitando a ocupação de áreas suscetíveis a inundação e garantindo a manutenção das funções ecológicas associadas aos corpos hídricos.

No caso específico do empreendimento Urbitá, os critérios classificados como Intervenção nível 1 (IT1) indicam situações em que o projeto apresenta condições iniciais de atendimento aos requisitos, mas ainda demanda ajustes pontuais para alinhamento às diretrizes das certificações. Esses casos estão relacionados principalmente a estratégias de implantação ambientalmente sensível, gestão da paisagem e uso eficiente da água em áreas externas, que podem ser incorporadas ao projeto por meio de ajustes no planejamento urbano e na especificação de soluções paisagísticas.

Por outro lado, os critérios classificados como Intervenção nível 2 (IT2) indicam a necessidade de intervenções mais significativas no planejamento do empreendimento. Esses casos estão predominantemente associados ao manejo das águas pluviais e à implementação de estratégias de drenagem urbana sustentável, incluindo soluções capazes de promover retenção, infiltração e controle do escoamento superficial gerado pela urbanização.

Entre os critérios relacionados ao manejo das águas pluviais destacam-se o manejo da água de chuva, presente no sistema LEED ND v4, e o manejo da precipitação no terreno, presente no sistema SITES v2. Embora denominados de forma

distinta em cada sistema de certificação, esses critérios apresentam objetivos semelhantes, voltados à integração de estratégias de gestão das águas pluviais ao planejamento urbano e ao desenho da paisagem.

Além disso, o sistema SITES v2 apresenta um conjunto mais amplo de critérios relacionados à gestão ecológica da paisagem, incluindo requisitos voltados à conservação de solos saudáveis, preservação de vegetação significativa e recuperação de ecossistemas aquáticos. Esses critérios indicam uma abordagem mais detalhada em relação à funcionalidade ecológica do terreno e à integração entre paisagem e infraestrutura verde e azul.

Outro aspecto relevante identificado na análise refere-se aos critérios associados ao uso eficiente da água e à redução do consumo hídrico em áreas externas, como aqueles relacionados à redução do uso de água para irrigação e à adoção de estratégias de paisagismo adaptadas às condições climáticas locais. Esses critérios demonstram que a gestão hídrica urbana não se limita ao controle do escoamento superficial, envolvendo também estratégias voltadas à eficiência no uso da água no ambiente urbano.

A matriz comparativa evidencia ainda que alguns critérios presentes no sistema SITES v2 não possuem correspondência direta no LEED ND v4, especialmente aqueles relacionados à conservação de solos e vegetação e à estruturação de estratégias específicas de drenagem sustentável. Essa diferença indica que o sistema SITES apresenta maior aprofundamento técnico na abordagem da paisagem como infraestrutura ambiental.

Por outro lado, o LEED ND v4 apresenta maior ênfase em aspectos relacionados à implantação urbana e à localização ambientalmente adequada dos empreendimentos, evidenciando que os dois sistemas atuam em escalas complementares de planejamento.

Nesse contexto, a análise comparativa indica que a utilização combinada desses sistemas pode contribuir para a construção de estratégias mais integradas de planejamento urbano sustentável. Enquanto o LEED ND v4 orienta decisões relacionadas à localização e estruturação do desenvolvimento urbano, o SITES v2 fornece diretrizes mais detalhadas para a gestão ecológica da paisagem e das águas pluviais.

Assim, a matriz apresentada na Tabela 1 constitui uma ferramenta analítica capaz de identificar convergências e lacunas entre os sistemas de certificação, além de apoiar a definição de diretrizes de planejamento voltadas à gestão hídrica urbana sustentável no empreendimento analisado.

	Indicador LEED ND v4	Meta no projeto (LEED)	Classificação CET (LEED)	Indicador equivalente SITES v2	Meta no projeto (SITES)	Classificação CET (SITES)
	Conservação de corpos hídricos e áreas alagáveis	Obrigatório	IT1	Conservar ecossistemas aquáticos	Obrigatório	IT2
	Gestão de ocupação de áreas alagáveis	Obrigatório	IT2	Proteger as funções das áreas inundáveis	Obrigatório	IT1
	Implantação para conservação do habitat natural e corpos hídricos	Não é meta	NPL	Conservar ecossistemas aquáticos	Obrigatório	IT2
	Restauração do habitat, zonas alagadas e corpos hídricos	Não é meta	NPL	Recuperar ecossistemas aquáticos	Sim é meta	IT2
	Conservação a longo prazo de habitats ou zonas alagadas e corpos hídricos	Não é meta	NPL	Conservar ecossistemas aquáticos	Obrigatório	IT2
	Manejo da água de chuva	Não é meta	IT2	Manejo da precipitação no terreno	Obrigatório	IT2
	Manejo da água de chuva	Não é meta	IT2	Manejo avançado da precipitação no terreno	Não é meta	IT2
	—	—	—	Reduzir o uso da água para irrigação	Obrigatório	IT2
	—	—	—	Reduzir o uso da água nas áreas externas	Não é meta	NPL
	—	—	—	Prever estratégias de drenagem sustentável de águas pluviais	Não é meta	NPL
	—	—	—	Conservar solos saudáveis e vegetação adequada	Não é meta	NPL
	—	—	—	Conservar vegetação significativa	Não é meta	NPL
	Redução dos efeitos de ilhas de calor	Sim é meta	IT2	Reduzir o efeito ilhas de calor	Sim é meta	IT2

Tabela 01: Matriz comparativa dos indicadores de gestão hídrica das certificações LEED ND v4 e SITES v2 aplicada ao empreendimento Urbitá. Fonte: elaboração própria com base em CTE (2021a; 2021b), USGBC (2014) e SITES Initiative (2014)

No que diz respeito à aplicação da matriz no estudo de caso, foi selecionado o indicador relacionado à gestão de águas pluviais para aprofundamento analítico, com o objetivo de evidenciar como os critérios das certificações se traduzem em estratégias projetuais no empreendimento.

Nos sistemas LEED ND v4 e SITES v2, esse indicador está associado ao manejo das águas pluviais no terreno, estabelecendo diretrizes voltadas à retenção, infiltração e controle do escoamento superficial. Enquanto o LEED ND enfatiza a gestão do volume de escoamento e a mitigação de impactos hidrológicos, o SITES v2 apresenta maior detalhamento técnico quanto às estratégias de infiltração e integração com a paisagem, evidenciando o caráter complementar entre os dois sistemas.

No caso do empreendimento Urbitá, as soluções adotadas baseiam-se na condução das águas pluviais para dispositivos de detenção, denominados bacias de quantidade e qualidade, responsáveis por reter e regular os volumes gerados pelas áreas impermeáveis. Conforme os estudos técnicos, estima-se um volume de retenção de aproximadamente 1.832 m³, associado a uma área impermeável de cerca de 117.437 m².

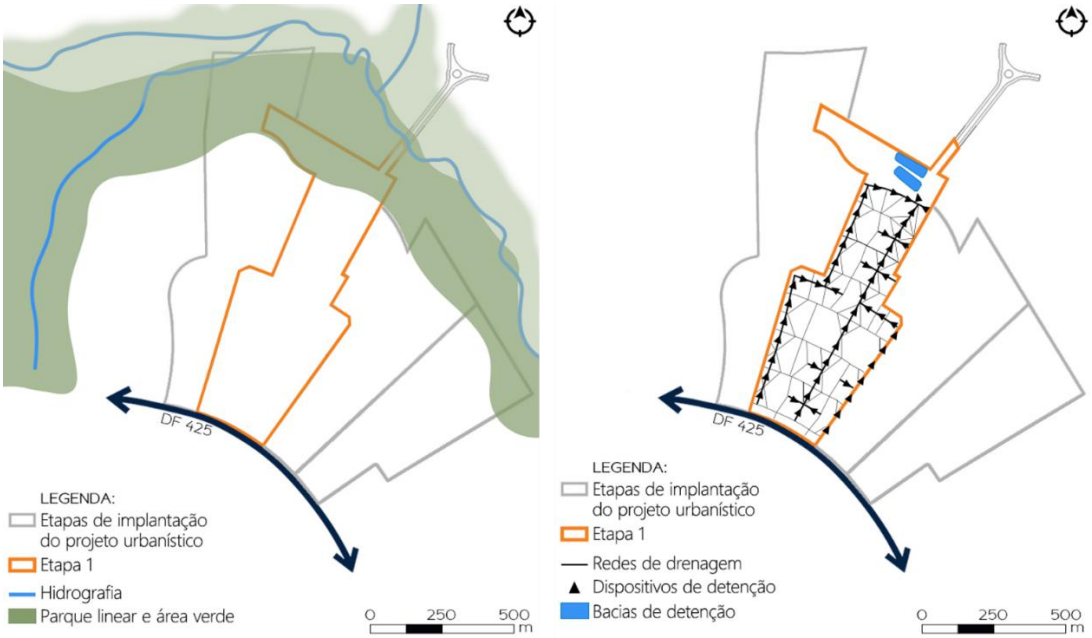


Figura 03: Contexto hidrográfico e localização dos dispositivos de drenagem no empreendimento Urbitá – DF. Fonte: elaboração própria com base em SANTOS (2025) e CTE (2021c)

Além disso, o projeto prevê a incorporação de SBNs, como a utilização de biovaletas ao longo do sistema viário, destinadas a promover a infiltração e o retardo do escoamento superficial. Complementarmente, são consideradas soluções como jardins de chuva e pavimentos permeáveis, que contribuem para o aumento da infiltração, retenção e redução do escoamento superficial.

Essas estratégias evidenciam a aplicação integrada dos princípios de drenagem urbana sustentável no empreendimento, alinhando-se às diretrizes estabelecidas pelos sistemas de certificação analisados.

Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo analisar os critérios relacionados à gestão hídrica presentes nas certificações ambientais LEED ND v4 e SITES v2, aplicando-os ao estudo de caso do empreendimento Urbitá. A partir da análise documental dos relatórios técnicos elaborados pelo Centro de Tecnologia de Edificações (CTE), foi possível compreender de que forma os requisitos dessas certificações se relacionam com estratégias contemporâneas de planejamento urbano voltadas à gestão sustentável das águas pluviais.

A matriz comparativa desenvolvida neste estudo permitiu sistematizar dimensões de desempenho ambiental associadas à conservação de ecossistemas aquáticos, proteção de áreas inundáveis, manejo das águas pluviais e uso eficiente da água em áreas externas. A aplicação dessa matriz ao estudo de caso evidenciou que parte dos critérios analisados já se encontra contemplada no planejamento do empreendimento, especialmente aqueles relacionados à preservação de áreas naturais e à proteção de corpos hídricos.

Por outro lado, a análise indicou a presença de critérios classificados como IT1 e IT2, evidenciando oportunidades de aprimoramento no planejamento do empreendimento, sobretudo no que se refere à incorporação de estratégias de drenagem urbana sustentável e de IVA. A implementação dessas estratégias pode contribuir para reduzir os impactos hidrológicos associados à urbanização e aumentar a resiliência urbana frente a eventos climáticos extremos.

A comparação entre os sistemas de certificação evidenciou também diferenças de abordagem entre as certificações analisadas. Enquanto o LEED ND v4 apresenta maior ênfase em aspectos relacionados à localização e à implantação ambientalmente adequada dos empreendimentos, o sistema SITES v2 apresenta maior aprofundamento técnico na gestão ecológica da paisagem e no manejo da precipitação no terreno. Dessa forma, os resultados indicam que a utilização combinada desses sistemas pode contribuir para a construção de estratégias mais integradas de planejamento urbano sustentável.

Por fim, destaca-se que a matriz analítica desenvolvida neste estudo constitui uma ferramenta capaz de apoiar a avaliação de empreendimentos urbanos sob a perspectiva da gestão hídrica, contribuindo para a integração entre planejamento urbano, IVA e

conservação ambiental. No estudo de caso do empreendimento Urbitá, sua aplicação permitiu evidenciar a presença de estratégias alinhadas às certificações analisadas, bem como identificar oportunidades de aprimoramento relacionadas à drenagem urbana sustentável. Estudos futuros podem aprofundar essa abordagem por meio da aplicação da matriz em outros empreendimentos urbanos, ampliando a compreensão sobre o papel das certificações ambientais no desenvolvimento de cidades mais resilientes e sustentáveis.

Além disso, destaca-se que a matriz analítica desenvolvida neste estudo demonstrou potencial como instrumento de apoio à tomada de decisão em processos de planejamento urbano, ao permitir a identificação sistematizada de convergências e lacunas entre os sistemas de certificação analisados. Sua aplicação no estudo de caso evidenciou a possibilidade de tradução de critérios técnicos em estratégias projetuais concretas, contribuindo para a incorporação de SBNs e para o fortalecimento da resiliência urbana frente aos desafios hidrológicos contemporâneos.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade de Santa Cruz do Sul (PPGTA/UNISC) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado (modalidade II).

Referências Bibliográficas

CENTRO DE TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES (CTE). Diagnóstico e Diretrizes Smart Cities para o Bairro Urbitá. São Paulo: CTE, 2021c.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES (CTE). Intervenções a serem incorporadas no desenvolvimento dos projetos visando à certificação LEED ND Plan do projeto Urbitá – Fase 1. São Paulo: CTE, 2021a.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES (CTE). Intervenções relacionadas à certificação Sustainable Sites (SITES) com potencial de serem incorporadas ao empreendimento Urbitá – Fase 1. São Paulo: CTE, 2021b.

EUROPEAN COMMISSION. *Green infrastructure strategy: enhancing Europe's natural capital.* Brussels: European Commission, 2020.

FLETCHER, Tim D. et al. SUDS, LID, BMPs and more – the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 7, 2015.

LEITE, Carlos; AWAD, Juliana. *Cidades sustentáveis, cidades inteligentes.* Porto Alegre: Bookman, 2012.

MASCARÓ, Juan Luis. *Infraestrutura urbana para o século XXI.* Porto Alegre: Masquatro, 2016.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; REZENDE, Osvaldo Moura. *Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade.* Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

PARANÁ. *Manual de drenagem urbana: Região Metropolitana de Curitiba.* Curitiba: SUDERHSA, 2002.

ROGERS, Richard. *Cidades para um pequeno planeta.* Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2001.

SANTOS, Alessandra Gobbi. *Habitação na cidade III: o caso do bairro Urbitá, Brasília: uma análise da cidade à casa.* Santa Cruz do Sul: EDUNISC, 2025.

SITES INITIATIVE. *The Sustainable Sites Initiative v2: rating system for sustainable land design and development.* Washington, DC: Green Business Certification Inc., 2014.

TUCCI, Carlos E. M. Águas urbanas. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

URBANIZADORA PARANOAZINHO S.A. Memorial descritivo – Plano de Urbanização – Urbitá – Fazenda Paranoazinho (MDE-PDU). Brasília, 2018.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC). *LEED v4 for Neighborhood Development.* Washington, DC, 2014.

VEERKAMP, C. J. et al. Blue-green infrastructure planning for urban resilience. *Environmental Science and Policy*, 2021.

YU, Kongjian. Sponge Cities: a new paradigm for flood management. *Landscape Architecture Frontiers*, 2014.

DINÂMICA DO DESENVOLVIMENTO DA BIOMASSA VEGETAL COMPARATIVA ENTRE JARDIM DE CHUVA E TRADICIONAL

1 Lucas Albuquerque de Lima, 2 João Guilherme Rodrigues Moreira, 3 Alana Késsia Bandeira Cavalcante, 4 Maria Thereza Rocha Chaves, 5 Teresa Raquel Lima Farias

1, 2 e 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mails: lucas.albuquerque06@aluno.ifce.edu.br; guilherme.moreira08@aluno.ifce.edu.br; alana.kessia62@aluno.ifce.edu.br; 4 Universidade Federal do Ceará, e-mail: mtchaves50@gmail.com; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: teresafarias@ifce.edu.br

Palavras-chave: Biorretenção; Biomassa da planta; Infraestrutura verde.

Resumo

A crescente urbanização tem intensificado a impermeabilização do solo e amplificado o escoamento superficial urbano. Como alternativa para drenagem urbana, as infraestruturas verdes surgem como uma das soluções para as atuais problemáticas de drenagem, tendo como possibilidade a utilização de jardins de chuva. Este estudo teve como objetivo comparar o desenvolvimento da biomassa (massas seca e úmida) de quatro espécies ornamentais (*Chlorophytum comosum, Dracena reflexa, Ruellia simplex e Sansevieria trifasciata*) cultivadas em um jardim de chuva (JC) e em um jardim tradicional (JT), avaliando sua relação com o aporte de água nos jardins. A pesquisa analisou o desenvolvimento vegetal após um ano de plantio, por meio da quantificação das massas seca e úmida. Durante o período de monitoramento, o JT recebeu um volume de 5,87 m³ de água, proveniente de precipitação direta, enquanto o JC recebeu 225,51 m³ (38 vezes mais), advinda de precipitação direta somada volume escoado de uma área contribuinte. A espécie *Sansevieria trifasciata* demonstrou maior adaptação e resiliência ao JC, apresentando valor médio de umidade da biomassa maior no JC (52%) se comparado ao JT (9%). Por outro lado, *Ruellia simplex* apresentou biomassas semelhantes nos dois jardins, com umidades de 46,75% (JC) e 45,46% (JT), sugerindo possível redução na oxigenação do sistema radicular (hipóxia radicular). As espécies *Dracaena reflexa* e *Chlorophytum comosum* exibiram desempenho intermediário, com valores de umidade da biomassa elevados (313,79 g e 47,30 g, respectivamente) no ambiente de jardim de chuva. Desse modo, conclui-se que o regime hídrico, mediado pelo volume de água aportado, atua como fator determinante na seleção funcional das espécies, sendo indispensável para o desempenho de jardins de chuva presentes em regiões tropicais.

Introdução

A urbanização das cidades vem crescendo de forma acelerada, intensificando a impermeabilização do solo, alterando o ciclo hidrológico e aumentando o escoamento superficial urbano (Johnston; Balster; Thompson, 2020). Nesse contexto, os jardins de chuva, surgem como uma alternativa para mitigar problemas relacionados a inundações por meio de processos de infiltração, detenção e evapotranspiração (Chen; Huang; Wang, 2025; Johnston; Balster; Thompson, 2020). Dentro desses sistemas, a vegetação exerce forte influência, contribuindo além do aspecto estético na manutenção da porosidade estrutural do solo por meio do desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Por meio desse sistema radicular, macroporos são criados elevando a condutividade hidráulica saturada, o que facilita a drenagem de forma mais profunda. A particularidade dos jardins de chuvas, submete as plantas presentes em seu sistema a ciclos extremos de saturação e seca severa, forçando as espécies a desenvolverem adaptações morfológicas específicas (Chen; Huang; Wang, 2025; Johnston; Balster; Thompson, 2020). Analisar a massa seca da biomassa vegetal permite compreender como está o equilíbrio funcional da planta e sua capacidade de resiliência, refletindo diretamente nos mecanismos de alocação de biomassa que a planta realiza para garantir sua sobrevivência e na otimização da infiltração da água no solo (Fernandes; Brachtvogel; Reis, 2019; Poorter *et al.*, 2012). Existe uma lacuna sobre estudos de jardins de chuva desenvolvidos em regiões tropicais, e sobre quais espécies estão adaptadas a esse tipo de clima, tendo maior volume de estudos sobre esse tipo de sistema em climas temperados (Lisenbee *et al.*, 2022; Chaves *et al.*, 2024). Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo realizar o comparativo da biomassa seca e úmida de espécies ornamentais cultivadas em um jardim de chuva e em um jardim tradicional controle, correlacionando a biomassa acumulada ao final de um período de monitoramento de um ano, com o volume de água aportado ao sistema de biorretenção.

Material e Métodos

Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida no Campus Fortaleza do Instituto Federal do Ceará, localizado na cidade de Fortaleza - CE, (3° 44' 40.416" N 38° 32' 10.252" O). A região apresenta um clima classificado como Aw – tropical chuvoso quente e úmido, seguindo a classificação de Köppen-Geiger.

O estudo comparou dois ambientes de jardins (Figura 01), o Jardim Tradicional (JT) controle, que recebeu apenas contribuição da precipitação direta, e o Jardim de Chuva (JC), que recebeu o escoamento proveniente de um telhado com uma área de contribuição de aproximadamente 180 m². Os dois jardins foram posicionados lado a lado e recebiam uma intensidade solar similar. Nos dois jardins as plantas foram cultivadas em um substrato padronizado, garantindo que as variações do sistema radicular dependessem diretamente da influência do regime hídrico, da plasticidade das espécies e do tipo de estrutura (Aman *et al.*, 2024; Johnston; Balster; Thompson, 2020).

Quatro espécies de plantas ornamentais foram avaliadas (Figura 02), sendo estas comumente cultivadas nos jardins presentes no campus, sendo portanto, já adaptadas às condições locais. As espécies analisadas foram o Clorofito ou Planta aranha (*Chlorophytum comosum*) utilizada também por Chaves *et al.* (2026), Li (2016), Pivetta *et al.* (2022) e Yang *et al.* (2024), Dracena (*Dracaena reflexa*) presente nos trabalhos de Abdulkadir *et al.* (2024), Galagoda *et al.* (2018) e Macedo *et al.* (2022), Petúnia mexicana (*Ruellia simplex*) estudada por Silva (2016), Li e Liu (2023) e Yan *et al.* (2023) e a Espada-de-São-Jorge (*Sansevieria trifasciata*) cultivada também nos trabalhos de Aguirre-Álvarez *et al.* (2023), Akther (2020), Lopes e Silva (2021), Macedo *et al.* (2017).

O plantio das mudas nas duas estruturas de jardins ocorreu no dia 11/04/2023 para as espécies *Sansevieria trifasciata*, *Ruellia simplex* e *Dracaena reflexa*, e no dia 05/05/2023 para a espécie C*hloropytum comosum.*



Figura 01: Jardim de Chuva e Jardim Tradicional.
Fonte: Autores (2025)



Figura 02: Espécies utilizadas nos jardins de chuva e controle.
Fonte: Autores (2025)

Processamento e determinação da biomassa vegetal

Ao final de um ano de monitoramento, foi realizado a coleta do material vegetal, tanto da parte aérea como também o sistema radicular das plantas (Figura 03). De forma manual as amostras foram separadas do solo e seguida de lavagem com jatos de água cuidadosos, assegurando a retenção de raízes finas e pelos radiculares, conforme recomendado por Freschet *et al.* (2021) e Moslehi *et al.* (2021). Uma vez realizada a limpeza do material, este foi acondicionado em sacos de papel com a devida identificação e submetido à secagem na estufa de circulação forçada de ar com temperaturas variando entre 65° e 75° C até apresentarem massa constante, conforme também executado nos trabalhos de Fernandes, Brachtvogel, Reis (2019) e Freschet *et al.* (2021). A pesagem foi realizada em uma balança analítica com precisão de 0,01 g para determinação da massa seca (g) e massa úmida (g).

Após a secagem, os dados obtidos por meio da pesagem das massas úmida e seca, assim como os cálculos de umidade, foram organizados em uma planilha eletrônica. A quantidade reduzida de repetições por tratamento (n=2) levou a realização de uma análise descritiva dos dados, tendo como foco a caracterização do comportamento de cada uma das espécies presentes no jardim de chuva e no jardim tradicional.

As médias aritméticas da umidade, massas seca e úmida foram calculadas. A variação percentual entre os tratamentos foi utilizada como métrica de comparação para a identificação dos ganhos ou perdas de biomassa e aferir as alterações de retenção de umidade dos tecidos vegetais.



Figura 03: Coleta do sistema radicular.
Fonte: Autores (2025)

Volume total de água acumulado

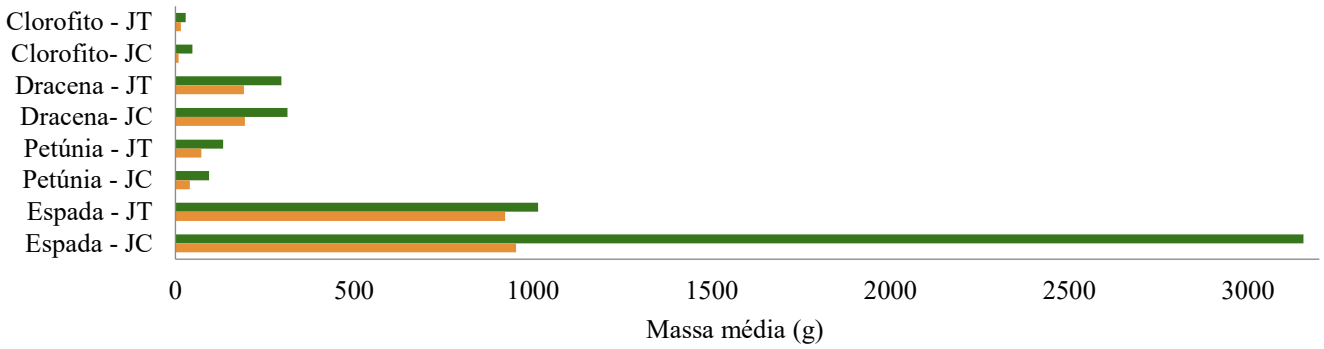
O volume total de água aportado ao jardim de chuva (JC) foi calculado considerando-se a precipitação direta sobre sua superfície (4,24 m²) somada ao volume escoado da área de contribuição adjacente, totalizando 225,51 m³ no período de monitoramento. Paralelamente, o jardim tradicional (JT) recebeu apenas o volume proveniente da precipitação direta sobre sua superfície, correspondente a 5,87 m³ no mesmo período. Posteriormente, avaliou-se a relação entre os diferentes volumes hídricos aportados a cada sistema e a biomassa vegetal (massas seca e úmida) das quatro espécies estudadas.

Resultados e Discussão

As análises dos dados de biomassa e umidade apresentaram respostas distintas entre as espécies presentes no jardim de chuva ao serem comparadas com as do jardim tradicional. Essa variabilidade presente nos resultados consiste na capacidade individual das espécies se adaptarem às flutuações hídricas dos sistemas de biorretenção (Chen; Huang; Wang, 2025), demonstrando que as condições eco-hidrológicas exercem influência direta na alocação de biomassa das plantas. O valor total de água que o jardim tradicional recebeu no intervalo analisado foi de 5,87 m³ (5870 litros) de água, já no jardim de chuva foi de 225,51 m³ (225510 litros), apresentando uma diferença de 219,64 m³ (219640 litros), ou seja, um volume 38 vezes maior no jardim de chuva.

O clorofito, a dracena e a espada-de-são-Jorge apresentaram valores de massa úmida maiores para as espécies presentes no jardim de chuva (Figura 04). Segundo Poorter *et al.* (2012), espécies que são submetidas a um aporte hídrico muito elevado tendem a acumular maior conteúdo de água nos tecidos, sem que a produção de massa seca seja comprometida. Na Figura 05 é possível observar que o clorofito apresentou elevado valor de umidade média no JC, sendo superior a 80%, sugerindo que a espécie apresenta alta capacidade de retenção hídrica. O Clorofito é uma espécie herbácea com apresenta raízes carnosas e seu crescimento ocorre em colônias densas, favorecendo a absorção e armazenamento de água (Lorenzi, 2015). Essas características e comportamento da espécie contribuem para a regulação hídrica do sistema, controlando a umidade do solo, além de reduzir as variações bruscas no regime hídrico.

A espada-de-São-Jorge apresentou em relação às outras espécies, maior adaptabilidade ao ambiente do jardim de chuva e resiliência biológica, tendo como diferença no valor das massas úmida e seca no jardim de chuva de 2203,06 g, enquanto no jardim tradicional o resultado foi de 92,12 g. O incremento na biomassa sugere que a espécie investe em um mecanismo de ancoragem e absorção, quando submetida a um regime de inundação temporária (Johnston; Balster; Thompson, 2020). Tal comportamento se deve às suas características morfofisiológicas, que apresentam metabolismo adaptado à conservação hídrica, presença de tecidos suculentos e sistema rizomatoso, contribuindo para o armazenamento e uso eficiente da água (Lorenzi, 2015).



	Espada - JC	Espada - JT	Petúnia - JC	Petúnia - JT	Dracena- JC	Dracena - JT	Clorofito- JC	Clorofito - JT
Massa umida (g)	3155,83	1014,73	94,43	133,32	313,79	296,25	47,30	28,90
Massa seca (g)	952,77	922,61	40,67	72,36	193,97	191,52	8,64	15,42

Figura 04: Massas úmida e seca médias (g) das espécies vegetais comparativa entre jardim de chuva (JC) e jardim tradicional (JT).
Fonte: Autores (2025)

Os resultados obtidos para *Dracaena reflexa* foram mais estáveis, apresentando diferença entre massa úmida e massa seca de 119,83 g no jardim de chuva e 104,73 g no jardim tradicional, respectivamente. Segundo Chen, Huang e Wang (2025), espécies que conseguem manter sua estabilidade fotossintética em condições de estresse hídrico são espécies prioritárias para infraestruturas verdes.

A petúnia apresentou resultados distintos dos observados para a espada-de-são-jorge (Figura 04), com redução da biomassa no jardim de chuva (53,76 g) em relação ao jardim tradicional (60,96 g). Esse comportamento sugere que, quando submetida a um período prolongado de saturação hídrica, o desenvolvimento da planta torna-se limitado por meio do processo de hipóxia radicular (Moslehi *et al.*, 2021). Contudo Chaves *et al.* (2025) verificaram um crescimento relativo em altura estatisticamente superior no jardim chuva em relação ao jardim tradicional, por conta do estresse relativo ao excesso hídrico, a planta investiu no desenvolvimento vegetal para compensar o estresse, resultando em redução da massa úmida e aumento da massa seca. O valor de umidade da petúnia no jardim de chuva (46,75%) foi similar ao do jardim tradicional (45,46%), como pode ser visto na Figura 05, indicando uma possível saturação hídrica, dificultando a aeração do sistema radicular (Chen; Huang; Wang, 2025).

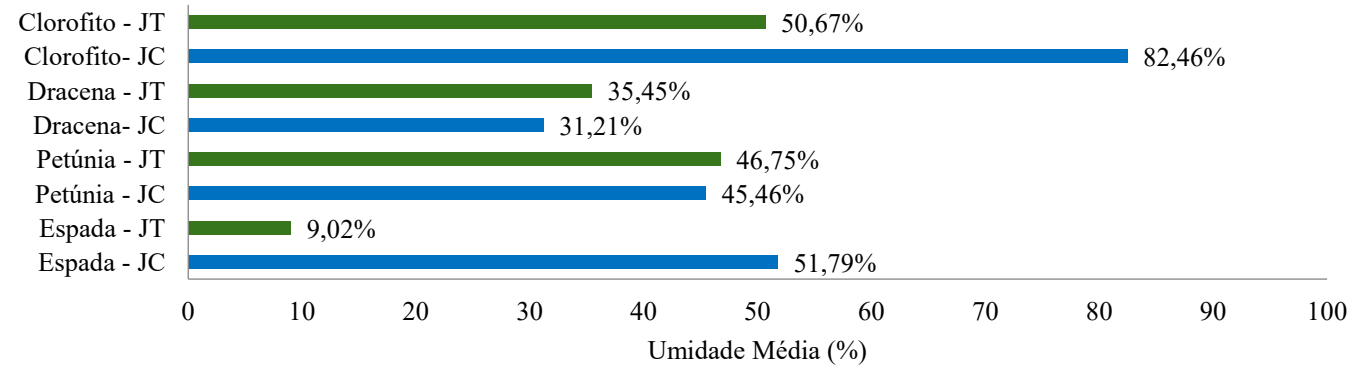


Figura 05: Umidade Média (%) das espécies vegetais comparativa entre jardim de chuva (JC) e jardim tradicional (JT).
Fonte: Autores (2025)

O volume de água acumulado no sistema exerceu sobre as espécies analisadas, de forma indireta, uma pressão de seleção funcional, favorecendo as espécies com maior tolerância ao regime hídrico do jardim de chuva e capacidade de se adaptar as condições de saturação intermitente.

O incremento na umidade média das espécies de espada-de-são-Jorge no jardim de chuva (51,7%) em relação ao jardim tradicional (9,02%), sugere que a espécie realiza um investimento em uma biomassa mais robusta contribuindo para um maior suporte aos pulsos de escoamento e otimizar absorção em condições de saturação temporária.

Por outro lado, plantas como a petúnia, que reduziu sua biomassa seca no jardim de chuva, demonstra que algumas espécies não apresentam a mesma adaptabilidade a regimes hídricos intensos. Em alguns casos, a exposição à saturação hídrica

eleva a umidade dos tecidos das raízes, contribuindo para a um processo de estresse fisiológico, o que compromete a longevidade da planta e consequentemente a eficiência do jardim a longo prazo.

O comportamento das espécies reforça que a eficiência de um jardim de chuva também depende das características morfofisiológicas das espécies selecionadas e do regime hídrico na qual serão submetidas. O rigor de seleção das espécies não apenas contribui para o desenvolvimento vegetal, mas também beneficia funções ecossistêmicas, como infiltração, retenção de água e estabilidade da estrutura do solo.

Comentários finais

O volume total de água aportado exerceu influência eco-hidrológica sobre a adaptabilidade das espécies cultivadas no jardim chuva. Diferentemente do jardim tradicional, que recebeu apenas precipitação direta (5,87 m³), o jardim de chuva acumulou 225,51 m³ (38 vezes mais) ao incorporar também o escoamento de sua área de contribuição. Esse aporte hídrico expressivo conduziu a resultados mais robustos em espécies com maior tolerância a flutuações hídricas e capacidade de adaptação a condições adversas. Os resultados sugerem que tanto a espada-de-São-Jorge (*Sansevieria trifasciata*) como a dracena (*Dracaena reflexa*) apresentaram comportamento promissor para sistemas de biorretenção. Essas espécies contribuem para a reserva hídrica da vegetação durante períodos de estiagem, além de favorecerem a manutenção da estrutura porosa do solo por meio do incremento da biomassa radicular, o que potencializa as taxas de infiltração e evapotranspiração. Por outro lado, a petúnia-mexicana (*Ruellia simplex*) apresentou biomassa e teor de umidade semelhantes no jardim de chuva (53,76 g; 46,75%) e no jardim tradicional (60,96 g; 45,46%). Esse comportamento indica tolerância à saturação hídrica, porém com possível comprometimento da oxigenação radicular (hipóxia), o que pode limitar a eficiência funcional a longo prazo, especialmente sob regimes prolongados de alagamento. Apesar das limitações relacionadas ao número reduzido de repetições e à adoção de uma análise estatística descritiva, os resultados obtidos fornecem subsídios para a seleção de espécies vegetais em projetos de biorretenção em regiões de clima tropical, contribuindo para o aprimoramento de soluções baseadas na natureza no contexto da drenagem urbana sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de mestrado e doutorado concedidas; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica Júnior; e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) pelo apoio financeiro e institucional.
Este trabalho foi apoiado pelo CNPq por meio do projeto intitulado “Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o gerenciamento de águas pluviais urbanas” (processo 405958/2023-4).

Referências Bibliográficas

ABDULKADIR, S. T., *et al.* 2024. Analyses of Bioretention Systems for Removal of Stormwater Pollutants. **Journal of Ecological Engineering**, v. 25, n. 8, p. 276–285, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.12911/22998993/189232.

AGUIRRE-ÁLVAREZ, E., L. *et al.* Evaluación de Una Paleta Vegetal Apta Para El Tratamiento de Aguas Grises Ligeras en Soluciones Basadas en La Naturaleza. **Ingeniería Del Agua** v. 27, n. 3, p. 183–196, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.4995/ia.2023.19554.

AKTHER, M. S. **Green Roof for Urban Stormwater Management in Semi-Arid and Cold Climate**. Tese (Doutorado), Universidade de Calgary, Calgary, 2020. Disponível em: http://hdl.handle.net/1880/112595.

ASLESON, B. C. *et al.* Performance assessment of rain gardens 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 4, p. 1019-1031, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00344.x.

CHAVES, M. T. R. *et al.* Comparative Analysis of Bioretention Design Strategies for Urban Runoff Infiltration: A Critical Overview. **Ecological Engineering,** v. 207, p. 107352, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107352.

CHAVES, M. T. R. *et al*. Vegetation adaptability in a tropical urban rain garden: A study in northeast Brazil. **Urban Forestry & Urban,** v. 107, p. 128810, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128810.

CHAVES, M. T. R. *et al.* Bioretention Performance Under Tropical Conditions: Experimental Analysis of Hydrological Controls and Design Implications. **Wiley Online Library**, v. 40, n. 1, p. e70382, jan 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1002/hyp.70382.

CHEN, P.-C.; HUANG, M.-Y.; WANG, S.-Y. Selection and Evaluation of Native Plants for Rain Gardens in Tropical Regions: A Dual-Method Assessment Framework. **Plant-Environment Interactions**, [s. l.], p. 1-23, 2025.

DEEB, M. *et al.* Using constructed soils for green infrastructure – challenges and limitations. **SOIL**, [s. l.], v. 6, p. 413–434,

2020. Disponível em: https://doi.org/10.5194/soil-6-413-2020.

FERNANDES, A. L. S.; BRACHTVOGEL, E. L.; REIS, L. L. Produção de massa seca, volume radicular e eficiência nutricional de fósforo em Brachiaria brizantha cv. Marandu e Massai (Panicum maximum x P. infestum). **Revista PesquisAgro**, Confresa-MT, v. 2, n. 2, p. 38-122, jul./dez. 2019.

FRESCHET, G. T. *et al.* A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. **New Phytologist**, [s. l.], v. 232, p. 973–1122, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1111/nph.17572.

GALAGODA, R. U. *et al.* The Impact of Urban Green Infrastructure as a Sustainable Approach Towards Tropical Micro-Climatic Changes and Human Thermal Comfort. **Urban Forestry & Urban Greening** n. 34, p. 1–9, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.05.008.

JOHNSTON, M. R.; BALSTER, N. J.; THOMPSON, A. M. Vegetation Alters Soil Water Drainage and Retention of Replicate Rain Gardens. **Water**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 3151, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w12113151.

KÖPPEN, W. P., and R. Geiger. 1968. Klima Der Erde: Climate of the Earth. Perthes.

LI, J. Bio-Swale Column Experiments and Simulation of Hydrologic Impacts on Urban Road Stormwater Runoff. **Polish Journal of Environmental Studies** v. 25, n. 1, p. 173–184, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.15244/pjoes/60280.

Li, Y.; LIU, J. Green Roofs in the Humid Subtropics: The Role of Environmental and Design Factors on Stormwater Retention and Peak Reduction. **Science of the Total Environment**, n. 858, p. 159710, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159710.

LISENBEE, W. A. *et al.* 2022. Modeling Bioretention Hydrology: Quantifying the Performance of Drainmod-Urban and the SWMM Lid Module. **Journal of Hydrology** n. 612, p. 128179, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128179.

LOPES, M. D.; SILVA, G. B. L. An Efficient Simulation-Optimization Approach Based on Genetic Algorithms and Hydrologic Modeling to Assist in Identifying Optimal Low Impact Development Designs. **Landscape and Urban Planning** n. 216 p. 104251, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104251.

LORENZI, H. **Plantas para jardim no Brasil**: herbáceas, arbustivas e trepadeiras. 2. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum. 1120 p, 2015.

MACEDO, M. B. *et al.* Modular Design of Bioretention Systems for Sustainable Stormwater Management Under Drivers of Urbanization and Climate Change. **Sustainability** v. 14, n. 11, p. 6799, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su14116799.

MACEDO, M. B. *et al.* Learning From the Operation, Pathology and Maintenance of a Bioretention System to Optimize Urban Drainage Practices. **Journal of Environmental Management** n. 204, p. 454–466, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.201.08.023.

MOSLEHI, M. *et al.* Effect of salinity on the vegetative characteristics, biomass and chemical content of red mangrove seedlings in the south of Iran. **Scientia Forestalis**, [s. l.], v. 49, n. 132, p. e3748, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.16.

PIVETTA, G. G.; TASSI, R.; PICCILLI, D. G. A. Evaluating Bioretention Scale Effect on Stormwater Retention and Pollutant Removal. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, no. 6, p. 15561–15574, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-022-23237-9.

POORTER, H. *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, [s. l.], v. 193, p. 30–50, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x.

SANTOS FILHO, A. L.; SÁ, M. E. de. Doses de Bacillus subtilis na presença e ausência de molibdênio em dois cultivares de soja. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, Rio Branco, v. 10, n. 1, p. 97-111, jan./abr. 2023.

SILVA, B. R. **Telhados Verdes em Clima Tropical:** Uma Nova Técnica e Seu Potencial de Atenuação Térmica. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://coc.ufrj.br/es/lista-teses-de-doutorado/telhados-verdes-em-clima-tropical/.

VENVIK, G.; BOOGAARD, F. C. Infiltration capacity of rain gardens using full-scale test method: effect of infiltration system on groundwater levels in Bergen, **Norway. Land**, v. 9, n. 12, p. 520, 2020. https://doi.org/10.3390/land9120520.

WINSTON, R. J. *et al.* Certifying the Landscape Community in Rain Garden Installation: The North Carolina Experience. In: Low Impact Development 2010: Redefining Water in the City. 2010. p. 568-578. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.081.

YAN, C. *et al.* An In-Situ Measurement and Assessment of Evaporative Cooling Effects of Low Impact Development Facilities in A Subtropical City. **Agricultural and Forest Meteorology** n. 332, p. 109363, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109363.

YANG, J. *et al.* Removal Effect of Pollutants From Stormwater Runoff in Shallow Bioretention System With Gramineous Plants. **Water Science and Technology**, v. 89, no. 8, p. 1946–1960, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.2166/wst.2024.111.

AVALIAÇÃO DO IMPACTO HIDROLÓGICO DA URBANIZAÇÃO E ESTRATÉGIAS DE MANEJO SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS PLUVIAIS NA QUADRA ARSO 51 EM PALMAS-TO

1 Alcimar Araújo Milhomem, 2 Eduardo Pereira Valim, 3 Leonardo Nepomuceno Lima, 4 Weslley Lima Rêgo, 5 Bruno Machado Carneiro

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, e-mail: alcimar.engenharia@gmail.com; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, e-mail: edu170681@gmail.com; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, e-mail: leodno@gmail.com; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, e-mail: weslleylre@gmail.com; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, e-mail: bruno.carneiro@ifto.edu.br.

Palavras-chave: Drenagem urbana sustentável; Impacto hidrológico; Desenvolvimento de baixo impacto (LID).

Resumo

A expansão urbana promove alterações significativas no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, principalmente em função do aumento da impermeabilização do solo e da consequente intensificação do escoamento superficial. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os impactos hidrológicos associados ao processo de urbanização da Quadra ARSO 51, localizada no município de Palmas, Tocantins, por meio da comparação entre cenários de condição natural, urbanização convencional e urbanização com aplicação de técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID). A metodologia baseou-se em análise geoespacial realizada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), com o auxílio do software QGIS, a partir de dados cartográficos oficiais e imagens de satélite. A estimativa das vazões de pico foi realizada por meio do Método Racional, considerando parâmetros hidrológicos obtidos a partir da caracterização geomorfológica da bacia e da equação Intensidade–Duração–Frequência (IDF) para o município de Palmas, adotando-se tempo de retorno de 15 anos. Os resultados indicaram que o cenário de urbanização convencional promove aumento expressivo da vazão de pico, com incremento superior a quatro vezes e meia em relação à condição natural da bacia. Por outro lado, o cenário com adoção de técnicas de drenagem sustentável apresentou aumento significativamente inferior, evidenciando a eficiência dessas estratégias na mitigação dos impactos hidrológicos da urbanização. Os resultados reforçam a importância da incorporação de soluções baseadas em drenagem sustentável no planejamento urbano, contribuindo para a redução de riscos de alagamentos e para a promoção de um modelo de gestão de águas pluviais mais resiliente e ambientalmente sustentável.

Introdução

A expansão urbana promove alterações significativas no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, sobretudo em razão da substituição de superfícies naturais por áreas predominantemente impermeáveis. A pavimentação de vias, a construção de edificações e a compactação do solo reduzem a capacidade de infiltração das águas pluviais, resultando no aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial, e como consequência, maior suscetibilidade à ocorrência de alagamentos e ao desenvolvimento de processos erosivos (Berland et al., 2021; Fletcher et al., 2022).

Os sistemas tradicionais de drenagem urbana contemplam, predominantemente, soluções hidráulicas voltadas para a rápida condução das águas pluviais por meio de galerias, canais e condutos subterrâneos. Embora esse modelo tenha sido amplamente adotado ao longo do desenvolvimento das cidades, sua eficiência tem se mostrado cada vez mais limitada diante do aumento da impermeabilização do solo e da ocorrência mais frequente de eventos pluviométricos extremos. Nesse contexto, a literatura recente tem enfatizado a necessidade de transição para abordagens mais sustentáveis e integradas de gestão de águas pluviais, capazes de aproximar os comportamentos hidrológicos das bacias urbanas às condições naturais (Liu et al., 2023; Eckart, McPhee e Bolisetti, 2020).

Uma das estratégias amplamente difundidas e discutidas na atualidade é o conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID), que propõe minimizar os impactos hidrológicos decorrentes da urbanização por meio do controle do escoamento na fonte. Essas técnicas visam promover a infiltração, o armazenamento temporário e o retardamento do escoamento superficial, com o intuito de aproximar, tanto quanto possível, as condições hidrológicas às existentes no período pré-desenvolvimento urbano. Soluções como pavimentos permeáveis, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e bacias de detenção contribuem para a redução das vazões de pico e para o aumento da capacidade de retenção hídrica em ambientes urbanos (Ahiablame, Engel e Chaubey, 2012; Li et al., 2021; Santos et al., 2022).

No Brasil, a importância da gestão adequada das águas pluviais urbanas também tem sido reforçada por avanços institucionais e normativos voltados à sustentabilidade urbana e à melhoria dos serviços de saneamento. Nesse cenário, a análise prévia dos impactos hidrológicos associados ao processo de urbanização torna-se fundamental para subsidiar o planejamento urbano e o dimensionamento adequado das infraestruturas de drenagem.

A área correspondente à Quadra ARSO 51, localizada no município de Palmas, estado do Tocantins, constitui um caso representativo de transição futura entre cobertura vegetal nativa e ocupação urbana planejada. Atualmente, a área apresenta um fragmento de vegetação densa inserido em um contexto predominantemente antropizado. De acordo com o Plano Diretor

municipal, a ocupação prevista para essa área contempla uso misto, com predominância de atividades residenciais e comerciais. Assim, o processo de urbanização implicará alterações no escoamento das águas pluviais da região, podendo influenciar a dinâmica hidrológica e as condições de drenagem das áreas situadas a jusante.

Além disso, observa-se nas proximidades da área de estudo a ocorrência de ponto recorrente de acúmulo de água durante eventos de precipitação intensa, indicando limitações na capacidade de drenagem local mesmo antes da efetiva urbanização da quadra. Esse cenário evidencia a necessidade de planejamento adequado da infraestrutura de drenagem, de modo a evitar a intensificação desses problemas com o processo de impermeabilização associado à expansão urbana.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar os impactos hidrológicos associados ao processo de urbanização da Quadra ARSO 51, por meio da análise comparativa entre cenários de condição natural e urbanizada, bem como propor estratégias de manejo sustentável de águas pluviais baseadas em técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID). A análise busca demonstrar a viabilidade de soluções compensatórias capazes de reduzir os picos de vazão e contribuir para um modelo de drenagem urbana mais resiliente e ambientalmente sustentável, minimizando a sobrecarga do sistema de drenagem existente.

Materiais e Métodos

A presente pesquisa foi desenvolvida com abordagem quantitativa aplicada à hidrologia urbana, com o objetivo de avaliar as alterações no comportamento do escoamento superficial decorrentes do processo de urbanização da área correspondente à Quadra ARSO 51, localizada no município de Palmas, Tocantins. O estudo baseou-se na comparação entre três cenários distintos: (i) condição de pré-desenvolvimento, representada pela cobertura natural; (ii) cenário de urbanização convencional; e (iii) cenário com adoção de técnicas de drenagem sustentável baseadas no conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID)

A caracterização da área de estudo foi realizada por meio de visitas técnicas e análise geoespacial, com utilização de dados cartográficos disponibilizados pelo Governo do Estado do Tocantins, por intermédio do Geoportal da Secretaria do Planejamento e Orçamento. Também foram empregadas imagens de satélite obtidas na plataforma Google Earth e mapas de microparcelamento urbano, juntamente com os projetos *as built* da infraestrutura de drenagem urbana, disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Palmas (TO). Com base nesses dados, foram elaborados, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), mapas de hipsometria, declividade e direção preferencial de escoamento superficial.

Para a avaliação hidrológica, consideraram-se os três cenários de uso e ocupação do solo previamente definidos: (i) condição natural ou pré-desenvolvimento, (ii) urbanização convencional e (iii) urbanização com aplicação de técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development – LID*).

A estimativa da vazão de pico para cada cenário foi realizada por meio do Método Racional, amplamente utilizado em estudos de microdrenagem urbana para pequenas bacias, conforme apresentado na Equação (1):

$$Q = \frac{C \,.\, i \,.\, A}{360} \qquad (1)$$

Onde Q corresponde à vazão máxima de escoamento superficial em m³/h; C é o coeficiente de escoamento superficial (*runoff),* adimensional, i representa a intensidade da precipitação em mm/h, e A corresponde à área da bacia de contribuição em hectares.

Para a determinação da intensidade de precipitação, estimou-se inicialmente o tempo de concentração equivalente da bacia, considerando-se suas características geomorfológicas e a extensão territorial da área de estudo. Para essa finalidade, utilizou-se a Equação de Kirpich, expressa na Equação (2), que relaciona o tempo de concentração ao comprimento do talvegue principal e à diferença de nível da bacia permitindo uma avaliação mais precisa do comportamento hidrológico frente a eventos pluviais intensos.

$$tc = 57\left(\frac{L^3}{\mathrm{H}}\right)^{0{,}385} \qquad (2)$$

Onde tc é o tempo de concentração, em minutos, L é o comprimento do curso d'água principal da bacia em quilômetros; e H é a diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de saída, considerada em metros.

A intensidade pluviométrica correspondente foi obtida por meio da equação Intensidade–Duração–Frequência (IDF), apresentada na Equação (3), a qual permite estimar a intensidade de precipitação associada ao tempo de recorrência adotado para a bacia em estudo, garantindo a adequada caracterização do potencial de escoamento e risco hidrológico.

$$i = \frac{K.T^a}{(t+b)^c} \qquad (3)$$

em que i é intensidade máxima média de precipitação, em mm/h, para uma duração igual ao tempo de concentração; T é o período de retorno, em anos; t é a duração da precipitação (concentração) em minutos, e K, a, b *e* c são parâmetros de ajuste definidos para a estação pluviográfica de referência.

A comparação entre os cenários analisados permitiu avaliar o incremento potencial das vazões de pico decorrente do processo de urbanização, bem como a eficiência das técnicas compensatórias na redução do escoamento superficial. A análise dos resultados foi conduzida com base na comparação das vazões estimadas para cada cenário e na interpretação do comportamento hidrológico da bacia sob distintas condições de uso e ocupação do solo. Esse procedimento permitiu inferir os efeitos da urbanização sobre a dinâmica hidrológica local e os benefícios associados à adoção de estratégias de drenagem urbana sustentável.

Complementarmente, para a verificação da capacidade de suporte da drenagem existente, realizou-se a análise do cadastro técnico "*as built*" da rede de drenagem situada a jusante da área de estudo. Essa etapa teve como finalidade avaliar se a infraestrutura implantada apresenta a capacidade hidráulica compatível com o incremento de vazão previsto no cenário de urbanização convencional, considerando o aumento das superfícies impermeáveis e a consequente intensificação do escoamento superficial. O procedimento contemplou a conferência das dimensões dos dispositivos, das declividades, dos materiais e das conexões da rede, possibilitando a identificação de eventuais gargalos, trechos subdimensionados e pontos críticos com potencial de comprometer o desempenho do sistema de drenagem urbana.

Resultados e Discussão

A área de estudo foi delimitada por análise geoespacial em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS. Com base na manipulação dos dados cartográficos, estimou-se uma área de aproximadamente 56,63 hectares, considerando o polígono definido pelos centros das quatro rotatórias localizadas no vértice da quadra.

Os resultados indicam que a área, em sua condição atual, constitui um remanescente de vegetação nativa do bioma Cerrado, cujas características favorecem a interceptação da precipitação, a infiltração da água no solo e os processos de evapotranspiração. Essas condições contribuem para a regulação do escoamento superficial e para a manutenção de uma resposta hidrológica mais próxima à condição natural.

Além disso, verifica-se que esse fragmento vegetado se encontra inserido em uma área urbana já consolidada, configurando um vazio urbano cercado por ocupação antrópica. Sob a perspectiva da drenagem urbana, essa configuração é particularmente relevante, pois evidencia o papel da cobertura natural como elemento de amortecimento hidrológico em meio ao tecido urbano impermeabilizado. Assim, a preservação ou a substituição dessa cobertura por usos urbanos tende a produzir alterações expressivas na dinâmica do escoamento superficial, aspecto central para a interpretação dos cenários analisados. A Figura 1 ilustra a delimitação e a inserção espacial da área de estudo.



Figura 01: Caracterização (Cenário Atual) e Localização da área de estudo.
Fonte: Adaptado de Prefeitura de Palmas e Google Earth.

Os primeiros resultados, obtidos a partir da geração do mapa hipsométrico, possibilitaram identificar a direção preferencial do escoamento superficial na área de estudo. Verificou-se que o exutório natural da bacia delimitada é hidraulicamente independente do ponto de alagamento identificado em vistoria de campo. Esse resultado sugere que o ponto crítico não está diretamente associado às contribuições hidrológicas da área analisada (Figura 2). Tal evidência reforça a importância da análise morfométrica e topográfica como subsídio à interpretação da dinâmica de drenagem, sobretudo em áreas urbanas onde a ocorrência de alagamentos pode resultar de múltiplos condicionantes locais.

Sob essa perspectiva, infere-se que o ponto de alagamento observado esteja mais relacionado a deficiências localizadas no sistema de microdrenagem, restrições hidráulicas da rede instalada ou contribuições provenientes de áreas vizinhas, do que propriamente ao comportamento hidrológico da bacia em estudo. Esse resultado contribui para refinar a compreensão da problemática analisada, ao dissociar a origem do alagamento da área atualmente ocupada por vegetação nativa.

Por outro lado, a estimativa do cenário de urbanização convencional foi condicionada por limitações de disponibilidade de dados. Em razão da ausência do projeto urbanístico completo oficialmente aprovado junto à Prefeitura, estando disponíveis apenas o arruamento e o microparcelamento, sem a correspondente definição do uso e ocupação do solo, não foi possível determinar de maneira precisa o coeficiente de escoamento ponderado para esse cenário (Figura 2)

Essa limitação metodológica reduz a precisão da modelagem hidrológica, uma vez que impede a adequada discriminação das superfícies impermeáveis e permeáveis previstas, comprometendo a parametrização mais fiel das condições futuras de ocupação. Desse modo, os resultados associados ao cenário convencional devem ser interpretados com cautela, considerando-se a presença de incertezas inerentes à adoção de parâmetros estimados ou generalizados. Ainda assim, a abordagem adotada permanece relevante para a análise prospectiva do comportamento hidrológico da área, especialmente por evidenciar a tendência de intensificação do escoamento superficial e contextos de urbanização sem médias compensatórias.



Figura 02: Mapas de hipsometria e implantação (não oficial) da área em estudo.
Fonte: Adaptado de Prefeitura de Palmas e GeoPortal do Governo do Tocantins.

Para a estimativa dos coeficientes de escoamento superficial adotados nos cenários analisados, foram considerados valores médios reportados na literatura para diferentes condições de uso e ocupação do solo em estudos de drenagem urbana, conforme apresentado na Tabela 01. No cenário com adoção de técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development – LID*), foi considerada uma redução aproximada de 70% em relação ao coeficiente de escoamento adotado para o cenário de urbanização convencional, resultando em valor estimado de 0,25. Essa redução busca representar o efeito hidrológico da incorporação de dispositivos de drenagem sustentável, tais como pavimentos permeáveis, jardins de chuva e áreas de infiltração, capazes de promover infiltração, retenção temporária e retardamento do escoamento superficial.

Cenário	Caracterização	Coeficiente de Runoff (C)	Coeficiente Adotado (C)
Pré-desenvolvimento	Áreas florestadas / vegetação densa	0,05 – 0,25	0,15
Urbanização convencional	Áreas comerciais / residenciais densas	0,70 – 0,95	0,85
Drenagem sustentável (LID)	Áreas otimizada LID	-	0,25

Tabela 01: Valores típicos e adotados para o coeficiente de escoamento superficial.
Fonte: Adaptado de Chow et al. (1988) e Tucci (2015).

Para a determinação da intensidade da precipitação, foi adotado tempo de retorno de 15 anos, conforme recomendado no *Relatório Final do Plano Municipal de Drenagem Urbana de Palmas/TO* (2023). O tempo de concentração da bacia foi calculado por meio da Equação (02), utilizando os parâmetros geomorfológicos apresentados na Tabela 2, obtidos a partir de análise geoespacial em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), resultando em 25,77 minutos.

Comp. (L)	Cota Terreno Montante (m)	Cota Terreno Jusante (m)	Desnível (m)	Área (A)
1,065 km	246,00	236,50	9,50	56,63 ha

Tabela 02: Dados geométricos da bacia (ARSO 51).
Fonte: Autores (2026).

Em seguida, a intensidade pluviométrica correspondente foi obtida por meio da Equação (3), resultando em 130,62 mm/h para o tempo de recorrência adotado. Para o ajuste dos valores, foram considerados os fatores determinados pelo Software Plúvio 2.1, com os seguintes parâmetros para o município de Palmas-TO: K = 5958,922; a = 0,173; b = 35,301; c = 1,043.

Os resultados da modelagem hidrológica indicam aumento significativo da vazão de pico no cenário de urbanização convencional quando comparado à condição natural da bacia. A estimativa obtida por meio do Método Racional demonstrou um incremento superior a quatro vezes e meia na vazão máxima de escoamento superficial. Por outro lado, no cenário que considera a adoção de soluções de drenagem sustentável, o aumento observado foi equivalente a pouco mais de meia vez em relação à condição natural. Os valores calculados para cada cenário encontram-se apresentados na Tabela 03.

Cenário	Coeficiente de Runoff (C)	Vazão (m³/s)	Incremento (m³/s)	Incremento percentual
Pré-desenvolvimento (vegetação nativa)	0,15	3,08	-	-
Urbanização convencional	0,85	17,47	14,39	467,21%
Drenagem sustentável (LID)	0,25	5,14	2,06	66,88%

Tabela 03 – Comportamentos hidrológicos nos diferentes cenários de uso do solo.
Fonte: Autores (2026).

Considerando que a intensidade da precipitação (130,62 mm/h) e área da bacia (0,5663 km²) foram mantidas constantes nos três cenários analisados, a variação observada nas vazões de pico estimadas evidencia exclusivamente a influência das alterações no coeficiente de escoamento superficial sobre os resultados. Assim, as diferenças entre os valores obtidos expressam, de forma objetiva, os efeitos das alterações no grau de impermeabilização e nas condições de ocupação do solo atribuídas a cada cenário.

Os resultados da simulação hidrológica demonstram que, no cenário de pré-desenvolvimento, marcado pela predominância de vegetação nativa do Cerrado, a maior capacidade de infiltração do solo, aliada à interceptação pela cobertura vegetal e aos processos de evapotranspiração, favorece a atenuação do escoamento superficial. Em consequência, verificam-se hidrogramas com menores picos de vazão e resposta hidrológica mais distribuída no tempo, característica típica de bacias com reduzida interferência antrópica, nas quais os mecanismos naturais de infiltração, retenção e armazenamento desempenham papel central na modulação das vazões (Fletcher et al., 2022).

No cenário de urbanização convencional, verificou-se alteração substancial na resposta hidrológica em decorrência da predominância de superfícies impermeáveis, tais como pavimentos asfálticos, coberturas e áreas edificadas. A aplicação do Método Racional evidenciou aumento expressivo da vazão de pico em relação ao cenário de pré-desenvolvimento, resultado associado à redução da infiltração e à aceleração do escoamento superficial. Sob essa condição, observa-se maior potencial de sobrecarga dos sistemas de micro e macrodrenagem, com consequente ampliação do risco de alagamentos e de processos erosivos a jusante, particularmente em setores críticos da malha urbana.

Tal comportamento corrobora achados recentes da literatura em hidrologia urbana, segundo os quais a

impermeabilização do solo constitui um dos principais condicionantes do aumento das vazões de pico e da redução do tempo de resposta hidrológica em bacias urbanizadas (Berland et al., 2021). Ademais, a maior conectividade hidraúlica entre superfícies impermeáveis favorece a transferência rápida das águas pluviais para a rede de drenagem, intensificando a solicitação hidraúlica sobre a infraestrutura instalada.

Nesse contexto, a literatura tem demonstrado que práticas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID) são eficazes na redução do escoamento superficial e na melhoria do desempenho hidrológico de bacias urbanas (Ahiablame, Engel e Chaubey, 2012). No presente estudo, a simulação do cenário com aplicação dessas técnicas indicou redução expressiva das vazões de pico em relação ao cenário de urbanização convencional. A incorporação de dispositivos de controle da fonte, como pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração e bacias de detenção, favoreceu a atenuação do escoamento superficial e aproximou a resposta hidrológica do cenário urbanizado das condições verificadas no estado natural da bacia.

Esses resultados corroboram evidências reportadas na literatura internacional, segundo as quais infraestruturas verdes e sistemas de drenagem sustentável podem reduzir significativamente os volumes escoados e retardar a resposta hidrológica em bacias urbanas (Li et al., 2021; Liu et al., 2023). Além do controle das vazões de pico, tais estratégias podem gerar benefícios adicionais, incluindo o aumento da recarga de aquíferos, a melhoria da qualidade da água pluvial e a diminuição da carga hidráulica sobre redes de drenagem convencionais.

Para a Quadra ARSO 51, os resultados obtidos indicam que a incorporação de soluções baseadas em drenagem sustentável tem potencial para reduzir substancialmente os impactos hidrológicos associados ao processo de urbanização previsto. Entretanto, a análise dos dados digitais do cadastro *as built* fornecidos pela Prefeitura revelou limitação técnica decorrente da inexistência de cadastro completo e atualizado da infraestrutura de drenagem receptora a jusante da área de estudo. Em razão dessa incerteza, e da impossibilidade de verificar a capacidade hidráulica real das galerias existentes, adotou-se o princípio da precaução, assumindo-se que o sistema atual não comporta acréscimos de vazão. Tal condição reforça a necessidade de incorporar soluções de drenagem sustentável desde as fases iniciais do planejamento urbano.

Considerações Finais

Os resultados obtidos evidenciam que o a urbanização prevista para a área correspondente à Quadra ARSO 51 tende a promover alterações significativas no comportamento hidrológico local, sobretudo em decorrência do aumento da impermeabilização do solo. A simulação do cenário de urbanização convencional indicou elevação expressiva das vazões de pico em relação à condição do cenário de pré-desenvolvimento, demonstrando o potencial de intensificação do escoamento superficial e de sobrecarga sobre o sistema de drenagem urbana existente.

Por sua vez, a simulação do cenário com adoção de técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID) demonstrou capacidade relevante de mitigação desses impactos. A incorporação de dispositivos como pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração e bacias de detenção favoreceu a retenção a infiltração e o amortecimento de águas pluviais, resultando na redução das vazões de pico e na aproximação da resposta hidrológica do cenário urbanizado às condições naturais da bacia.

Nesse sentido, os achados do estudo indicam que a inserção de soluções de drenagem sustentável no planejamento urbano da área analisada constitui alternativa tecnicamente adequada para minimizar os efeitos hidrológicos adversos associados à expansão urbana. Além de contribuir para redução da carga hidráulica sobre os sistemas convencionais de drenagem, tais estratégias podem ampliar a resiliência urbana frente a eventos pluviais intensos e favorecer modelos de ocupação mais compatíveis com os princípios da sustentabilidade hídrica.

Cabe ressaltar, contudo, que a análise apresentou limitações relacionadas à indisponibilidade do projeto urbanístico completo e à ausência de cadastro técnico atualizado da infraestrutura de drenagem receptora a jusante da área de estudo. Tais restrições introduzem incertezas quanto à parametrização do cenário convencional e à verificação da real capacidade hidráulica do sistema existente. Ainda assim, os resultados obtidos favorecem subsídios relevantes para o planejamento urbano e para a gestão preventiva da drenagem pluvial, especialmente ao evidenciar a importância da incorporação de medidas compensatórias desde as etapas iniciais de ocupação da área.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Campus Palmas, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental pelo suporte acadêmico ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem também à Prefeitura Municipal de Palmas e ao Governo do Estado do Tocantins, por meio do GeoPortal da Secretaria do Planejamento e Orçamento, pela disponibilização de dados cartográficos digitais e informações técnicas utilizadas na análise da área de estudo.

Referências Bibliográficas

AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. Water, Air, & Soil Pollution, v. 223, n. 7, p. 4253–4273, 2012. https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2

BERLAND, A. et al. The role of green infrastructure in urban stormwater management. Landscape and Urban Planning, v. 206, 103974, 2021. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103974

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988.

ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISETTI, T. Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls. Journal of Hydrology, v. 588, 125043, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125043

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Journal of Hydrology, v. 610, 127965, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127965

LI, C. et al. Hydrologic performance of low impact development practices in urban catchments. Water, v. 13, n. 3, 347, 2021. https://doi.org/10.3390/w13030347

LIU, Y. et al. Assessing the effectiveness of green infrastructure for urban stormwater management: a review. Science of the Total Environment, v. 858, 159816, 2023. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159816

PALMAS. Plano Municipal de Drenagem Urbana de Palmas – Relatório Final. Palmas: Prefeitura Municipal de Palmas, 2023.

SANTOS, M. et al. Sustainable urban drainage systems applied to tropical cities. Sustainability, v. 14, n. 9, 5634, 2022. https://doi.org/10.3390/su14095634

TOCANTINS (Estado). Secretaria do Planejamento e Orçamento. GeoPortal do Tocantins: plataforma de dados geoespaciais. Palmas: Governo do Estado do Tocantins, [s.d.]. Disponível em: https://geoportal.to.gov.br/gvsigonline/. Acesso em: 09 mar. 2026.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2015.

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA IOT COM SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DE UMIDADE DO SOLO EM JARDIM DE CHUVA

1 Ivo Samuel Rodrigues Pereira, 2 Pedro Levi Sousa dos Santos, 3 Maria Thereza Rocha Chaves, 4 Teresa Raquel Lima Farias

1 e 3 Universidade Federal do Ceará, e-mails:ivosamuelsr@gmail.com; mtchaves50@gmail.com; 2 e 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará , e-mails:plevisousa@gmail.com; teresafarias@ifce.edu.br

Palavras-chave: Sensoriamento; Teor de Umidade; Biorretenção

Resumo

O crescimento urbano, em diversos casos, não apresenta um planejamento eficiente para evitar impactos ambientais como a impermeabilização do solo. O jardim de chuva se mostra eficaz no combate a essa problemática, tendo sua efetividade relacionada ao teor de umidade e à velocidade de infiltração do solo. O monitoramento desta eficiência é uma das dificuldades. O estudo tem como objetivo desenvolver e calibrar um sistema IoT, utilizando sensores de baixo custo, para monitoramento de teores de umidade do solo. O sistema foi implementado em um jardim de chuva, localizado no *campus* Fortaleza do IFCE. O sistema teve como placa de desenvolvimento o ESP32-WROOM-32 (DevKit de 30 pinos) e sondas HD-38. Para o envio de dados, a interface Wi-Fi do próprio ESP é utilizada para direcionar as leituras a um script desenvolvido em Google Apps Script. A calibração dos sensores se deu pela relação matemática entre os sinais analógicos brutos (ADC) e os valores percentuais de umidade. Os dados coletados em campo mostraram que a eficiência do monitoramento depende das condições de instalação e do isolamento dos componentes. Alguns sensores apresentaram melhor eficácia, com coeficientes de determinação (R^2) elevados e semelhantes. Após eventos de precipitação, à medida que o solo apresenta redução do teor de umidade , os valores de umidade tendem a convergir entre os sensores analisados, esse comportamento indica consistência nas leituras e sugere uma calibração semelhante entre as sondas de umidade. Outros se mostraram menos confiáveis em suas respectivas determinações. Em síntese, os dados obtidos pelo sistema desenvolvido, contribuem para avaliação da capacidade de infiltração do jardim de chuva para a análise da dinâmica da umidade do solo sob diferentes condições de precipitação e para a calibração de modelos hidrológicos. Além disso, as medições auxiliam na verificação da adaptação das espécies vegetais e permitem comparações quantitativas entre a retenção hídrica em jardins de chuva e em áreas de jardinagem convencional. Assim, os resultados indicam que sistemas baseados em sensores de baixo custo constituem ferramentas viáveis para o monitoramento e o manejo de águas pluviais em ambientes urbanos.

Introdução

O processo de urbanização, por muitas vezes, carece de um planejamento eficiente, trazendo consigo impactos ambientais, um destes é a impermeabilização do solo, que acarreta em aumento na vazão de escoamento intensificando as inundações (Nascimento *et al*., 2018). Tendo em vista esta problemática, diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para mitigar esses cenários. As Soluções Baseadas na Natureza (SBN) são ferramentas para este fim, uma dessas soluções é o Jardim de Chuva, também chamado de sistema de biorretenção, que se mostra eficaz na mitigação de inundações em meios urbanos (Greksa *et al*., 2022).

Além da funcionalidade do sistema, a instalação de vegetação melhora a eficácia e estética do jardim de chuva. A seleção de plantas deve ser feita de forma adequada, considerando sua morfologia e as condições ambientais da região. A distribuição das plantas dentro da área também influencia o equilíbrio entre a funcionalidade do jardim e a saúde das plantas (Greksa et al., 2023). A estratégia da vegetação para se adaptar ao meio influencia a condutividade hidráulica de jardins de chuva, tendendo a aumentar com plantas hidrófilas (Krauss e Rippy, 2024).

A capacidade de infiltração do solo é uma propriedade que representa a intensidade máxima que o solo pode absorver a água da chuva ou de uma irrigação aplicada a determinada taxa (Sales *et al*., 2005). Esse processo não se mantém constante ao longo do tempo. Durante um evento de chuva ou irrigação, a taxa de infiltração da água é máxima no início e diminui conforme as condições do solo se alteram. Quando o solo é submetido a um evento contínuo, a velocidade de infiltração atinge seu valor mínimo após um período de tempo. Esse valor constante é denominado velocidade de infiltração básica (Bernardo, 1989).

O teor de umidade do solo se relaciona com a velocidade de infiltração básica, pois quanto menor a infiltração, maior a retenção de água no solo. Greksa *et al*. (2023), analisaram os níveis de umidade do solo em jardins de chuva e verificaram que esses sistemas retêm umidade por longos períodos. O monitoramento constante dessa umidade, no entanto, é uma das dificuldades para analisar o desempenho de jardins de chuva. O teor de umidade afeta diretamente a adaptabilidade das plantas, o armazenamento de água e o desempenho da estrutura de biorretenção. Diante disso, o artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e a calibração de um sistema IoT, utilizando sensores de baixo custo, para o monitoramento de teores de umidade do solo em um jardim de chuva. O monitoramento sistemático desse parâmetro, pode facilitar futuras pesquisas, como a comparação da retenção de água de jardins tradicionais e jardints de chuva.

Material e Métodos

Área de estudo

O jardim de chuva está localizado no *campus* Fortaleza do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). O sistema de biorretenção tem como estrutura uma área de 4,24 m², composta por cinco camadas distribuídas verticalmente, tendo como ordem da mais superficial a mais profunda: uma camada superior de charco de 45 cm, que tem como função permitir a formação de lâminas d'água; 45 cm de solo nativo para o desenvolvimento de vegetação; manta geotêxtil Bidim RT 10 da Bidim Wavin para o impedimento da transferência de materiais oriundos das camadas acima para a camada reservatória de brita; 43 cm de brita que tem como objetivo armazenar a água infiltrada e por fim, uma camada de 15 cm de areia para filtrar e transicionar a água do jardim com o subsolo natural, como exemplifica a Figura 01. Ademais, a cidade apresenta um clima tropical com inverno seco (Aw) na escala Köppen Geiger (Muniz *et al*., 2017), com precipitação média anual de 1430 mm de chuva, registrados entre os anos de 1922 e 2022 (Chaves 2024).

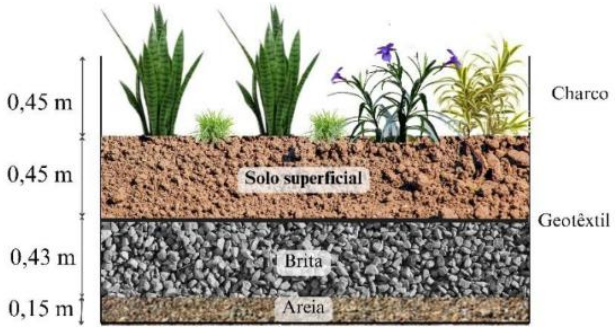


Figura 01: Esquema do jardim de chuva.
Fonte: Chaves (2024)

Segundo Chaves (2024) o solo nativo utilizado na camada superior do jardim apresenta composição arenosa, sendo 82% da composição total. Suas frações se dividem em: 11% de areia fina (0,06 a 0,2 mm), 55% de areia média (0,2 a 0,6 mm) e 16% de areia grossa (0,6 a 2,0 mm), e 6% de pedregulho (2,0 a 6,0 mm) de acordo com a escala da ABNT (2022). Também observou que o solo se classifica como areia franca de acordo com o diagrama triangular das classes texturais do USDA (*United States Department of Agriculture*). Além de apresentar uma porosidade de 31%, condutividade hidráulica saturada de 197 mm/h, velocidade de infiltração básica de 172,3 mm/h. Os dados pluviométricos foram coletados a partir de uma estação meteorológica instalada no terraço de um dos blocos do *campus*, localizada a 65 m do jardim.

Instrumentação

A instrumentação do sistema utiliza cinco sensores de umidade do solo (modelo HD-38), distribuídos em configuração em quincônio no jardim de chuva. A escolha do sensor HD-38, (Figura 05A), fundamentou-se em sua superioridade técnica em relação aos modelos resistivos convencionais. Conforme demonstrado por Canja (2025), este modelo apresenta maior estabilidade de leitura e uma resposta linear mais precisa ($R^2 = 0,98$), sendo menos suscetível à corrosão galvânica e a oscilações bruscas em solos com alta saturação hídrica.

A conexão entre os sensores e a placa de desenvolvimento ESP32-WROOM-32 (DevKit de 30 pinos), opção por seu baixo custo e conectividade Wi-Fi, foi realizada por meio de cabos PP de três vias, garantindo a integridade do sinal. Os sensores operam com alimentação entre 3,3 V e 5 V e geram um sinal analógico proporcional à umidade, lido pelo conversor analógico-digital (ADC) interno do microcontrolador. O ESP32 utiliza tensão lógica de 3,3 V e foi programado para realizar amostragens em intervalos fixos de 5 minutos.

Para o envio dos dados, utiliza-se a interface Wi-Fi nativa do ESP32 e o protocolo HTTPS. As informações são direcionadas a um script desenvolvido em Google Apps Script, que atua como interface para calibração, conversão e organização dos registros, incluindo a marcação temporal (timestamp). Por fim, os dados processados são salvos em uma planilha do Google Sheets para análise posterior. O fluxo, desde a captura do sinal analógico até o armazenamento em nuvem, está detalhado na Figura 2.

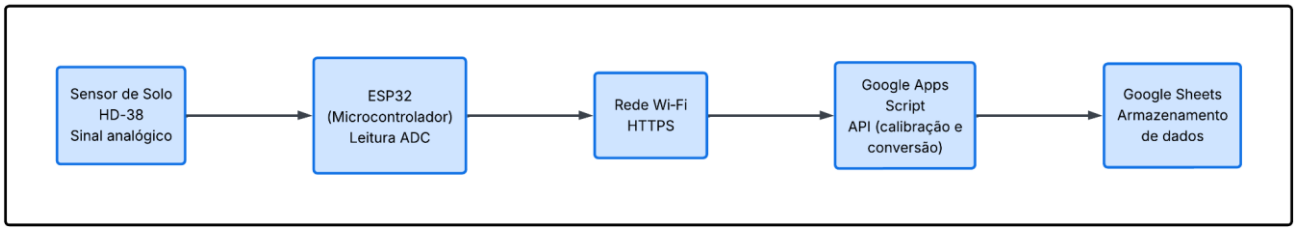


Figura 02: Fluxograma metodológico da aquisição e transmissão de dados.
Fonte: Autores (2026)

Essa estrutura de comunicação caracteriza o sistema como um nó funcional dentro de um ecossistema de Internet das Coisas (IoT), definido como um conjunto integrado de sensores, conectividade e plataformas de processamento que trabalham de forma coordenada para capturar e transmitir informações do mundo físico para o ambiente digital. Ao integrar o hardware de baixo custo à computação em nuvem, o jardim de chuva torna-se um objeto inteligente focado na geração de séries temporais para monitoramento remoto. Segundo Canja (2025), dispositivos dessa natureza funcionam como medidores assistidos por microcontroladores, projetados para coletar dados relevantes ao longo do tempo. Essa abordagem permite que as variáveis de campo se tornem acessíveis de forma contínua, facilitando o entendimento da dinâmica hídrica sem a necessidade de intervenções manuais constantes.

Desenvolvimento de código e circuito

A adoção do microcontrolador da linha ESP32 justifica-se não apenas pelo seu baixo custo, mas pela sua comprovada eficiência no processamento de dados e gestão de recursos em ambientes de Internet das Coisas (IoT). Conforme aponta Lima (2025), a arquitetura SoC (System on a Chip) do ESP32 demonstra um desempenho superior em termos de eficiência energética e pegada de memória, sendo capaz de processar algoritmos complexos e transmissões de dados seguras sem comprometer a autonomia do dispositivo. Além disso, sua arquitetura de dois núcleos permite a execução de tarefas em paralelo, funcionalidade explorada neste projeto por meio da biblioteca nativa FreeRTOS, que possibilitou a segmentação entre a coleta dos sensores e a comunicação com a rede.

O circuito elétrico, apresentado na Figura 3, detalha as interconexões entre o SoC ESP32, os cinco sensores e os LEDs de sinalização. Os sensores HD-38 têm seus pinos de alimentação (VCC e GND) derivados diretamente do barramento da placa de desenvolvimento, enquanto suas saídas analógicas estão mapeadas nos pinos GPIO 32, 33, 34, 35 e 36 (VP/VN) do ESP32. Para a interface visual do estado do sistema, utilizou-se um LED vermelho conectado ao barramento de energia (VCC) através de um resistor de 220Ω, indicando o estado de alimentação do hardware. De forma complementar, um LED verde foi conectado ao pino IO26, também utilizando um resistor de 220Ω, sendo este controlado via software para sinalizar o status da comunicação HTTPS com o Google Apps Script. Essa configuração permite o monitoramento em tempo real tanto da integridade física quanto da estabilidade da camada de aplicação do sistema.

A montagem do protótipo (Figura 04) priorizou a robustez para operação em ambiente de jardim de chuva, utilizando uma caixa de passagem em PVC para o encapsulamento do SoC ESP32. À esquerda do invólucro, prensa-cabos de borracha garantem a vedação das saídas dos cabos PP (Figura 04A), protegendo os componentes contra intempéries e assegurando a integridade dos sinais analógicos. No detalhe da Figura 04B, observa-se a organização interna: barramentos de alimentação de 3,3V (condutores azuis) e GND (condutores pretos), além de cinco bornes conectados a fios verdes que recebem os sinais dos sensores HD-38.

O ESP32 está posicionado à direita dos bornes, acima de uma placa de alimentação para protoboard utilizada provisoriamente para o fornecimento de energia ao circuito. Externamente, à direita da caixa, encontram-se os LEDs de status (verde e vermelho), uma interface USB para comunicação serial e um prensa-cabo adicional para a entrada da fonte de alimentação externa. Essa disposição modular facilita tanto a manutenção em campo quanto a validação visual imediata do status de operação do sistema.

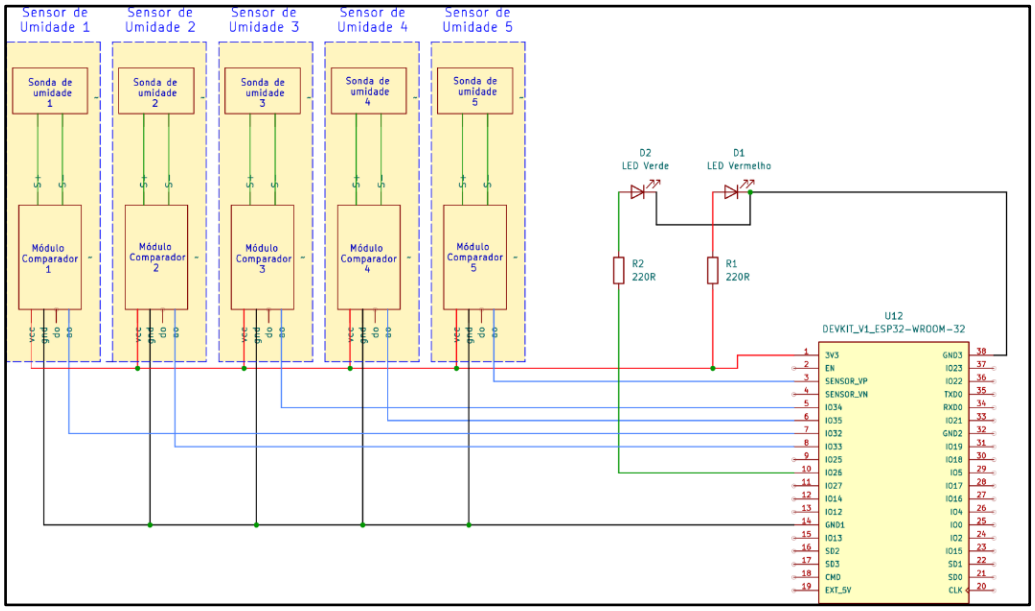


Figura 03: Diagrama de interconexões do hardware e interface de sinalização visual.
Fonte: Autores (2026)

Um desafio crítico na montagem do protótipo foi a proteção do módulo comparador do sensor HD-38, posicionado a aproximadamente um metro da sonda, contra a umidade do solo no jardim de chuva. Foram testados dois métodos de isolamento: encapsulamento com resina epóxi e o uso de tubos termoretráteis. Embora a resina ofereça uma vedação hermética superior, ela inviabiliza manutenções corretivas, fator que se mostrou determinante visto que alguns sensores apresentaram falhas físicas. Em contrapartida, o uso de tubos termoretráteis demonstrou maior eficiência operacional; apesar de exigir a substituição do invólucro após cada intervenção, este método permitiu o acesso aos componentes eletrônicos sem danos ao módulo, garantindo a sustentabilidade e a continuidade do monitoramento em campo.

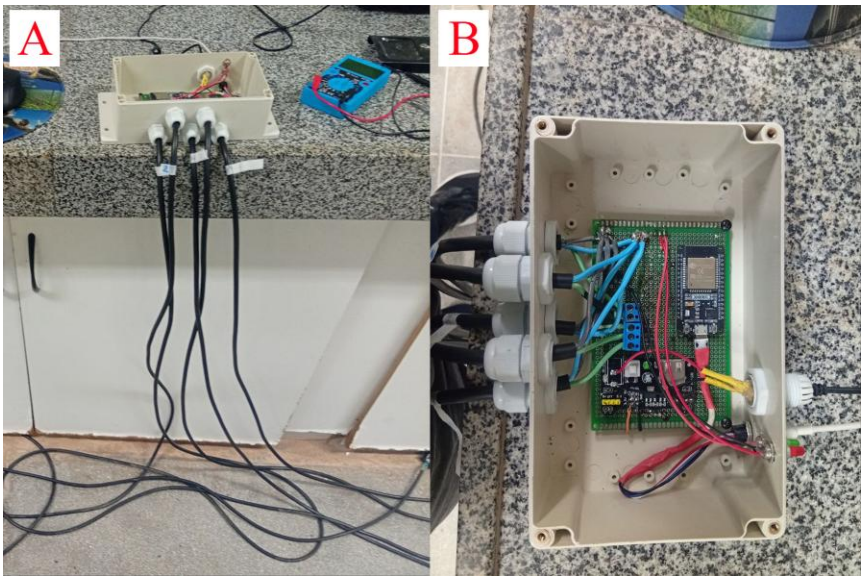


Figura 04: (A) Invólucro protetor externo; (B) Arquitetura interna do protótipo.
Fonte: Autores (2026)

A parte lógica do sistema foi estruturada em dois componentes principais: o firmware do ESP32 e a API em Google Apps Script. Essa divisão permite distribuir as funções do sistema de forma organizada, em que o código do microcontrolador é responsável pela aquisição dos dados e pela economia de energia, enquanto a API realiza o tratamento das informações, a calibração e o armazenamento dos registros. Ambos os códigos estão disponíveis para consulta e reprodutibilidade no repositório público do projeto no GitHub.

Calibração

A calibração dos sensores foi realizada para estabelecer uma relação matemática entre os sinais analógicos brutos (ADC) e os valores percentuais de umidade. O procedimento envolveu a coleta de 11 pontos experimentais em diferentes dias, utilizando um medidor de solo multifuncional: mede fertilidade, umidade, temperatura, pH, intensidade da luz solar e umidade ambiente, com medição precisa em 3 segundos, demonstrado na Figura 05B, como referência externa para medir a umidade real. Para mitigar ruídos de leitura e oscilações elétricas, cada ponto de calibração foi calculado a partir da média das cinco leituras ADC mais próximas no histórico do sistema, garantindo que o sinal processado representasse o estado do solo naquele instante.

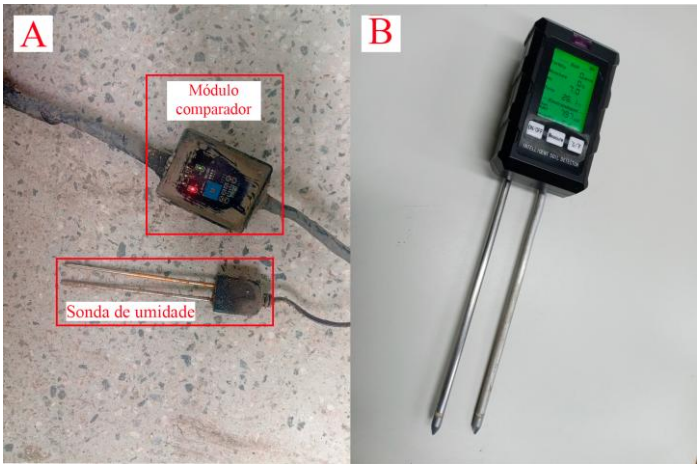


Figura 05: (A) Sensor de Umidade HD-38; (B) Medidor de solo multifuncional.
Fonte: Autores (2026)

A correlação entre o sinal elétrico e a umidade real foi definida por meio de regressão linear, conforme a Equação (01).

$$Umidade(\%) = a\,.\,ADC + b \qquad (1)$$

Em que: a é o coeficiente angular, b é o coeficiente linear e ADC é o valor digital bruto lido pelo microcontrolador.

A precisão deste modelo foi validada pelo coeficiente de determinação (R^2), que mede a proximidade dos pontos experimentais em relação à reta calculada. Embora o método gravimétrico detalhado por Canja (2025) ofereça uma precisão teórica superior, a calibração por comparação direta foi adotada por ser uma alternativa tecnicamente eficiente diante do cronograma do projeto. Essa abordagem permitiu compensar variações físicas entre os sensores, como as observadas em módulos que apresentaram falhas durante a operação em campo.

Na Tabela 01 são apresentados os parâmetros de calibração obtidos para os cinco sensores, revelando o impacto das condições de instalação na precisão do sistema. O Sensor 1 e 4 demonstraram a melhor correlação experimental ($R^2 = 0,87$), validando a eficácia do isolamento e da proximidade do módulo comparador ao microcontrolador. Em contrapartida, as variações nos coeficientes e as falhas registradas nos sensores S2 e S3 serviram como um teste de estresse para a arquitetura, permitindo observar o impacto da impedância do cabeamento e da exposição à umidade extrema no jardim de chuva. Esses dados foram fundamentais para ajustar as constantes a e b na Equação (01), corrigindo disparidades de fabricação e garantindo que o monitoramento remoto refletisse com maior fidelidade a dinâmica hídrica do ambiente.

Sensor	Coef. Angular (a)	Coef. Linear (b)	ADC Seco (0%)	ADC Molhado (100%)	R^2	Status
S1	-0.051	164.36	3205	1262	0.87	Utilizável.
S2	-0.020	87.23	5295	-802	0.33	Inválido, fora do range 0–4095.
S3	—	—	—	—	—	Sem dados, ADC sempre zero.
S4	-0.090	255.35	2792	1681	0.87	Utilizável.
S5	-0.070	173.87	2636	1107	0.73	Utilizável com ressalvas.

Tabela 01: Parâmetros de calibração linear dos sensores de umidade do solo.
Fonte: Autores (2026)

Após a instalação do sistema e configuração do armazenamento dos dados provenientes do conversor analógico-digital (ADC), a coleta contínua de dados foi iniciada em 04 de dezembro de 2025, com monitoramento do teor de umidade do solo por meio do sensor comercial. Em 24 de fevereiro de 2026, com o início do período chuvoso, teve início a fase de estabilização do sistema em condições reais de operação, caracterizadas por maiores variações no teor de umidade do solo. Esse período foi adotado como referência para as análises, por permitir a avaliação do desempenho dos sensores sob condições hidrológicas mais representativas, incluindo eventos de infiltração, saturação e drenagem do solo.

Resultados e Discussão

Os dados coletados em campo mostraram que a eficiência do monitoramento depende das condições de instalação e do isolamento dos componentes. O Sensor 1 apresentou o melhor desempenho, com coeficiente de determinação ($R^2 = 0,87$), indicando maior consistência nas medições quando há menor comprimento de cabo e melhor vedação do módulo comparador. Em contrapartida, as diferenças de distância entre os sensores e o ESP32 permitiram observar a influência do cabeamento no sinal analógico. No Sensor 4, o comprimento maior do cabo reduziu a faixa de leitura, enquanto no Sensor 5, embora o sinal estivesse presente, as medições não apresentaram valores confiáveis ($R^2 = 0,73$), sugerindo que a entrada de umidade no módulo comparador afetou a estabilidade das leituras.

A análise física indicou que os sensores S2 e S3 sofreram interrupções críticas durante o período de teste. O Sensor 3 apresentou leitura zero constante devido a uma quebra física total, enquanto o Sensor 2 operou fora da faixa padrão de 0 a 4095 do conversor analógico-digital (ADC), o que impossibilitou sua utilização para o cálculo da umidade. Além das limitações relacionadas ao hardware, a calibração enfrentou dificuldades porque o sistema foi instalado no início do período chuvoso. A ausência de medições em solo completamente seco limitou a definição do ponto de 0%, exigindo estimativas matemáticas que podem ter influenciado a precisão final dos valores de umidade.

Analisando as leituras coletadas dos sensores com maior valor de R^2 (S1 e S4), observa-se comportamento gráfico similar, apesar de haver um deslocamento considerável dos valores de umidade. Esse deslocamento pode ocorrer devido a localização distinta dos sensores dentro da área do jardim. Observou-se um aumento coerente de valores após eventos pluviométricos que ocorreram no período isolado para análise, conforme demonstra o gráfico da Figura 06.

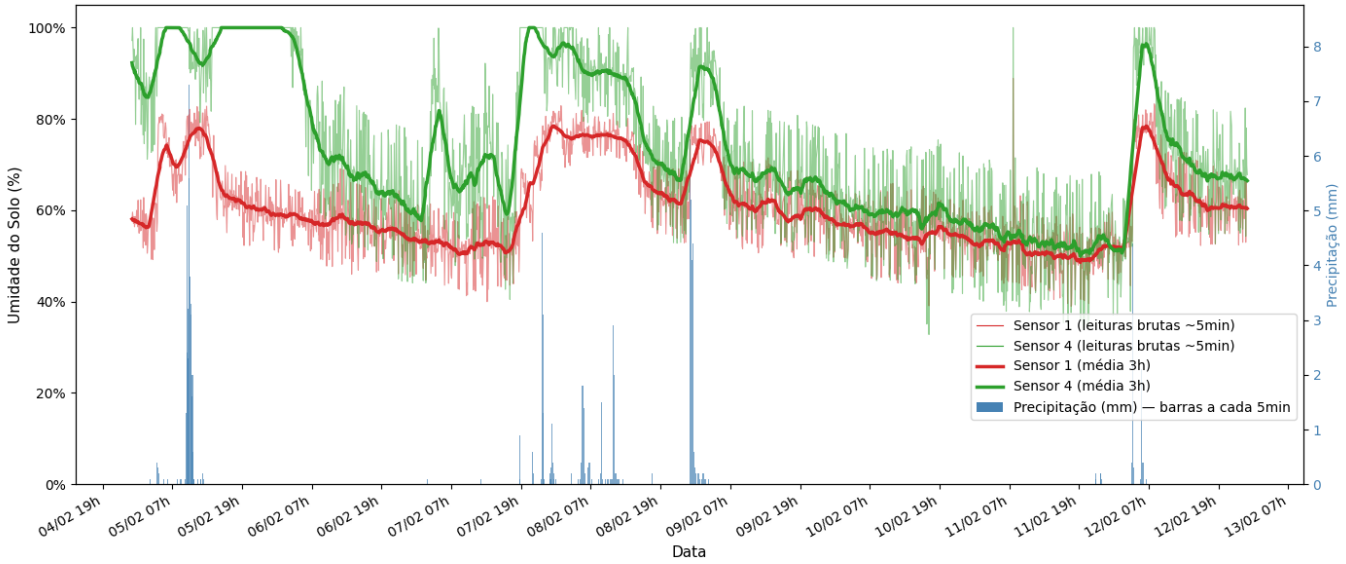


Figura 06: Precipitação x Umidade (%) - Fevereiro 2026 (dias 05 a 12).
Fonte: Autor (2026)

Observa-se que, após os eventos de precipitação, à medida que o solo se aproxima do final do período de redução da umidade, os valores de umidade tendem a convergir entre os sensores analisados. Esse comportamento indica consistência nas leituras e sugere uma calibração semelhante entre as sondas. O período selecionado apresentou eventos pluviométricos de elevada intensidade durante a fase de estabilização do sistema, com acumulados máximos de até 47 mm em 24 horas, o que possibilitou a avaliação do desempenho dos sensores sob condições variáveis de umidade, incluindo processos de infiltração e subsequente redução da umidade do solo.

Considerações Finais

O artigo demonstrou a viabilidade técnica de um ecossistema de monitoramento para jardins de chuva baseado em Internet das Coisas (IoT), utilizando o SoC ESP32 como núcleo de processamento e aquisição. A arquitetura lógica, dividida entre o firmware do microcontrolador e a API desenvolvida em Google Apps Script, provou ser estável para a transmissão de dados via HTTPS e para o gerenciamento remoto de parâmetros de calibração. A implementação do modo Deep Sleep e a automação do registro de dados em planilhas eletrônicas confirmam que o sistema atende aos requisitos de baixo consumo energético e facilidade de acesso à informação.

A metodologia de calibração por regressão linear aplicada aos sensores foi um passo fundamental para transformar sinais analógicos brutos em dados de umidade interpretáveis. Através da coleta de pontos experimentais em campo e da correlação matemática, foi possível corrigir disparidades de fabricação entre os componentes e ajustar o sistema à dinâmica hídrica específica da areia franca em estudo. Os resultados destacam que sensores de baixo custo, como o HD-38, quando assistidos por um sistema embarcado robusto e devidamente calibrado, apresentam linearidade e sensibilidade adequadas para o monitoramento da dinâmica da água no solo.

Durante a operação real, o sistema permitiu identificar o impacto direto de variáveis físicas e ambientais no monitoramento. A experiência em campo evidenciou que o desempenho dos sensores é sensível a fatores como a impedância decorrente do comprimento dos cabos e a integridade das vedações nos módulos comparadores. Embora tenham ocorrido falhas pontuais em alguns dos sensores devido à exposição severa à umidade, essas interrupções não invalidaram o projeto, ao contrário, forneceram dados valiosos sobre a durabilidade dos componentes e permitiram validar a eficácia da montagem dos sensores que mantiveram plena funcionalidade, como o S1.

Com o objetivo de melhorar a linearidade da calibração e a confiabilidade dos dados em trabalhos futuros, são propostas melhorias tanto no software quanto no hardware. Conforme observado na Figura 06, os valores brutos lidos a cada 5 minutos apresentam ruídos significativos. Para reduzir esse efeito, sugere-se modificar a lógica de aquisição do ESP32: em vez de uma única leitura por sensor, o sistema deve calcular a média de 10 amostras consecutivas obtidas em intervalos de microssegundos. Essa técnica permite reduzir variações rápidas nas medições sem comprometer o tempo de resposta do sistema.

No hardware, a redução das perdas causadas pelo uso de cabos longos, que diminuíram a faixa útil de leitura dos sensores 4 e 5, pode ser obtida com a inserção de um amplificador operacional LM358 em configuração de seguidor de tensão (buffer). Posicionado entre o módulo comparador e o cabeamento, o LM358 auxilia na adaptação do sinal, fornecendo a corrente necessária para evitar quedas de tensão ao longo dos cabos. Dessa forma, o sinal que chega ao conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador se aproxima mais do valor real medido em campo.

Em síntese, os dados gerados por este sistema contribuem para a análise da capacidade de infiltração do jardim de chuva e para a compreensão do comportamento da umidade do solo sob diferentes condições de precipitação. Além de auxiliar na

avaliação da adaptação das espécies vegetais, as leituras podem permitir estabelecer uma comparação quantitativa entre a retenção de água em jardins de chuva e em áreas de jardinagem tradicional. Dessa forma, o sistema proposto demonstra que tecnologias de baixo custo podem ser utilizadas como ferramentas eficazes para o manejo de águas pluviais em ambientes urbanos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FUNCAP pelas concessões das bolsas de iniciação científica, doutorado e iniciação à tecnologia, respectivamente. O apoio institucional do IFCE e da Universidade Federal do Ceará (UFC) foi fundamental, com especial reconhecimento ao projeto de extensão Célula de Internet das Coisas e a Prof. Dr. Atslands Rego da Rocha pelo suporte técnico e capacitação oferecidos a seus membros.

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto "Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o gerenciamento de águas pluviais urbanas" (processo 405958/2023-4).

Referências Bibliográficas

BERNARDO, S. **Manual de irrigação** 5.ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1989. 596p.

CANJA, J. F.. **Caracterização experimental de sensores de baixo custo assistidos por sistema embarcado para o uso em agricultura sustentável.** 2025. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

CHAVES, M. T. R.. **Jardim de chuva como solução baseada na natureza em ambiente tropical urbano: critérios de design, desempenho hidrológico e adaptabilidade vegetal.** 2024. 127 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - IFCE/ Campus Fortaleza, Fortaleza-CE, 2024.

GREKSA, A.; GRABIC, Jasna; BLAGOJEVIC, Bosko. Contribution of low impact development practices-bioretention systems towards urban flood resilience: case study of Novi Sad, Serbia. **Environmental Engineering Research**, v. 27, n. 4, 2022.

GREKSA, A., Blagojević, B. & Grabić, J. Soluções baseadas na natureza na Sérvia: Implementação de jardins de chuva na comunidade suburbana de Kać. ***Environ. Process.*** 10 , 41 (2023).

KRAUSS, L.; RIPPY, M. A. Plant adaptive strategy influences hydrologic services provisioning by stormwater bioretention. **Ecological Engineering**, v. 198, p. 107148, 2024.

LIMA, M. F. R. et al. **Análise comparativa de desempenho, eficiência energética e pegada de memória de algoritmos de assinatura digital em dispositivos IoT:** um estudo de caso sobre o SoC ESP32-C6. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2025.

MARQUES, T. H. N. et al. Soluções baseadas na natureza: conceituação, aplicabilidade e complexidade no contexto latino-americano, casos do Brasil e Peru. **Revista Labverde**, v. 11, n. 1, p. 12-49, 2021.

MUNIZ, L. F. et al. Classificação climática para o Estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.** Porto Alegre: ABRH, 2017.

NASCIMENTO, V. H. A. do et al. Problemas da impermeabilização excessiva do solo. **Anais Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar** (ISSN-2527-2500), 2018.

SALES, L. E. de O. et al. Estimation of the soil basic infiltration velocity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 2091-2095, 1999.

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO NO PERÍMETRO URBANO DE CUIABÁ-MT UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO E EDIÇÃO MATRICIAL

1 Emelly Teles Felix da Silva, 2 Rayssa Yandra Ribeiro Rocha, 3 Amanda Evellyn de Oliveira Pacheco, 4 Carlos André Bassi Zacarkim, 5 Julia Costadelle Patrício, 6 Luis Gustavo Junior Ramos dos Santos, 7 Milena Falchetti Santos

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: emellytelesfelix@gmail.com; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: rayssayandra12@gmail.com; 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: amandapcho@gmail.com; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: czacarkim7@gmail.com; 5 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: costadelle.j@gmail.com; 6 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: luisgustavodossantos721@gmail.com; 7 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: milena.sanchetti@gmail.com.

Palavras-chave: Drenagem Urbana; QGIS; Gestão de Riscos.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo mapear a suscetibilidade à inundação no perímetro urbano de Cuiabá–MT, visando subsidiar o planejamento urbano e a gestão de riscos hidrológicos. A metodologia baseou-se na integração de dados geoespaciais em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), com uso do software QGIS 3.34.1 LTR e do plugin Serval para refinamento matricial. Foram utilizados dados hidrológicos e topográficos provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA), IBGE, INTERMAT e SIPAM. A validação foi realizada por meio de dados pluviométricos de 2025 da Estação Mestre Bombled (UFMT) e comparação com a Carta de Suscetibilidade da CPRM (2022). Os resultados indicam que áreas de alta e muito alta suscetibilidade estão associadas à rede de drenagem, à baixa declividade e à intensa impermeabilização do solo, com destaque para os bairros Centro Norte, Porto, Dom Aquino e Terceiro. Observou-se correspondência entre as áreas mapeadas e eventos reais de alagamento registrados em 2026. Conclui-se que o uso integrado de geoprocessamento e edição matricial constitui ferramenta eficiente para identificação de áreas críticas, contribuindo para estratégias de mitigação e planejamento urbano sustentável.

Introdução

A urbanização acelerada sem o devido planejamento da infraestrutura de drenagem tem intensificado os episódios de inundações em centros urbanos brasileiros, especialmente em capitais com dinâmicas hidrológicas complexas como Cuiabá. A configuração espacial da capital mato-grossense é marcada por processos de ocupação que, historicamente, suprimiram Áreas de Preservação Permanente (APP) ao longo dos diversos córregos que cruzam a malha urbana, potencializando riscos hidrológicos e desastres socioambientais.

Este cenário é agravado pela impermeabilização do solo e pela obsolescência de sistemas de canalização, como o observado na bacia do córrego da Prainha, onde a percepção pública muitas vezes negligencia a relação entre o manejo de resíduos e a eficiência da drenagem. Diante da recorrência de alagamentos severos, como os registrados em março de 2026, torna-se fundamental o uso de ferramentas de Geoprocessamento para o diagnóstico preciso do território. O presente artigo busca mapear o grau de suscetibilidade hídrica no perímetro urbano de Cuiabá utilizando o software QGIS 3.34.1 LTR, integrando dados meteorológicos locais e bases institucionais para subsidiar estratégias de engenharia sanitária e mitigação de riscos.

A compreensão da dinâmica hídrica em cidades tropicais como Cuiabá exige uma análise que transcenda a observação pontual e considere a bacia hidrográfica como unidade fundamental de planejamento. O crescimento urbano desordenado, muitas vezes ignorando as condicionantes geológicas e hidrológicas, resulta em uma paisagem fragmentada onde o sistema de drenagem convencional, projetado para décadas passadas, não mais suporta os regimes de precipitação atuais. A adoção de critérios técnicos rigorosos no mapeamento de áreas suscetíveis torna-se, portanto, um instrumento de resiliência e enfrentamento de problemas socioambientais e políticos.

Sob essa ótica, o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite não apenas a visualização dos riscos, mas a simulação de cenários que podem orientar a tomada de decisão em níveis preventivos, evitando que a gestão pública atue apenas de forma curativa após a ocorrência de catástrofes.

O diferencial deste estudo reside na integração entre modelagem hidrológica baseada em MDT e o refinamento manual da matriz de suscetibilidade, aliado à validação com eventos reais recentes. Essa abordagem permite maior aderência entre o modelo teórico e a dinâmica urbana observada, contribuindo para diagnósticos mais precisos e aplicáveis à gestão pública.

Material e Métodos

A área de estudo compreende o perímetro urbano de Cuiabá–MT, adotando o sistema UTM, Datum SIRGAS 2000, Zona 21S. Para a execução do mapeamento de suscetibilidade à inundação, utilizou-se o software QGIS na versão 3.34.1 LTR, integrando-se vetores de hidrografia da Agência Nacional de Águas (ANA), malhas territoriais do IBGE e do INTERMAT, além de dados matriciais disponibilizados pelo SIPAM.

O processamento digital foi estruturado a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT), processado especificamente para representar a topografia real do solo cuiabano através da remoção rigorosa de interferências de dossel, vegetação densa e edificações que poderiam mascarar as linhas de talvegue natural. A partir deste MDT, foram extraídas as redes de drenagem e as áreas de acumulação de fluxo via algoritmos de análise hidrológica de preenchimento de depressões (fill sinks), permitindo o cálculo preciso da declividade em setores críticos como o Centro Norte e o Porto, onde variações topográficas sutis determinam a direção do fluxo pluvial durante eventos de precipitação extrema.

O refinamento técnico das células da matriz contou com o emprego do plugin Serval para edição matricial direta, ferramenta que permitiu a correção manual de pixels em locais onde intervenções antrópicas severas, como aterros urbanos e canalizações fechadas em galerias, alteraram o comportamento da drenagem natural do terreno. Tal etapa de edição foi determinante para ajustar a resposta do modelo preditivo em áreas densamente urbanizadas, garantindo que a escala de suscetibilidade resultante refletisse com fidelidade a realidade das microbacias locais e a ineficiência histórica de drenagem em talvegues ocupados pela expansão urbana.

No âmbito da Engenharia Sanitária, a precisão deste mapeamento é vital, visto que a impermeabilização do solo em áreas consolidadas altera drasticamente o tempo de concentração das bacias hídricas, podendo elevar em até seis vezes o volume de escoamento superficial em relação ao estado natural de infiltração.

Complementarmente, a caracterização climatológica da pesquisa fundamentou-se na análise da série histórica de precipitação diária referente ao ano de 2025, proveniente da Estação Mestre Bombled (UFMT), estrategicamente localizada para monitorar a dinâmica hídrica do Campus Universitário e da bacia do córrego do Barbado. A utilização destes dados primários forneceu subsídios essenciais para a compreensão de gargalos crônicos de drenagem que afetam áreas acadêmicas e comerciais adjacentes.

Os índices pluviométricos levantados, que detalham tanto o volume acumulado mensal quanto os eventos extremos de precipitação máxima em 24 horas, foram cruciais para a calibração dos níveis de criticidade no mapeamento matricial. Esses valores consolidados, que servem de base para a discussão sobre a saturação hídrica e a ineficiência dos sistemas de microdrenagem em Cuiabá, estão detalhados na Tabela 01, apresentada a seguir. A validação técnica de todo o processo foi consolidada pelo confronto direto entre os resultados derivados do MDT e as manchas de inundação mapeadas na Carta de Suscetibilidade da CPRM (2022), assegurando que o produto cartográfico final refletisse tanto a morfologia física do terreno quanto a vulnerabilidade das bacias urbanas frente aos eventos hidrometeorológicos registrados.

Mês	Precipitação Total (mm)	Máxima Diária (mm)
Janeiro	302,6	99,5
Fevereiro	255,3	78,5
Março	205,7	28,6
Abril	485,2	96,5
Maio	45,7	31,5
Junho	61,9	60,5
Julho	1,2	0,7
Agosto	0	0
Setembro	5,1	4,8
Outubro	54	51,5
Novembro	99,1	20
Dezembro	161,4	38,1
Total Anual	**1677,2**	-

Tabela 01. Precipitação mensal e máximas diárias registradas na Estação Mestre Bombled em 2025. Fonte: Autoria própria (2026)

Resultados e Discussão

A análise da dinâmica hidrológica no perímetro urbano de Cuiabá, fundamentada nos dados consolidados da Estação Mestre Bombled em 2025 (Tabela 01), revela um cenário de vulnerabilidade intrínseca aos eventos de precipitação severa. Com um acumulado anual de 1677,2 mm, a capital mato-grossense enfrenta desafios típicos de climas tropicais, onde a concentração de chuvas em curtos intervalos de tempo atua como o principal gatilho para inundações.

Os eventos extremos registrados em janeiro (99,5 mm) e abril (96,5 mm) são particularmente alarmantes sob a ótica da engenharia, pois representam volumes que, em uma bacia urbanizada, superam rapidamente a capacidade de infiltração do solo e a vazão de projeto das galerias pluviais existentes. A utilização do Modelo Digital de Terreno (MDT) foi o diferencial técnico nesta etapa: ao contrário de modelos de elevação genéricos, o MDT permitiu remover o "ruído" das edificações e focar na topografia real.

Isso possibilitou identificar que o relevo de Cuiabá, embora predominantemente plano a suave ondulado, possui micro depressões e zonas de "baixa energia" que funcionam como bacias de acumulação natural, onde a água tende a estagnar devido à baixa declividade. Sob o prisma da Engenharia Sanitária, o processo de impermeabilização severa — decorrente da pavimentação asfáltica e da densidade construtiva — altera o ciclo hidrológico local ao reduzir o tempo de concentração das microbacias. Na prática, isso significa que a água da chuva atinge os canais e sarjetas muito mais rápido do que o sistema foi projetado para suportar.

A literatura técnica indica que, em áreas com alto índice de impermeabilização, como o centro consolidado de Cuiabá, o volume de escoamento superficial pode ser até seis vezes superior ao observado em áreas de cobertura vegetal nativa. Esse excedente hídrico sobrecarrega as seções transversais das galerias, provocando o transbordamento imediato em pontos de convergência.

Ao correlacionar esses índices pluviométricos de 2025 com o Mapeamento de Suscetibilidade (Figura 01), as manchas de criticidade máxima (cor vermelha) alinham-se precisamente aos eixos de drenagem de maior ordem. O refinamento via plugin Serval permitiu ajustar o modelo para que ele "enxergasse" onde as intervenções urbanas obstruíram os talvegues naturais, revelando que a suscetibilidade não é apenas uma questão de altitude, mas de como a engenharia e a ocupação humana alteraram a capacidade de resposta do terreno frente aos extremos climáticos...

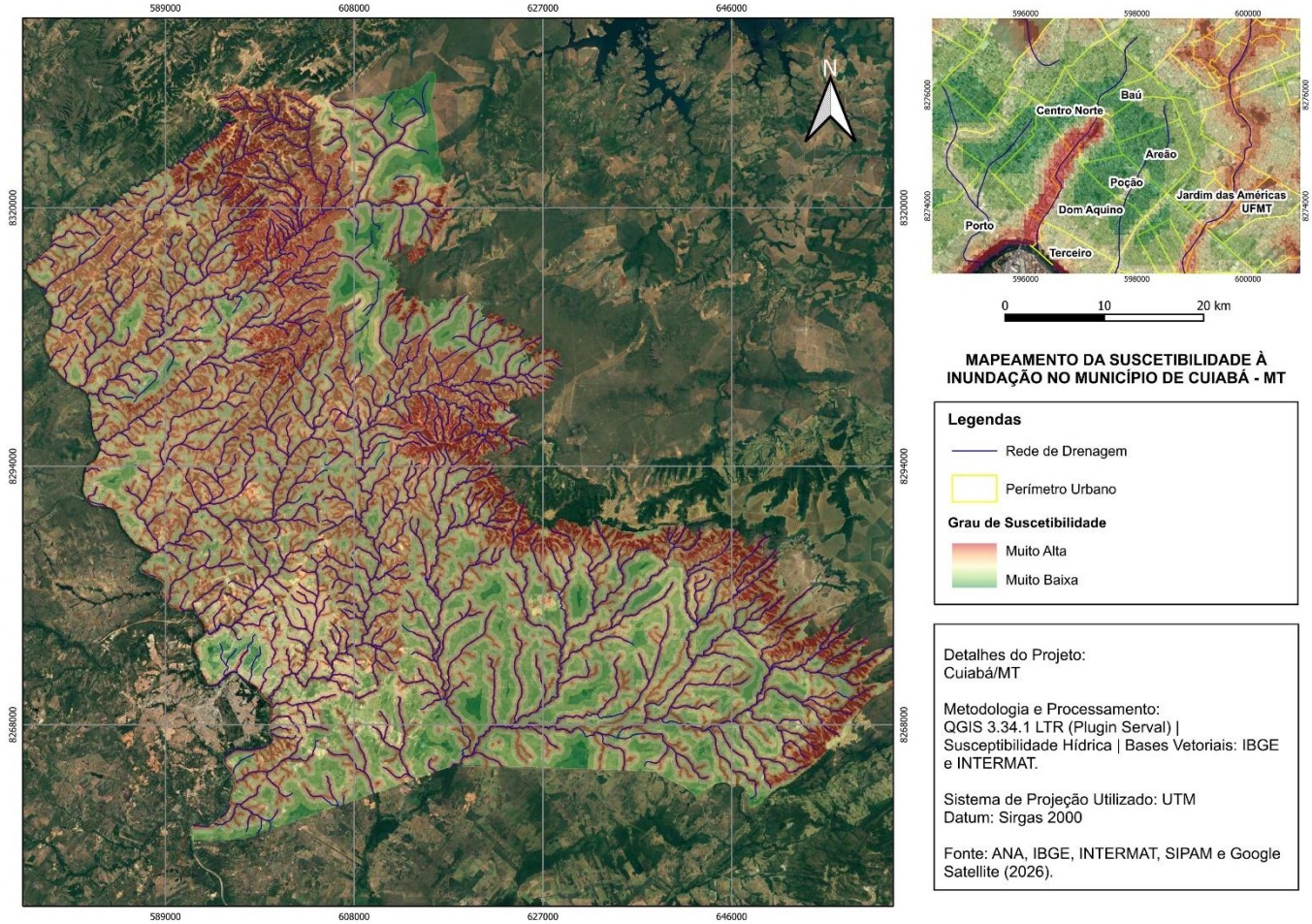


Figura 01: Mapa de suscetibilidade à inundação do perímetro urbano de Cuiabá-MT. Fonte: Autoria própria (2026).

A distribuição espacial dos riscos evidenciada na Figura 01 revela que o bairro Centro Norte, especificamente no eixo da avenida Prainha, destaca-se como a zona de maior vulnerabilidade. Este cenário reflete a falha histórica de sistemas de canalização fechada que ignoram a "memória do relevo" e não comportam as vazões de pico de eventos extremos.

A problemática é agravada pela deficiência na gestão de resíduos sólidos; conforme as pesquisas de percepção de Campos et al. (2015), a obstrução de bocas de lobo por detritos e sedimentos pode reduzir a eficiência de captação do sistema em até 80%. No dia a dia, essa realidade transforma as principais vias da capital em canais de drenagem improvisados, impossibilitando o tráfego e colocando em risco a segurança da população, como observado nos alagamentos severos registrados em março de 2026.

Adicionalmente, as áreas situadas nas planícies de inundação do Rio Cuiabá e seus afluentes, como os bairros Porto, Dom Aquino, Grande Terceiro e Ribeirão da Ponte, apresentam riscos elevados vinculados à ocupação de Áreas de Preservação Permanente (APP). Segundo Zamparoni (2011), a supressão da vegetação ciliar e a fragilização das margens dos 24 córregos que cortam a malha urbana reduzem a resiliência hídrica da cidade.

A validação do modelo gerado via QGIS e plugin Serval, quando confrontada com a Carta de Suscetibilidade da CPRM (2022) e os registros noticiosos de desabamentos e inundações recentes, confirma que o diagnóstico técnico é uma ferramenta indispensável para o planejamento urbano, evidenciando que a gestão de águas pluviais em Cuiabá exige uma abordagem que integre engenharia, manutenção constante e preservação ambiental.

Considerações Finais

A suscetibilidade à inundação no perímetro urbano de Cuiabá configura-se como um fenômeno resultante da interação entre condicionantes naturais e, sobretudo, processos antrópicos associados à urbanização desordenada. Embora fatores como baixa declividade e regime pluviométrico concentrado contribuam para a ocorrência de alagamentos, os resultados indicam que a intensificação desses eventos está diretamente relacionada à impermeabilização do solo, à ocupação de áreas ambientalmente sensíveis e à insuficiência da infraestrutura de drenagem urbana.

A aplicação do Modelo Digital de Terreno, associada ao refinamento matricial, demonstrou elevada eficiência na representação da dinâmica hidrológica urbana, permitindo identificar com maior precisão as áreas críticas e sua relação com a rede de drenagem e padrões de ocupação do solo. A validação com dados reais reforça a confiabilidade da metodologia adotada e sua aplicabilidade em estudos similares.

Os achados evidenciam que a recorrência de inundações em Cuiabá não pode ser atribuída exclusivamente a eventos climáticos extremos, mas sim à ausência de planejamento urbano integrado e à deficiência na gestão e manutenção dos sistemas de drenagem. Nesse sentido, torna-se indispensável a adoção de estratégias que integrem soluções estruturais e não estruturais, incluindo a requalificação de Áreas de Preservação Permanente, a implementação de soluções baseadas na natureza e o aprimoramento da gestão de resíduos sólidos.

Por fim, o estudo contribui como instrumento técnico de apoio à tomada de decisão, oferecendo subsídios para o planejamento urbano e a mitigação de riscos, com vistas ao aumento da resiliência do município frente aos eventos hidrometeorológicos extremos.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 50k (BHO 2017 50k). Brasília: ANA, 2017. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/4fd91f0d-f34f-4fca-a961-c2dcb3e0446e.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Malha Municipal Digital [2025]. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html.

INSTITUTO DE TERRAS DE MATO GROSSO (INTERMAT). Cuiabá: INTERMAT Disponível em: https://www.intermat.mt.gov.br.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: município de Cuiabá, MT. Cuiabá: CPRM, 2022.

SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA (SIPAM). Disponível em: https://panorama.sipam.gov.br.

ZAMPARONI, C. A. G. P. Análise de mapeamentos de áreas de riscos hidrológicos em Cuiabá/MT/Brasil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL, 3.; SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO, 1.; ENCONTRO NACIONAL DE RISCOS, 8., 2014, Guimarães. Multidimensão e territórios de risco. Guimarães: [s.n.], 2014. p. 405-409. DOI: 10.14195/978-989-96253-3-4_68.

DECISÃO DE DIRETORIA 014/2023/E/C/I DA CETESB COMO POLÍTICA PÚBLICA DE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS (DMAPU) NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DE UM LOTEAMENTO NO ESTADO DE SÃO PAULO

1 Anderson Andrei Noschang, 2 Liliane Lazzari Albertin

1 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", e-mail: anderson.noschang@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", e-mail: liliane.lazzari@unesp.br

Palavras-chave: Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas (DMAPU), Licenciamento ambiental, Decisão de Diretoria 014/2023/E/C/I.

Resumo

A implementação de políticas públicas para gestão e manejo de águas pluviais tem papel central no licenciamento ambiental de empreendimentos urbanos. Este trabalho analisa a aplicação prática da Decisão de Diretoria 014/2023/E/C/I da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) em um processo de licenciamento, por meio da avaliação técnica de estudos hidrológicos e de macrodrenagem apresentados para um estudo de caso de um projeto de loteamento a ser implantado no estado de São Paulo. Foram examinados os procedimentos de estimativa de cotas de cheia (TR = 100 anos), o dimensionamento de estruturas de detenção (TR = 10 anos para microdrenagem e detenção). Os resultados demonstraram que as cotas de inundação permaneceram, em sua maioria, restritas às áreas de preservação permanente, não comprometendo as áreas edificáveis do empreendimento. No que se refere ao controle das vazões incrementais geradas pela urbanização, foram projetados quatro reservatórios de detenção. Esses dispositivos foram dimensionados com base na diferença entre os cenários pré e pós-urbanização, assegurando que as vazões de saída fossem iguais ou inferiores às condições naturais. Os resultados das simulações indicaram significativa redução das vazões de pico, comprovando a eficiência das estruturas no amortecimento dos escoamentos. O estudo evidencia que a aplicação da Decisão de Diretoria nº 014/2023/E/C/I contribui para o planejamento urbano sustentável, ao exigir análises técnicas rigorosas e soluções que evitam o agravamento das condições de drenagem a jusante. A normativa promove uma mudança de paradigma, priorizando o controle e retenção das águas pluviais em vez de sua simples condução. Conclui-se que a integração entre licenciamento ambiental e gestão de drenagem urbana é essencial para reduzir riscos hidrológicos, proteger os recursos hídricos e garantir maior resiliência das cidades frente a eventos extremos. O trabalho reforça ainda a importância da adoção de medidas complementares, incluindo soluções baseadas na natureza, para aprimorar a gestão das águas pluviais em ambientes urbanos.

Introdução

A drenagem e manejo de águas pluviais urbanas (DMAPU) representam um dos desafios mais urgentes para o Brasil, considerando os problemas decorrentes da rápida urbanização, somado aos impactos das mudanças climáticas, que vêm se tornando cada vez mais evidentes com o aumento da frequência de chuvas intensas (Marengo, 2008). As áreas urbanas frequentemente sofrem com inundações, alagamentos e erosão, gerados pela impermeabilização do solo e pela falta de infraestrutura adequada sem controle dos referidos impactos (Cruz; Tucci, 2008). Esses problemas resultam em prejuízos econômicos significativos, riscos à saúde pública e degradação ambiental, especialmente em regiões densamente povoadas como as do estado de São Paulo. Essa situação demanda soluções integradas e sustentáveis que conciliem o desenvolvimento urbano com a proteção dos recursos hídricos, garantindo assim a segurança da população e a resiliência das cidades diante de eventos extremos.

Nesse cenário, diferentes estratégias de manejo têm sido adotadas. Entre elas, destacam-se as técnicas estruturais e não estruturais destinadas à mitigação dos impactos das chuvas intensas. As medidas estruturais incluem obras de engenharia como reservatórios de detenção, canais, piscinões, bacias de retenção e galerias pluviais, voltadas ao controle direto do escoamento e da vazão de pico. Já as técnicas não estruturais abrangem ações de planejamento urbano, instrumentos de gestão territorial, programas de controle da impermeabilização, mapeamento de áreas de risco, educação ambiental e sistemas de alerta, orientando o uso do solo e prevenindo a ocorrência de desastres (Tucci, 2002). A complementaridade entre essas abordagens é fundamental para enfrentar a complexidade dos processos hidrológicos urbanos contemporâneos.

A partir da promulgação da Lei 9.433 de 1997, foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGRH), que, por meio de seus objetivos, deixa claro a necessidade de abordar os desafios da DMAPU de forma articulada com a gestão de bacias hidrográficas, o que requer um planejamento que considere os impactos cumulativos e a compatibilidade entre os usos da terra e da água. Nesse sentido, a DMAPU não é apenas um problema técnico, mas também uma questão de governança da água, exigindo cooperação entre diferentes esferas do poder público e setores da sociedade civil.

O licenciamento ambiental surge como uma ferramenta estratégica para garantir que projetos de drenagem urbana sejam planejados e implementados em conformidade com a legislação ambiental. A sua importância para a gestão sustentável dos recursos hídricos no estado de São Paulo reside no fato de que ele exige estudos de impacto ambiental e adoção de medidas mitigadoras, desempenhando um papel crucial na redução de danos aos corpos d'água e na promoção da resiliência ambiental e urbana (Brasil,

1986). No entanto, as lacunas existentes na integração entre drenagem urbana e requisitos de licenciamento ambiental limitam a eficácia dessas ferramentas e destacam a necessidade de novas abordagens metodológicas que garantam uma gestão mais eficiente e sustentável.

Os impactos das mudanças climáticas na ocorrência de eventos extremos de cheias reforçam a necessidade de estratégias de mitigação e prevenção, especialmente nas grandes cidades. Atualmente, no Estado de São Paulo, grandes empreendimentos potencialmente poluidores e causadores de impacto ambiental estão sujeitos a processo de licenciamento com Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), conforme definido na Resolução CONAMA 01/86 (Brasil, 1986). Para a implantação desses empreendimentos, no que diz respeito à avaliação dos riscos à inundação e mitigação dos eventos de cheia, foram estabelecidos os critérios hidrológicos específicos para o licenciamento ambiental no estado.

A Decisão de Diretoria (DD) nº 014/2023/E/C/I, de 30 de janeiro de 2023, que estabelece esses critérios, foi elaborada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e vem sendo adotada desde o ano de 2023. Além da delimitação de área de preservação permanente, tratada em seu artigo 1º, a DD determina que os empreendimentos devem apresentar: estudos de cota de cheia, com Tempo de Retorno (TR) de 100 anos, para definição das áreas edificáveis (artigo 2º), e estudos de dimensionamento de soluções para detenção/retenção das vazões incrementais de águas pluviais geradas pela implantação dos empreendimentos que promovam a impermeabilização do solo, comumente utilizadas as estruturas cinzas, conforme previsto no artigo 3º.

Essas diretrizes exigem a análise hidrológica e hidráulica dos sistemas de drenagem propostos, bem como a verificação da capacidade de escoamento dos corpos receptores, de modo a evitar agravamento de condições de inundação ou processos erosivos a jusante.

Nesse contexto, empreendimentos urbanísticos como loteamentos demandam estudos técnicos detalhados para garantir que o desenvolvimento urbano ocorra de forma ambientalmente adequada e hidrologicamente segura.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicação da Decisão de Diretoria nº 014/2023/E/C/I da CETESB em projetos de drenagem urbana, utilizando como estudo de caso um loteamento localizado no município de Campinas (SP). O estudo busca avaliar as soluções de drenagem adotadas, os parâmetros hidrológicos utilizados e a eficiência das estruturas de controle de vazão projetadas.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido a partir do projeto de macrodrenagem submetido ao licenciamento prévio do loteamento, apresentado em atendimento às exigências da Decisão de Diretoria nº 014/2023/E/C/I, no âmbito do processo digital CETESB.000074/2020-34, bem como dos pareceres técnicos emitidos pela CETESB, obtidos por meio de vistas ao processo.

O empreendimento está localizado no município de Campinas, no interior do Estado de São Paulo e possui área total aproximada de 653.726,49 m², contemplando 1330 lotes, sendo 1268 lotes residenciais e 62 lotes não residenciais. Os lotes residenciais apresentam tamanhos variando entre 200 e 300 metros quadrados. Já os lotes comerciais foram projetados chegando a até 690 metros quadrados de área.

A Área Diretamente Afetada (ADA) do empreendimento está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 5 – Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba/Capivari/Jundiaí e pode ser observada na Figura 01.



Figura 01: Localização da gleba em estudo.
Fonte: Relatório Ambiental Preliminar (RAP) – Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

Artigo 2º da DD 014/2023/E/C/I – Determinação da cota de cheia para corpos d'água lindeiros ou que atravessem empreendimentos para fins de estabelecimento da área edificável.

De acordo com o inciso I do Artigo 2º da DD, serão exigidos estudos para determinação das cotas de cheia de cursos d'água nos processos de licenciamento com avaliação de impacto ambiental, quando estiver prevista a ocupação de áreas de várzea ou de planície de inundação, ou de áreas reconhecidas pelo Município como sujeitas a inundação.

Portanto, a partir deste critério, os interessados em implantar empreendimentos sujeitos ao licenciamento com avaliação de impacto devem apresentar estudos de cota de cheia, com TR de 100 anos, para os cursos d'água que lindem ou cruzem o empreendimento. O objetivo é estabelecer o início das áreas edificáveis e garantir que eventos de precipitação dessa magnitude não afetem negativamente residências ou estabelecimentos futuros em áreas suscetíveis a inundações.

De acordo com os estudos apresentados, a delimitação das bacias hidrográficas foi realizada a partir de análise cartográfica baseada em cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) na escala 1:10.000.

Foram definidas quatro seções de controle hidrológico no córrego Sem Denominação (SD), conforme pode ser observado na Figura 02:

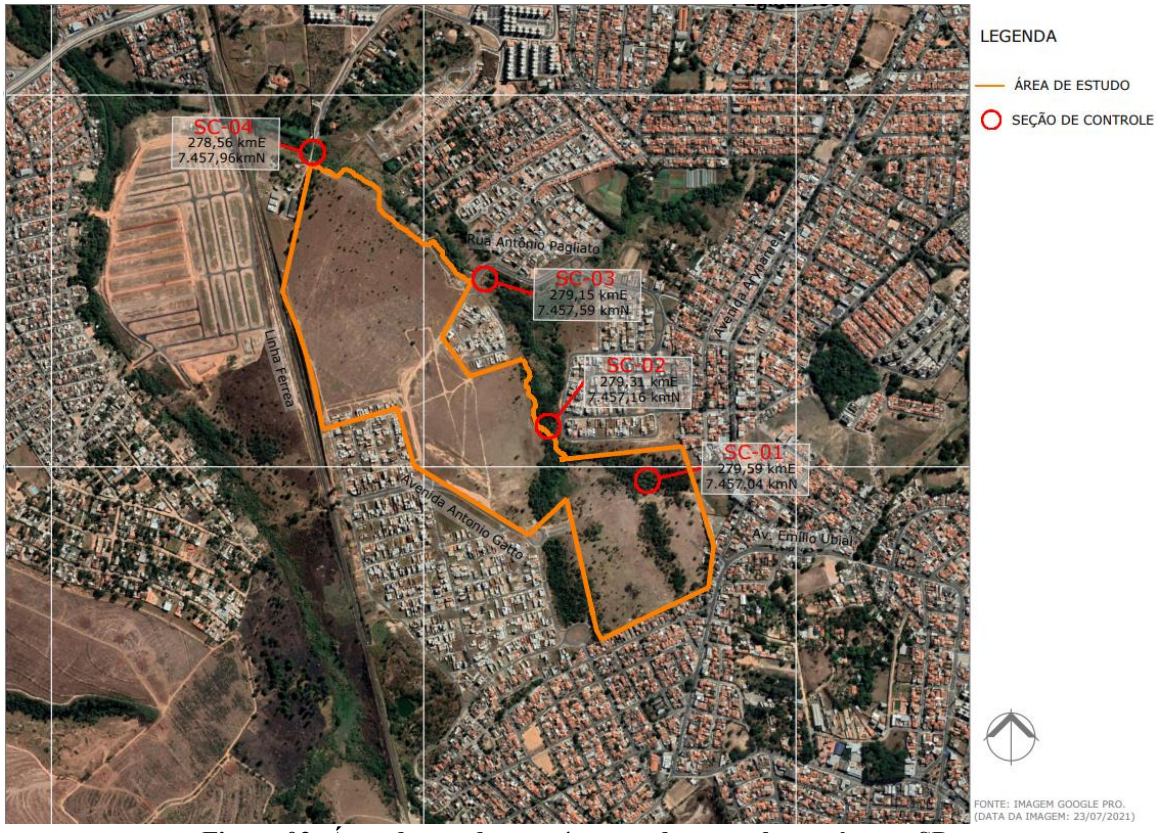


Figura 02: Área de estudo com 4 seções de controle no córrego SD.
Fonte: Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

Segundo o Parecer Técnico (PT) nº 008/2024/EQAH, além das seções do córrego SD, adicionalmente, foram definidas duas seções de controle (Figura 03) nos córregos afluentes, a fim de atender à exigência estabelecida no item 1 do Despacho 034/2023/EQAH, o qual estabelecia que deveria ser apresentado estudo de cota de cheia na seção do córrego receptor do lançamento de águas pluviais do tanque de detenção 3 (saída G), de forma a possibilitar a adequação deste lançamento ao estabelecido no inciso III do Artigo 2º da Decisão de Diretoria Nº 014/2023/E/C/I, de 30 de janeiro de 2023, o qual define que:

> III - Para garantia da funcionalidade da drenagem de águas pluviais do empreendimento na ocorrência de chuva com TR de 100 anos, as extremidades das tubulações de drenagem junto aos corpos d´água receptores, ou seja, nos pontos de lançamento, deverão ter suas geratrizes inferiores em cota superior à da cheia estimada. Tal condição deverá ser demonstrada na forma tabular em que constem as cotas de cheia e as das geratrizes inferiores dos tubos, bem como com desenhos ilustrativos (CETESB, 2023).

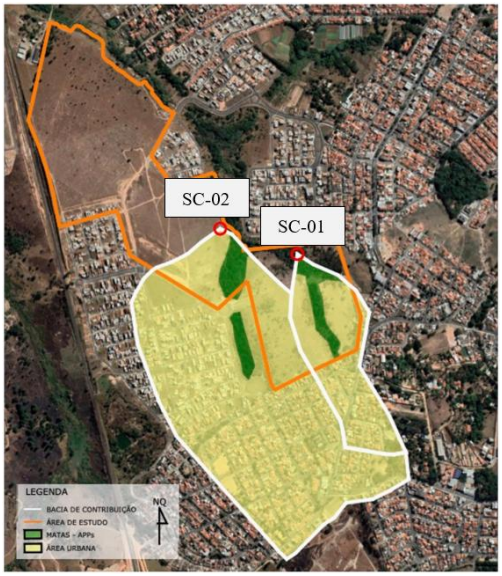


Figura 03: Bacias de contribuição dos afluentes do córrego SD, nas seções de controle SC-01 e SC-02 com indicação dos usos do solo.
Fonte: Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH – Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

Essas seções foram utilizadas para análise do comportamento hidrológico da bacia e para avaliação das condições de escoamento nos cursos d'água receptores.

Para o cálculo das vazões de pico foi adotado o Método Racional, amplamente utilizado em projetos de drenagem urbana em bacias de pequena extensão. Esse método considera a relação entre intensidade da precipitação, área da bacia e coeficiente de escoamento superficial.

A equação geral utilizada é:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3{,}6}$$

onde: Q é a vazão de pico (m³/s), C é o coeficiente de escoamento superficial, i é intensidade média da precipitação (mm/h) e A é a área da bacia (km²)

Para determinação da intensidade de chuva foi utilizada a equação de precipitações intensas desenvolvida para o município de Campinas, considerando TR de 100 anos. O tempo de concentração das bacias foi estimado por meio da equação de Kirpich, considerando o comprimento do talvegue e o desnível entre os pontos extremos da bacia, e o coeficiente de escoamento superficial foi calculado como resultado da ponderação dos tipos de uso do solo e seus respectivos coeficientes de escoamento.

A avaliação das condições de escoamento nos cursos d'água receptores foi realizada por meio de simulações hidráulicas utilizando o *software HEC-RAS*, desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*.

Para subsidiar as estimativas das cotas de cheia com as informações do relevo, foram levantadas 32 seções topobatimétricas nos trechos dos cursos d'água lindeiros ao empreendimento, espaçadas entre 50 e 100 metros.

Artigo 3º da DD 014/2023/E/C/I – Dimensionamento de soluções para a retenção das vazões incrementais de águas pluviais geradas em função da implantação de empreendimentos que promovam a impermeabilização do solo.

De acordo com o inciso I do Artigo 3º da DD, é exigida a apresentação de soluções para a retenção das vazões incrementais de águas pluviais geradas em função da implantação de empreendimentos de parcelamento do solo, industriais ou logísticos, licenciados em processos com avaliação de impacto ambiental.

No caso, o empreendimento refere-se a um loteamento, enquadrando-se como parcelamento do solo.

Para o dimensionamento das estruturas de drenagem, a área do loteamento foi subdividida em diferentes sub-bacias de contribuição, considerando a topografia do terreno e as direções naturais de escoamento superficial em conformidade com o projeto de terraplanagem.

Para minimizar os impactos hidrológicos decorrentes da urbanização, foram projetados quatro tanques de detenção no interior do empreendimento. Esses dispositivos têm como objetivo reduzir o pico de vazão lançado na rede pública ou nos corpos d'água receptores.

Segundo o inciso III do Artigo 3º da DD, "III - O volume incremental de águas pluviais, o qual corresponde ao volume que deverá ser retido, deverá ser calculado com base na diferença entre as vazões de águas pluviais estimadas para os cenários futuro e atual." (CETESB, 2023).

O volume dos reservatórios foi calculado a partir da diferença entre as vazões de pico nas condições pré e pós-urbanização, conforme a equação:

$$V = 0{,}5(Q_{pós} - Q_{pré}) \cdot t_b$$

onde: $Q_{pós}$ é a vazão no cenário pós-urbanização, $Q_{pré}$ é a vazão no cenário pré-urbanização e t_b representa o tempo de base do hidrograma ou três vezes o tempo de concentração.

Os reservatórios foram dimensionados para garantir que as vazões de saída sejam menores ou iguais às vazões de pré-urbanização, ou seja, as vazões no cenário futuro, com a implantação do empreendimento, devem ser iguais às vazões no cenário atual, sem o empreendimento.

Isso foi assegurado por meio de implantação de orifício de fundo, para controle de descarga.

O cálculo da vazão dos orifícios foi realizado conforme a equação:

$$Q = Cd \cdot A \cdot (2 \cdot g \cdot h)^{\frac{1}{2}}$$

onde: Q é a vazão em m³/s, Cd é o coeficiente de descarga do orifício, A é a área em m², g é a gravidade em m/s² e h é a carga d'água sobre o orifício em metros.

Para extravasamento em casos de emergência, em caso de chuvas excepcionais ou entupimento dos orifícios, em cada um dos reservatórios foi projetado vertedores de topo, O dimensionamento do vertedor seguiu a equação de Francis considerando duas contrações laterais, conforme equação:

$$Q = 1{,}838 \cdot (L - 0{,}2H) \cdot H^{\frac{3}{2}}$$

onde: Q é a vazão do vertedor em m³/s, L é a largura do vertedor em metros e H é a carga d'água sobre o vertedor em metros.

Para determinação da intensidade de chuva foi utilizada a equação de precipitações intensas desenvolvida para o município de Campinas, considerando TR de 10 anos. O tempo de concentração das bacias foi estimado por meio da equação de Kirpich, considerando as características fisiográficas das sub-bacias, e o coeficiente de escoamento superficial foi calculado como resultado da ponderação dos tipos de uso do solo do empreendimento e os respectivos coeficientes de escoamento definidos na alínea *c* do inciso IV do Artigo 1º da DD 014/2023/E/C/I.

Resultados e Discussão

Os resultados apresentados nesta seção integram as análises hidrológicas e hidráulicas desenvolvidas para o empreendimento, com ênfase na avaliação das cotas de cheia associadas aos eventos críticos de precipitação e no dimensionamento das soluções de detenção de águas pluviais (AP). A partir da modelagem hidráulica do curso d'água receptor, foram determinadas as condições de escoamento e as áreas potencialmente inundáveis para período de retorno igual a 100 anos, permitindo verificar a compatibilidade do projeto urbanístico com as restrições ambientais e hidráulicas impostas. Paralelamente, o dimensionamento dos reservatórios de detenção possibilitou avaliar a eficiência das medidas de controle adotadas na mitigação dos impactos decorrentes da urbanização, especialmente no que se refere à redução das vazões de pico e ao atendimento ao princípio de não agravamento das condições de escoamento a jusante. Dessa forma, a análise conjunta desses resultados permite discutir a aderência do empreendimento às diretrizes estabelecidas pela Decisão de Diretoria 014/2023/E/C/I da CETESB, evidenciando a importância da integração entre estudos de macrodrenagem e soluções compensatórias no planejamento e licenciamento de loteamentos urbanos.

Referente ao estudo das cotas de cheia, foram delimitadas as bacias de contribuição do córrego SD e seus afluentes, calculadas as intensidades de precipitação e os coeficientes de escoamento superficial, de acordo com os tipos de uso do solo da bacia, e por fim, calculadas as vazões de pico para cada seção de controle definida, conforme apresentado nas Tabelas 01 e 02.

Tabela 01: Vazões de pico estimadas para cada seção de controle do córrego SD.
Fonte: Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

Seção de controle	Vazão (m³/s)	Área de contribuição (km²)	Intensidade de precipitação (mm/h)	Coeficiente de escoamento superficial ponderado	Tempo de retorno (anos)
SC-01	6,02	0,189	182,45	0,63	100
SC-02	23,84	0,785	165,28	0,66	100
SC-03	40,67	1,557	142,61	0,66	100
SC-04	41,26	1,999	112,55	0,66	100

Tabela 02: Vazões de pico estimadas para cada seção de controle dos córregos afluentes. Fonte: Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

Seção de controle	Vazão (m^3/s)	Área de contribuição (km^2)	Intensidade de precipitação (mm/h)	Coeficiente de escoamento superficial ponderado	Tempo de retorno (anos)
SC-01	4,26	0,132	182,45	0,64	100
SC-02	15,83	0,532	157,75	0,68	100

De acordo com a alínea *f* do inciso I do Artigo 2º da *DD*:

> *f*) A partir dos levantamentos da chuva de projeto, da vazão de projeto e dos perfis topobatimétricos, serão estimadas as cotas de cheia, devendo o estudo apresentar, no mínimo, os perfis topobatimétricos com indicação das cotas de cheia e a planta da área de interesse, com delimitação da área alcançada pela água, na cheia com TR de 100 anos.

De acordo com o Parecer Técnico 008/2024/EQAH, através da simulação hidráulica realizada pelo *software HEC-RAS*, considerando as seções topobatimétricas e as vazões de pico estimadas no cenário pós-urbanização, as cotas do córrego SD variaram de 573,19 m a 608,41 m. Já para os afluentes do córrego SD, as cotas variaram de 592,44 m a 609,47 m.
Portanto, em atendimento à exigência, foram apresentadas as plantas da área de interesse, com a delimitação da área alcançada pela água, conforme pode ser observado nas Figuras 04 e 05.



Figura 04: Seções topobatimétricas 1 a 12 levantadas e delimitação da mancha de inundação ao longo do córrego SD. Fonte: Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH – Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

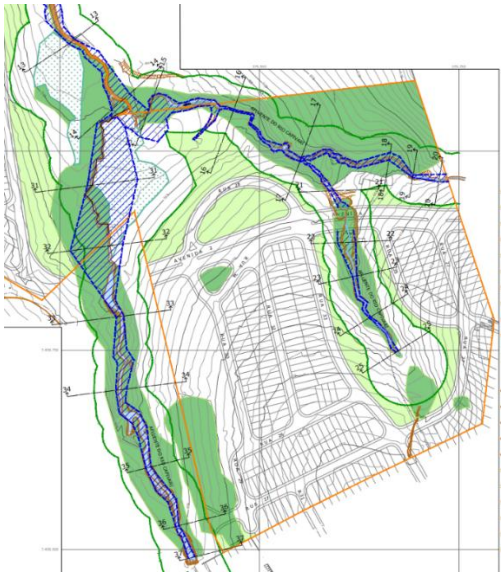
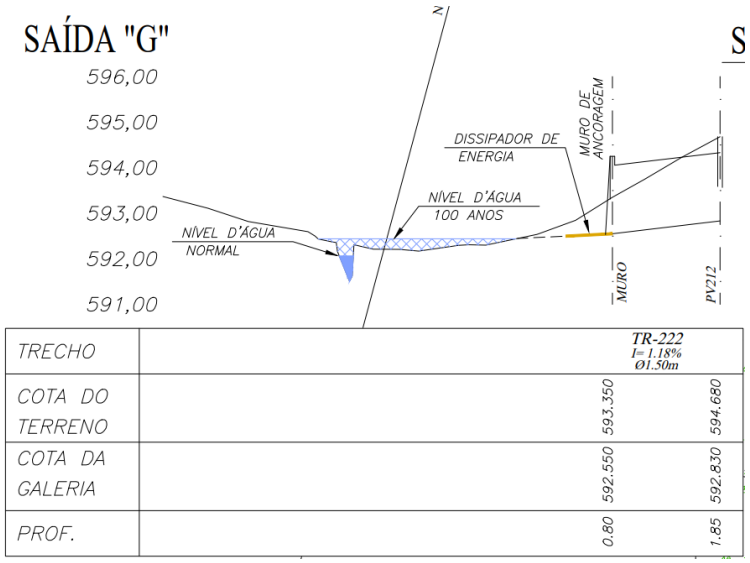


Figura 05: Seções topobatimétricas 13 a 20 levantadas ao longo do córrego SD, seções 21 a 25 e 31 a 37 nos afluentes e delimitação da mancha de inundação. Fonte: Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH – Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

A análise das seções transversais permitiu determinar as cotas máximas de inundação para TR igual a 100 anos, utilizadas como referência para delimitação de áreas não edificáveis e definição de limites de ocupação urbana. O estudo demonstrou que a mancha de inundação permanece, em sua maior parte, restrita às Áreas de Preservação Permanente (APP), assim como não há impacto direto nas áreas urbanizáveis, para precipitações dessa magnitude.

Para o atendimento ao inciso III do Artigo 2º da DD, foi apresenta o esquema de lançamento (Figura 06) adequado em atendimento ao item 1 do Despacho 034/2023/EQAH, onde, de acordo com o PT nº 008/2024/EQAH foi verificado que a geratriz inferior da tubulação de lançamento, prevista para ser instalada na cota 592,55 m, é superior à cota de cheia na seção 31, de 592,44 m. Além disso, também foi frisado que os demais lançamentos de águas pluviais do empreendimento também atenderam integralmente ao inciso III do Artigo 2º da Decisão de Diretoria Nº 014/2023/E/C/I, de 30 de janeiro de 2023.



TRECHO		TR-222 I= 1.18% Ø1.50m	
COTA DO TERRENO	593.350		594.680
COTA DA GALERIA	592.550		592.830
PROF.	0.80		1.85

Figura 06: Esquema de lançamento da saída "G" em atendimento ao item 1 do Despacho 034/2023/EQAH.
Fonte: Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH – Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

Já em relação ao dimensionamento de soluções para a detenção/retenção das vazões incrementais, o projeto final apresentado trouxe o dimensionamento de quatro tanques de detenção (Figura 07 e 08) a fim de amortecer estas vazões. A proposta de construção dos reservatórios consiste em serem aterrados e construídos em aduelas, permitindo que a área ocupada seja utilizada também como sistema de lazer.

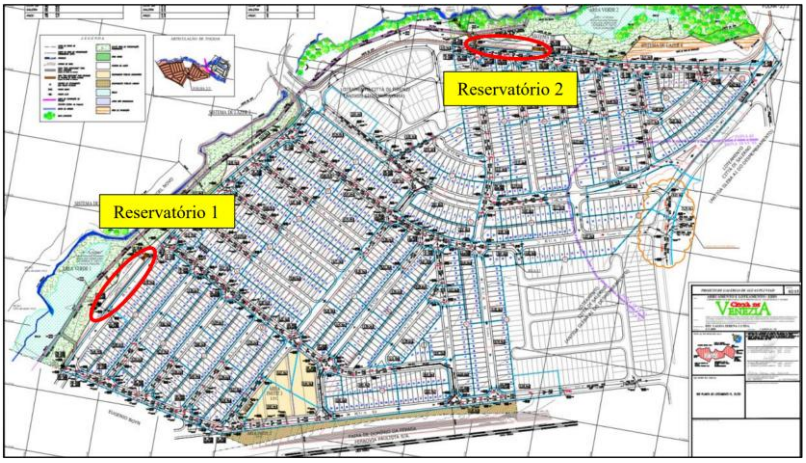


Figura 07: Localização dos reservatórios de detenção de águas pluviais 1 e 2 propostos.
Fonte: Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH – Processo CETESB.000074/2020-34 (2020).

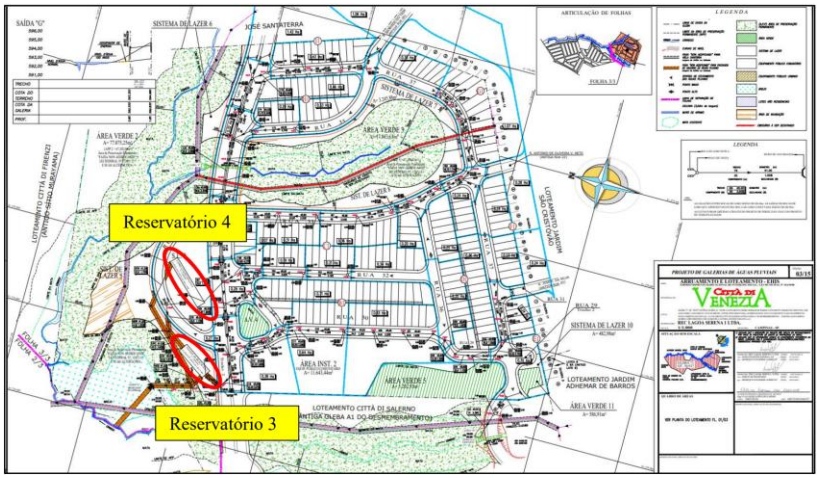


Figura 08: Localização dos reservatórios de detenção de águas pluviais 3 e 4 propostos.
Fonte: Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH – Processo CETESB.000074/2020-34 (2020).

Na Tabela 03 são apresentadas as vazões atuais, futuras e volumes das bacias de detenção do empreendimento. Observa-se que os volumes dos reservatórios propostos superam os volumes estimados, contribuindo para a segurança do sistema.

Tabela 03: Resultado das vazões de águas pluviais para os cenários atual, futuro e volumes estimados e propostos para as bacias de detenção.
Fonte: Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH - Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

Reservatório	Vazão atual (m³/s)	Vazão futura (m³/s)	Volume estimado para o reservatório (m³)	Volume proposto para o reservatório (m³)
1	1,99	5,31	2.986,65	3.024,00
2	1,14	3,05	1.712,88	1.725,00
3	0,63	1,68	944,44	1.000,00
4	0,99	2,65	1.491,58	1.500,00

Na Tabela 04 são apresentados os resultados dos dimensionamentos dos orifícios e vertedores dos 4 reservatórios de detenção. Os estudos demonstraram que os vertedores possuem capacidade de condução de uma vazão com TR igual a 100 anos.

Tabela 04: Resultados do dimensionamento dos dispositivos hidráulicos dos quatro reservatórios de detenção.
Fonte: Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH - Processo CETESB.000074/2020-34 (2020)

Reservatório	Diâmetro do orifício (m)	Largura do vertedor (m)	Altura do vertedor (m)
1	0,65	4,00	1,05
2	0,48	3,80	1,05
3	0,35	2,00	1,05
4	0,68	2,20	1,05

Conforme o Manual de Drenagem da Prefeitura de São Paulo (2012), os dispositivos de detenção devem promover o armazenamento temporário das vazões excedentes, liberando-as apenas quando as condições a jusante forem compatíveis com a capacidade do sistema, implicando na limitação das vazões de saída aos níveis pré-existentes.

Como forma de demonstrar essa condição, a DD em sua alínea *c* do Inciso V do Artigo 3º, exige a apresentação de simulações do comportamento de cada solução frente a um evento de chuva crítica, com TR igual ao adotado no cálculo das vazões de projeto. A fim de tornar os resultados fidedignos, a simulação deve considerar a conformação final do reservatório associado aos dispositivos hidráulicos dimensionados.

Segundo o PT nº 008/2024/EQAH, as simulações da operação das bacias de detenção, considerando uma chuva de projeto de TR de 10 anos, mostraram que as 4 estruturas realizam um significativo amortecimento nos hidrogramas de entrada.

- No reservatório de detenção 1, a vazão de pico cai de 5,31 m³/s para 1,49 m³/s, alcançando a cota máxima de 577,54 m e volume armazenado de 2.810,00 m³;
- No reservatório de detenção 2, a vazão de pico cai de 3,05 m³/s para 0,83 m³/s, alcançando a cota máxima de 584,56 m e volume armazenado de 1.630,00 m³;
- No reservatório de detenção 3, a vazão de pico cai de 1,68 m³/s para 0,44 m³/s, alcançando a cota máxima de 595,77 m e volume armazenado de 910,00 m³;
- No reservatório de detenção 4, a vazão de pico cai de 2,65 m³/s para 0,70 m³/s, alcançando a cota máxima de 600,41 m e volume armazenado de 1.440,00 m³;

Assim, foi concluído que as bacias reduzirão a vazão máxima lançada no córrego SD de 4,75 m³/s (cenário atual, sem o empreendimento) para 3,46 m³/s (cenário futuro com o empreendimento implantado). Isso significa que após a implantação do empreendimento, as vazões máximas lançadas no córrego SD serão inferiores às verificadas na condição atual.

A inclusão dos reservatórios de detenção no projeto de drenagem do loteamento mostrou-se fundamental para o atendimento aos critérios de controle hidrológico exigidos no licenciamento ambiental.

Os resultados indicam que os volumes calculados são compatíveis com as diferenças entre vazões pré e pós-urbanização; os dispositivos hidráulicos (orifícios e vertedores) garantem controle eficiente das descargas; e o sistema atende ao princípio de não agravamento das condições a jusante.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram a importância da aplicação de instrumentos regulatórios como a Decisão de Diretoria nº 014/2023/E/C/I da CETESB, que estabelece critérios técnicos para avaliação de drenagem em empreendimentos urbanísticos durante sua fase de licenciamento.

A exigência de estudos hidrológicos e hidráulicos detalhados contribui para:

- evitar sobrecarga de sistemas de drenagem existentes;
- reduzir riscos de enchentes urbanas;

- prevenir processos erosivos e assoreamento;
- promover planejamento urbano mais sustentável.

Os resultados reforçam que a aplicação da normativa promove controle efetivo de vazões, evita transferência de impactos para jusante e garante segurança hidrológica.

Além disso, evidencia a importância dos estudos de cota de cheia para definição de áreas de restrição à ocupação e da integração entre o licenciamento ambiental e planejamento urbano.

A análise evidencia que a aplicação da Decisão de Diretoria 014/2023/E/C/I da CETESB promove uma mudança relevante na concepção de projetos de drenagem, exigindo soluções baseadas em retenção e amortecimento, em oposição ao modelo tradicional de simples condução de escoamento. Contudo, ainda permanecem lacunas entre os requisitos de drenagem e os processos de licenciamento. Nesse contexto, a adoção de Soluções Baseadas na Natureza, embora não seja atualmente exigida, pode ser considerada como complemento às diretrizes vigentes, ampliando a eficiência dos sistemas e gerando benefícios adicionais, como o aumento de áreas permeáveis, a melhoria dos serviços ecossistêmicos (regulação climática, recarga de aquíferos, biodiversidade urbana), a qualificação da qualidade da água e a valorização dos espaços públicos como áreas de lazer e convivência.

Por fim, conclui-se que a aplicação rigorosa de diretrizes técnicas no licenciamento ambiental é fundamental para garantir o desenvolvimento urbano sustentável e a segurança hidrológica das cidades.

Para a elaboração deste documento, foi utilizada ferramentas de inteligência artificial (IA) generativa, empregada como apoio na redação e organização textual. A IA contribuiu na síntese de informações, na estruturação de seções e na revisão gramatical, sem substituir a análise crítica e a responsabilidade autoral do pesquisador. Todo o conteúdo produzido foi avaliado, ajustado e validado pelos autores, garantindo a fidelidade científica e a adequação metodológica do trabalho.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" e ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – Prof-Água pelo apoio recebido, bem como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), mais especificamente à Diretoria de Avaliação de Impacto Ambiental (I) – Departamento de Licenciamento com Avaliação de Impacto Ambiental (IL) pelo fomento à elaboração deste artigo.

Referências Bibliográficas

ARACÊ AMBIENTAL. Laudo complementar de avaliação das cotas máximas de inundação - Afluente do rio Capivari - Despacho N°. 034/2023/EQAH. São Paulo, 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Brasília, 1986. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745. Acesso em: 10 nov. 2025.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Decisão de Diretoria 014/2023/E/C/I, de 30 de janeiro de 2023. Dispõe sobre o estabelecimento dos critérios hidrológicos para o licenciamento ambiental no Estado de São Paulo. São Paulo, 2023.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Despacho nº 034/2023/EQAH. São Paulo, 2023.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Parecer Técnico nº 008/2024/EQAH. São Paulo, 2023.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Avaliação dos Cenários de Planejamento na Drenagem Urbana. RBRH, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 59–71, 2008.

HERZOG, Cecília Polacow; ROSA, Lourdes Zunino. Infraestrutura Verde: Sustentabilidade e resiliência para a paisagem urbana. Revista LABVERDE, [s. l.], n. 1, p. 92–115, 2010.

MARENGO, José Antônio. Água e mudanças climáticas. Estudos Avançados, [s. l.], v. 22, p. 83–96, 2008.

SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: gerenciamento do sistema de drenagem urbana. 168 p. il. v.1. ISBN 978-85-66381-01-6. São Paulo: SMDU, 2012.

TUCCI, Carlos. Gerenciamento da Drenagem Urbana. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 5–27, 2002.

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO POR MEIO DE MODELAGEM NO SWMM

1 Anniely de Souza Silva, 2 Maria Eduarda Entringer Dumont, 3 Cristiano Gabriel Persch, 4 Rafael Pedrollo de Paes

1 Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), e-mail: anniely.silva@sou.ufmt,br; 2 Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), e-mail:maria.dumont@sou.ufmt.br; 3 Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), e-mail: cristiano.persch@ufmt.br; 4 Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), e-mail: rafael.paes@ufmt.br

Palavras-chave: Bacia de detenção; medidas compensatórias; LID.

Resumo

A expansão do perímetro urbano e a crescente implantação de condomínios e loteamentos tornaram os sistemas de drenagem convencional insuficientes para absorver os impactos gerados pela modificação do uso do solo, impulsionando a adoção de técnicas LID (*Low Impact Development*) como soluções complementares. Nesse contexto, o presente artigo aborda o dispositivo Bacia de Detenção, uma tecnologia LID capaz de amortecer o escoamento superficial decorrente da alteração de terrenos naturais, contribuindo para a prevenção de enchentes e outros impactos socioambientais.

Para o desenvolvimento do estudo, foi delimitada uma microbacia em estado natural, localizada na região urbana de Cuiabá-MT, sobre a qual foi simulada a modificação antrópica do uso e ocupação do solo. O comportamento hidráulico e hidrológico no exutório da microbacia foi então modelado sob três cenários distintos: estado natural, pós-urbanização sem medida compensatória e pós-urbanização com implantação de bacia de detenção. As simulações foram realizadas por meio do software SWMM (*Storm Water Management Model*), que permitiu analisar comparativamente o comportamento do escoamento em cada condição avaliada. Os resultados demonstraram a efetividade do amortecimento do hidrograma após a implantação da bacia de detenção dimensionada, confirmando que o uso de reservatórios de amortecimento constitui uma estratégia eficiente e necessária diante do atual cenário de desenvolvimento e expansão urbana.

Introdução

A modificação das áreas urbanas em detrimento da construção de condomínios e loteamentos, tem alterado as paisagens naturais, os ecossistemas e as microbacias locais. Essas modificações vêm negligenciando o meio ambiente e afetando diretamente o manejo de águas pluviais das áreas urbanas (Riguetto; Gomes; Freitas, 2017), interferindo também no regime fluvial dos cursos d'água das microbacias afetadas e alterando na dinâmica do balanço hídrico regional. Dessa forma, existe um aumento da implementação de práticas de desenvolvimento sustentável urbano com a gestão adequada das águas pluviais, sendo que tem por objetivo o crescimento integrado à qualidade de vida da população e a conservação ambiental, resultando em um convívio harmônico da cidade com as suas águas (Costa, *et al*., 2023; Ottoni; Rosin; Foloni, 2018).

A mudança no uso e ocupação dos solos interfere no volume do escoamento superficial diminuindo o tempo de concentração, ocasionando enchentes e alagamentos (Canholi, 2014). Por esses motivos, a implementação de tecnologias LID (*Low Impact Development)* que, diferentemente da drenagem convencional que tem como objetivo apenas escoar o volume precipitado da microdrenagem para a macrodrenagem sem nenhum outro tipo de ação, tentam mudar o cenário hidrológico local, tornando este similar ao estado natural, com estruturas que favorecem o processo de infiltração, diminuindo o escoamento superficial, as vazões de pico, e preservando o ciclo hidrológico (Luna, *et al.,* 2020; Canholi, 2014).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência de reservatórios de detenção em uma bacia urbana por meio de modelagem utilizando o software SWMM (*Storm Water Management Model*).

Matérias e Métodos

Cenários de Análise

No processo de análise, foram definidos os seguintes cenários de comparação:

I) Microbacia Pré Urbanização: Sem bacia de detenção;
II) Microbacia Pós Urbanização: Sem bacia de detenção;
III) Microbacia Pós Urbanização: Com bacia de detenção.

Área de Estudo

A área de estudo corresponde a uma microbacia de aproximadamente 15,03ha localizada na zona urbana de Cuiabá-MT, conforme pode ser observado na Figura 01. A bacia apresenta um canal principal com comprimento de 529,6 metros, com relevo relativamente plano, declividade média de 1,4% e desnível de 6,1 metros. A ocupação se resume a vegetação rasteira e a morfologia é caracterizada como não uniforme, com largura média de 316,30 metros.

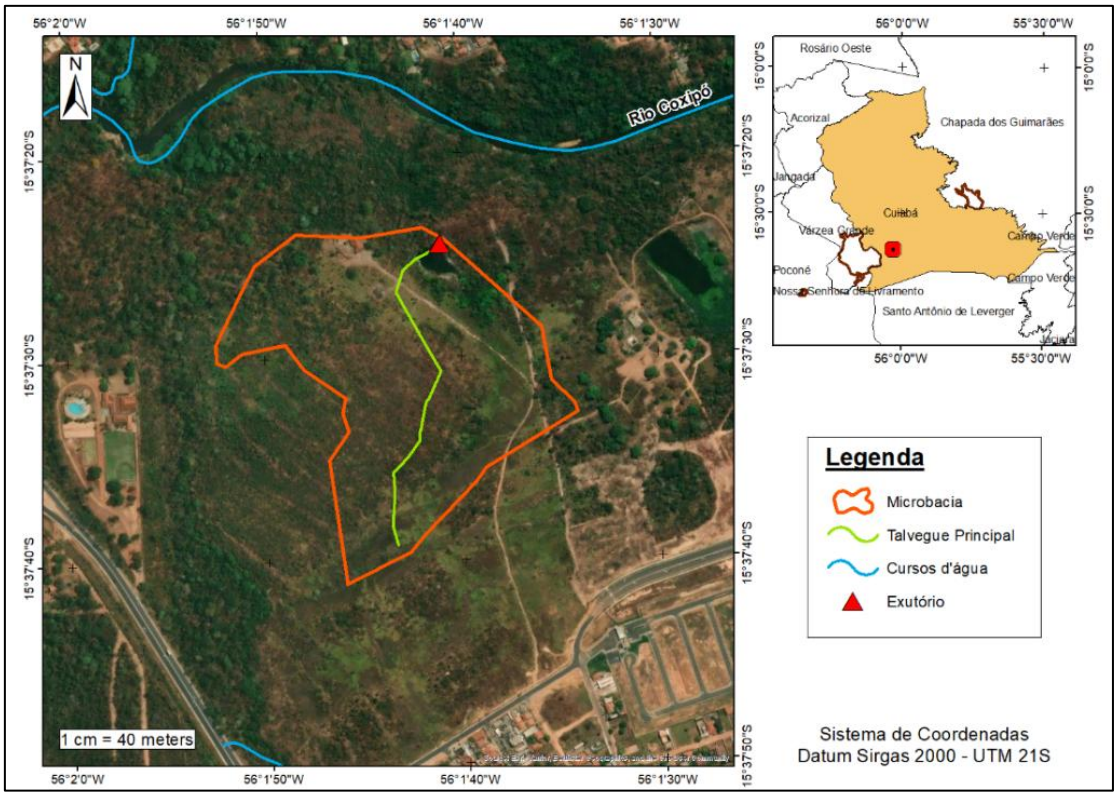


Figura 01: Mapa da microbacia do estudo.
Fonte: Autores (2026).

A bacia foi implementada no SWMM como um modelo concentrado, que considera uma única unidade de resposta hidrológica e seus parâmetros uniformemente distribuídos em toda a extensão. Para a definição do volume, utilizou-se a metodologia do método racional, implementada no SWMM. Desse modo, para o cenário de pós urbanização foram usados os seguintes parâmetros: área de 15,03 ha; largura média de 316,3; % da área superficial impermeável de 75% (considerando coeficiente de escoamento de 0,75). Os demais parâmetros foram zerados, tais como coeficiente de rugosidade para áreas impermeáveis, coeficiente de rugosidade para áreas permeáveis, perdas iniciais em áreas impermeáveis, perdas iniciais em áreas permeáveis, conforme recomendação do Manual do SWMM (Rossman e Huber, 2016). A imagem do modelo pode ser observada na Figura 02.

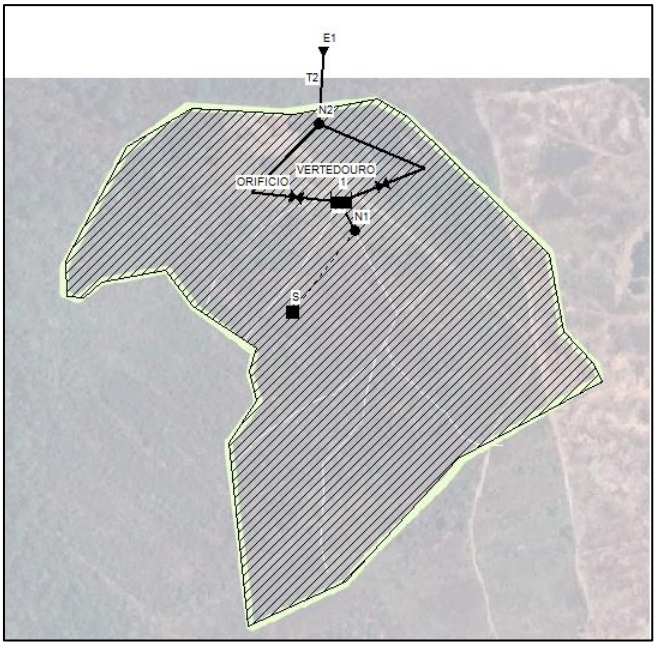


Figura 02: Configuração de montagem da microbacia no SWMM.
Fonte: Autores (2026).

Dados Hidrológicos

A chuva de projeto foi definida a partir da equação da curva de IDF do município de Cuiabá-MT, conforme Equação 01. (Leão, D. S. *et al*., 2025).

$$I = \frac{847{,}354 \times T^{0{,}101}}{(tc + 9{,}226)^{0.707}} \quad (1)$$

Onde: I é intensidade (mm/h), T o tempo de retorno (anos) e tc tempo de concentração (minutos).

O Tempo de retorno é significativo em qualquer estudo ou dimensionamento, e o seu valor indica qual a probabilidade de um evento extremo de chuva ocorrer naquele local, associado a segurança e durabilidade de uma obra de drenagem (DNIT, 2005). Nesse contexto, o tempo de retorno adotado foi de 10 anos.

Para determinação do tempo de concentração da bacia foram usados diferentes métodos de cálculos: Kirpich, Cater e *Corps of Engineers*. A partir dessas metodologias, se adotou um tempo de concentração médio, definido em 15 minutos, o que resulta em uma intensidade de 112,30mm/h. Para a distribuição da chuva se adotou o método de Huff. Ao multiplicar a intensidade pelo tempo de duração de chuva adotado de 2h se obteve um volume de precipitação total de 224,6 mm que foi distribuído utilizando o 2º Quartil do método Huff que é usado para chuvas menores de 12h de duração. A Figura 03 exibe o gráfico de volume de chuva distribuído no tempo.

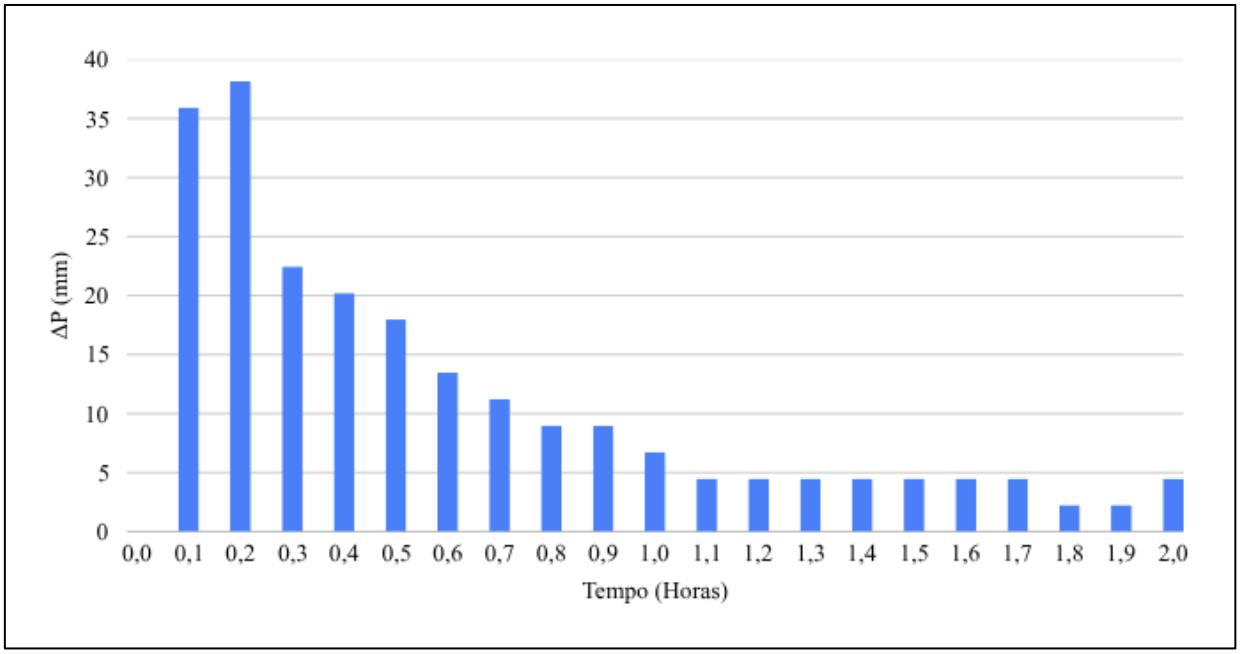


Figura 03: Hietograma utilizando método de distribuição de Huff.
Fonte: Autores (2026).

Bacia de Detenção

No processo de modelagem, o reservatório de detenção de cheias do modelo foi definido como um prisma retangular. Isso porque, ao definir a área de ocupação como um retângulo, é possível adicionar uma curva de armazenamento, que conforme se aumenta a lâmina d'água a área em planta continua a mesma, permitindo que o modelo calcule o volume de água através de uma equação linear. Para o pré-dimensionamento do reservatório foi analisado os volumes dos hidrogramas gerados nos cenários da microbacia pré e pós urbanização. Como o dispositivo de interesse tem o objetivo de amortecer o volume excedente escoado do cenário pós urbanização se definiu o volume mínimo do reservatório adotando a seguinte formula:

$$V_{\min} = V_1 - V_0 \quad (2)$$

Onde: V_{min} é volume mínimo do reservatório (m³); V_1 Volume escoado no cenário pós urbanização (m³); V_0 Volume escoado no cenário pré urbanização (m³).

A área dos hidrogramas apresentam os volumes escoados. Assim, a definição do volume inicial do reservatório foi feita a partir da diferença entre o volume escoado no cenário pós urbanização e o volume escoado no cenário pré urbanização, conforme Equação 02.

A Figura 04 mostra os hidrogramas resultantes para os cenários de pós-urbanização e pré-urbanização.

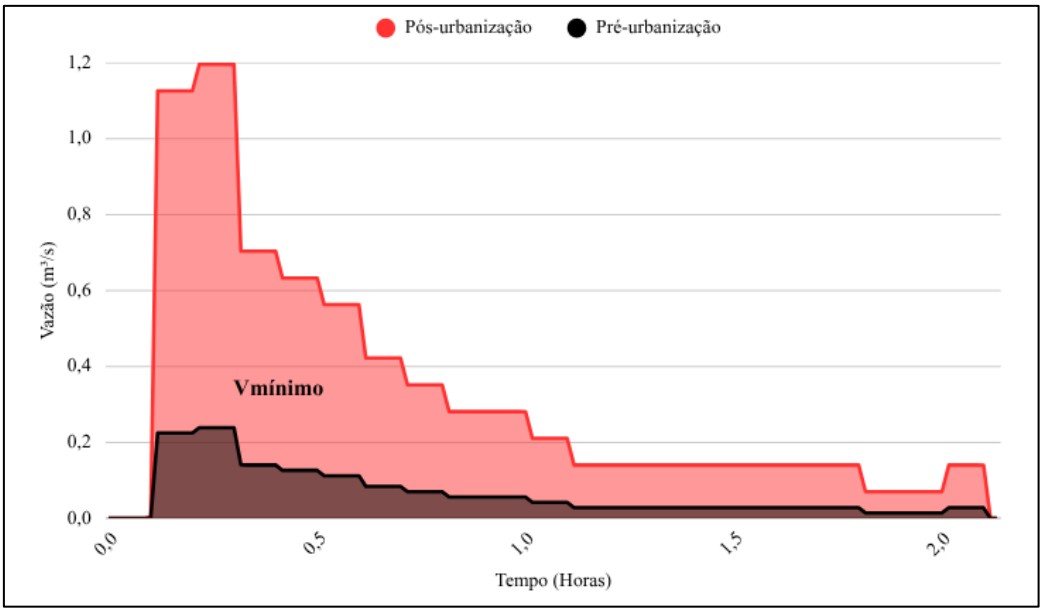


Figura 05: Áreas dos hidrogramas da microbacia.
Fonte: Autores (2026).

O volume de escoamento superficial na condição de pré urbanização foi de 506,5 m³, enquanto o volume para a condição de pós-urbanização aumentou para 2532,6m³. Essa diferença leva ao volume mínimo de 2026,12 m³.

Resultados

O reservatório de detenção de cheias foi dimensionado com área superficial de 1.600 m² e altura de 2 m, resultando em um volume total de 3.200 m³. O sistema conta ainda com uma descarga de fundo composta por orifício circular de 400 mm, posicionado a 0,2 m do fundo do reservatório, e um vertedouro retangular com altura de 0,3 m e largura de 1 m.

A modelagem no SWMM permitiu a geração dos hidrogramas da microbacia para os diferentes cenários analisados. No cenário pós-urbanização, observou-se um aumento expressivo na vazão de pico, que passou de 0,239 m³/s para 1,195 m³/s — um acréscimo de 0,956 m³/s —, reflexo direto da impermeabilização do solo decorrente da ocupação urbana. Com a implantação do reservatório de detenção, a vazão de pico foi reduzida para 0,252 m³/s, valor próximo ao do cenário pré-urbanizado, demonstrando a eficiência do dispositivo no amortecimento das cheias.

Além da redução das vazões de pico, o reservatório promoveu uma redistribuição temporal do escoamento: o mesmo volume que anteriormente era drenado em aproximadamente 2 horas passou a ser liberado ao longo de até 6 horas, reduzindo a sobrecarga no corpo hídrico receptor e contribuindo para a prevenção de inundações. Os resultados obtidos confirmam o reservatório de detenção como uma tecnologia eficaz no controle qualitativo e quantitativo do escoamento urbano, conforme ilustrado na Figura 05.

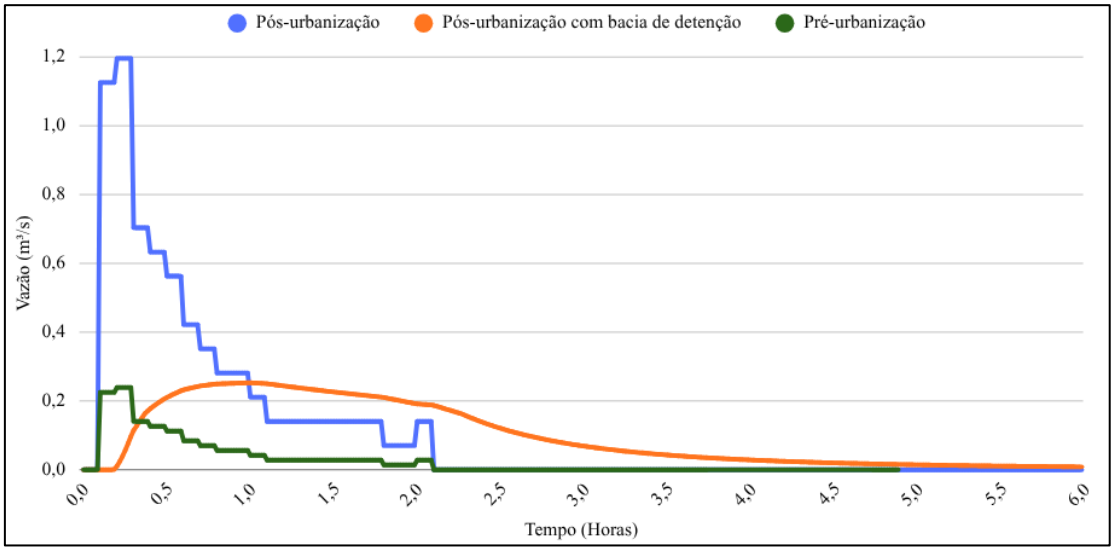


Figura 05: Hidrograma, comparativo de cenários.
Fonte: Autores (2026).

Considerações Finais

O crescimento urbano acelerado, com a implantação de condomínios e loteamentos nos centros das cidades, torna indispensável a adoção de medidas capazes de mitigar os impactos gerados por esses empreendimentos, tanto no âmbito local quanto na bacia hidrográfica em que estão inseridos. Nesse contexto, além dos sistemas de drenagem convencional, a implementação de tecnologias LID se mostra fundamental, dada a sua reconhecida eficiência na redução dos efeitos da impermeabilização do solo, conforme evidenciado pelos resultados apresentados.

Paralelamente às soluções técnicas, é imprescindível que haja respaldo legal por meio de leis e planos municipais que tornem obrigatória a adoção efetiva dessas tecnologias. No município de Cuiabá, avanços nessa direção já podem ser observados com a incorporação, na legislação local, da obrigatoriedade de execução de técnicas LID como pré-requisito para a aprovação de empreendimentos de grande porte, acompanhada da disponibilização de diretrizes técnicas para sua correta implementação.

Por meio da modelagem no SWMM, foi possível avaliar como a variação dos dados de entrada interfere significativamente nos resultados do modelo, possibilitando o dimensionamento de dispositivos que atendam de forma adequada à demanda hidrológica local. O reservatório de detenção projetado cumpriu plenamente seus objetivos, promovendo o amortecimento do hidrograma e uma distribuição mais uniforme do volume escoado até o corpo hídrico receptor. Com isso, evitou-se a elevação abrupta do nível fluviométrico do curso d'água de lançamento, prevenindo enchentes e minimizando os impactos socioambientais associados.

Referências Bibliográficas

COSTA, Jeferson da; GONÇALVES, Sérgio Antônio; ESPÍRITO SANTO, Adauto Santos do (org.). *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal*. 2. ed. Brasília, DF: Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal (ADASA), 2023.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem*. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. (Publicação IPR-715).

LEÃO, D. S.; PERSCH, C. G.; PEDROLLO, R. P. *et al*. *Chuvas intensas no estado de Mato Grosso*. Cuiabá: UFMT, 2025.

LUNA, C. R., *et al. Incorporação de técnicas LID (Low Impact Development) em edifícios*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

OTTONI, Adacto Benedicto; ROSIN, Jeane Ap. R. de Godoy; FOLONI, Fernanda Moço (org.). *Drenagem urbana:* soluções alternativas sustentáveis. 1. ed. Tupã: ANAP, 2018.

RIGHETTO, A. M.; GOMES, K. M.; FREITAS, F. R. S. Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. *Eng. Sanit. Ambient.*, v.22, n.6, p.1109-1120, 2017.

ROSSMAN, Lewis A.; HUBER, Wayne C. *Storm Water Management Model Reference Manual:* Volume I – Hydrology (Revised). Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2016.

ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR DAS TÉCNICAS ADOTADAS NO MANEJO DAS ÁGUAS PLUVIAIS

1 Paulo Gabriel dos Santos Furtado, 2 Maria Luisa Gomes Cavalcante, 3 Iane Silveira Melo, 4 Tássia dos Anjos Tenório de Melo

1 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: paulo.sfurtado@ufpe.br; 2 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: maria.luisac@ufpe.br; 4 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: ianesilveira058@gmail.com; 4 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: tassia.melo@ufpe.br

Palavras-chave: drenagem urbana sustentável; soluções baseadas na natureza; PRISMA.

Resumo

As mudanças climáticas são uma preocupação do mundo contemporâneo, aumentando a incidência de eventos, como chuvas intensas e secas prolongadas, agravando os problemas de alagamentos e inundações em áreas urbanas. A impermeabilização dos solos, consequência da expansão desordenada das cidades, sobrecarrega os sistemas tradicionais de drenagem, tornando-os insuficientes para controlar volumes e vazões de escoamento. Nesse contexto, a presente pesquisa traz uma revisão sistemática sobre o uso de técnicas de manejo das águas pluviais para prevenção e mitigação de alagamentos. A metodologia adotou o protocolo PRISMA, que orienta revisões sistemáticas por meio de etapas de identificação, seleção e inclusão de artigos. A base de dados utilizada foi a Science Direct, na qual o termo "Rainwater Management" resultou inicialmente em 722 artigos, filtrados até chegar a uma amostra de 51 trabalhos. Estes foram classificados em quatro eixos temáticos: planejamento e políticas públicas; percepção social; modelagem com softwares; e técnicas de manejo. Os resultados demonstraram que soluções baseadas na natureza, como telhados verdes, jardins de chuva, pavimentos permeáveis e o conceito de "cidade esponja", oferecem alternativas sustentáveis ao modelo tradicional de drenagem. A modelagem hidrológica e hidráulica, realizada com softwares como SWMM e GIS, mostrou-se essencial para prever riscos e dimensionar intervenções adequadas. Além disso, destacou-se a relevância da participação social no sucesso das medidas, assim como a integração de políticas públicas, financiamento e governança para viabilizar a implementação das soluções. Conclui-se que o manejo sustentável das águas pluviais deve ser abordado de forma integrada, unindo aspectos técnicos, sociais e políticos, para promover cidades mais resilientes às mudanças climáticas.

Introdução

Tem-se observado uma evolução dos fenômenos naturais com mais veemência, resultando em impactos negativos consequentes das mudanças climáticas. Eventos pluviométricos com maiores intensidades e cada vez mais frequentes, principalmente em áreas urbanas, retratando cenários de alagamentos e inundações; e, em contraposição, eventos de secas mais rigorosos e prolongados ou escassez de chuvas, os quais comprometem os níveis dos reservatórios que abastecem as áreas urbanas, são apontados como efeitos desfavoráveis das mudanças climáticas.

A impermeabilização em detrimento das áreas verdes proporcionam a sobrecarga dos sistemas tradicionais de drenagem urbana, quando não são capazes de absorver volumes e vazões para os quais não foram projetados. Esse aspectos não se restringem apenas aos elementos de microdrenagem (sarjetas, bocas de lobo, etc.), mas aos de macrodrenagem, como canais e os próprios corpos de rios e riachos, a partir do momento que a elevações de seus níveis atingem ou até superam cotas de inundação.

Segundo Vorobevskii et al. (2020), as mudanças climáticas e as alterações ambientais proporcionadas pela ação humana modificam as características hidrológicas e hidráulicas das bacias hidrográficas, resultando em processos de difícil monitoramento e de elevadas incertezas de ocorrência e intensidade. Para Lee et al. (2019), a crescente expansão das áreas impermeáveis nas bacias hidrográficas urbanas tem contribuído com a elevação contínua dos volumes e velocidades do escoamento, e com o aumento das ocorrências de eventos extremos como inundações.

Recife, capital do estado de Pernambuco, é uma cidade 100% urbanizada, e os impactos negativos dessa urbanização com ênfase na impermeabilização, e impulsionado pelas mudanças climáticas, podem ser sentidos diariamente pela população, como o aumento das temperaturas locais - ilhas de calor; aumentos das doenças respiratórias; e ocorrência de eventos de precipitação mais intensos e com maior frequência, proporcionando alagamentos.

Righetto et al. (2009) afirmam que o aumento do escoamento pode intensificar e antecipar os picos de vazões de cheias produzidas na escala da bacia hidrográfica ou localmente, porém podem ter suas áreas compensadas a partir de um adequado manejo das águas pluviais, através de medidas de controle dos deflúvios ou de pequenas estruturas de controle nas fontes geradoras.

Dessa forma, torna-se fundamental compreender os mecanismos de ocorrência de alagamentos e inundações, bem como identificar estratégias adequadas de manejo das águas pluviais, visando evitar ou minimizar seus impactos negativos, especialmente no contexto das mudanças climáticas. Nesse sentido, a presente pesquisa realizou uma revisão sistemática da literatura, com ênfase em periódicos científicos, sobre o uso de técnicas de manejo de águas pluviais voltadas à prevenção e mitigação de alagamentos, considerando seu caráter multidisciplinar.

Material e Métodos

Para a realização da revisão sistemática, adotou-se o fluxograma PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), no qual apresenta diretrizes para montagem de uma revisão sistemática (Figura 01).



Figura 01: Fluxo da metodologia adotada na presente pesquisa.
Fonte: Autoria própria (2025)

Como base de dados (01), selecionou-se a ScienceDirect, por se tratar de uma plataforma que reúne periódicos científicos revisados por pares, incluindo publicações de acesso aberto. No que se refere à estratégia de busca (02), adotou-se o termo "Rainwater Management" (manejo de águas pluviais), por sua relevância no contexto da drenagem urbana e por abranger diferentes técnicas e abordagens associadas ao tema. Na etapa de identificação (03), após a aplicação da estratégia de busca e dos filtros definidos (artigos de pesquisa; ano de publicação - 2023 a 2025; tipo de acesso aberto), procedeu-se ao registro dos artigos encontrados.

Na etapa de seleção dos artigos (04), realizou-se a triagem dos títulos e resumos dos estudos previamente identificados, com o objetivo de verificar sua aderência à temática da revisão e refinar o conjunto de publicações a serem analisadas. Em seguida, na fase de inclusão (05), foram considerados apenas os artigos que atenderam integralmente aos critérios estabelecidos, constituindo a amostra final da revisão. Nessa etapa, procedeu-se também à análise das palavras-chave de cada estudo, visando melhor compreensão de seus enfoques e contribuições.

Por fim, na etapa de divisão por eixos temáticos (06), os artigos selecionados foram organizados em categorias temáticas, a partir da identificação de conteúdos e abordagens convergentes, de modo a estruturar e subsidiar a realização da revisão sistemática, sendo: planejamento e políticas públicas, percepção social, modelagem (uso de softwares) e técnicas para manejo.

Resultados e Discussão

A Figura 02 evidencia o fluxograma adotado para a elaboração da revisão, mostrando os critérios de inclusão e exclusão adotados.

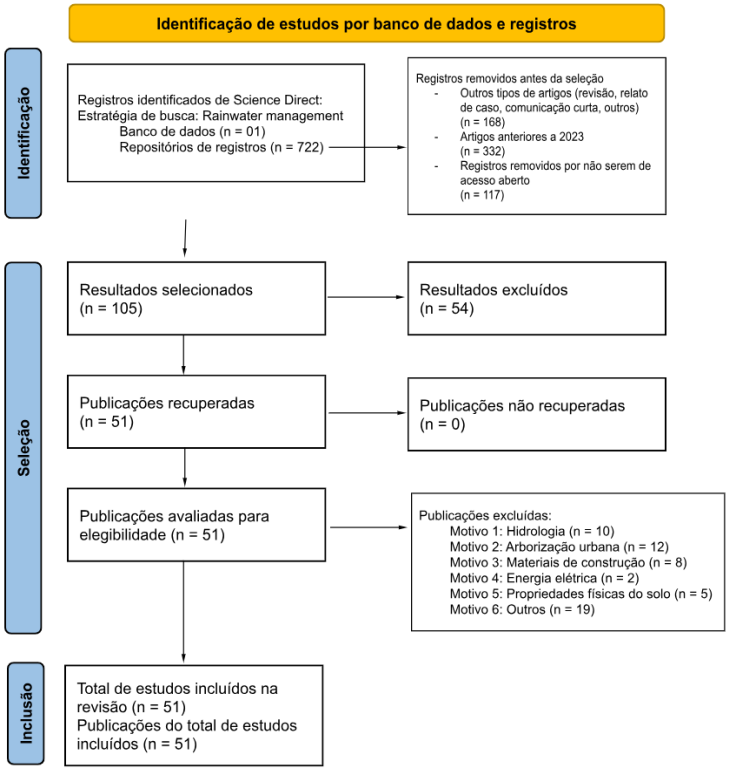


Figura 02: Diagrama de fluxo PRISMA 2020 adaptado para a elaboração da revisão sistemática.
Fonte: Autoria própria (2025)

A busca na base de dados Science Direct, utilizando o termo “Rainwater Management", resultou em 722 artigos. Após a aplicação dos filtros, reduziu para 51 artigos a serem selecionados. Após a etapa de identificação, os artigos foram à etapa de seleção, onde foram avaliados os títulos, resumos e palavras-chave, para verificar se o conteúdo se enquadra na revisão sistemática. Nesta etapa foram excluídos 51,4% dos artigos.

Dos artigos incluídos na revisão sistemática, foram analisadas as palavras-chave destacadas, conforme apresentado na Figura 03. Entre os termos mais recorrentes, destacam-se *rainwater* (água pluvial), *climate change* (mudanças climáticas), *green infrastructure* (infraestrutura verde) e *water reuse* (reuso de água), entre outros correlatos.



Figura 03: Nuvens de palavras-chave predominantes nos artigos analisados.
Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 04 apresenta a distribuição quantitativa dos artigos por eixo temático, evidenciando a predominância do eixo “Técnicas para manejo”. A frequência desses termos indica um elevado interesse na temática no âmbito da drenagem urbana, ressaltando a necessidade de aprofundar a compreensão dos processos de manejo das águas pluviais e de desenvolver soluções capazes de reduzir o escoamento superficial, bem como mitigar a ocorrência de alagamentos e inundações.

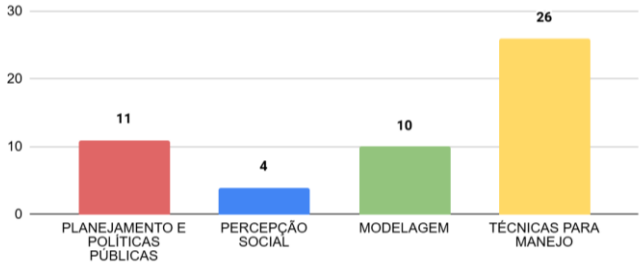


Figura 04: Quantitativo de artigos por eixo temático.
Fonte: Autoria própria (2025)

A análise detalhada de cada eixo temático permite identificar as principais problemáticas abordadas, as metodologias mais recorrentes e os resultados de maior relevância apresentados nos estudos.

O eixo temático de planejamento e políticas públicas reúne estudos voltados à gestão pública, com ênfase em abordagens participativas e socialmente orientadas, que buscam promover a concepção e a implementação de infraestruturas de drenagem urbana mais sustentáveis. Nesse contexto, destaca-se a incorporação de estratégias que ultrapassam o modelo convencional baseado na canalização das águas, com a adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) como alternativa para o manejo das águas pluviais.

A análise dos estudos evidenciou como principal problemática o aumento da frequência e intensidade das inundações, associado tanto às mudanças climáticas quanto ao processo de urbanização, o que tem contribuído para a sobrecarga dos sistemas tradicionais de drenagem. Além disso, foram identificadas barreiras de natureza técnica, social, política e econômica que dificultam a implementação de SbN (Castellar *et al*., 2024; Zhang et. al., 2024; Longato *et al*., 2024), bem como a escassez de índices e parâmetros que subsidiem avaliações integradas entre o manejo das águas pluviais e o desenvolvimento territorial (Kim, 2024). Soma-se a isso a limitação de financiamento, o baixo envolvimento dos setores público e privado e a reduzida participação social nos processos decisórios (Elhawy *et al*.; 2024; Vinagre *et al*., 2025). Também se destacam a desatualização ou insuficiência de políticas públicas voltadas à segurança hídrica e a fragilidade na integração entre gestão hídrica, planejamento urbano e governança, frequentemente ainda ancorados em soluções convencionais de caráter predominantemente cinza (Castelán-Cabañas *et a*l, 2024; Zhang *et al.*, 2024; Parween & Sinha, 2024).

Em relação às metodologias adotadas nos estudos, observou-se a utilização de modelagem hidrodinâmica aplicada a Soluções Baseadas na Natureza como ferramenta de apoio ao planejamento urbano (Roggero *et al*., 2024; Zhu, 2024), bem como a aplicação de análises do tipo SWOT para identificação de forças, fraquezas, oportunidades e ameaças (Elhawy *et al*.; 2024; Vinagre *et al.*, 2025). Adicionalmente, foram empregados indicadores sociais (Castelán-Cabañas *et al*, 2024; Parween & Sinha, 2024), estudos espaciais baseados em mapeamentos que evidenciam vulnerabilidades temporais e territoriais (Vinagre *et al*., 2025), e revisões sistemáticas da literatura voltadas à temática do manejo de águas pluviais (Zhang *et al.*, 2024; Parween & Sinha, 2024).

Quanto aos principais resultados, os estudos indicaram que políticas baseadas exclusivamente em incentivos voluntários são insuficientes para garantir a efetiva participação social nos processos de planejamento e gestão das águas pluviais (Roggero *et al*., 2024; Longato *et al*., 2024). Evidenciou-se, ainda, que ações integradas envolvendo governança, políticas públicas, comunicação e educação são tão relevantes quanto as soluções de natureza técnica (Castellar *et al.*, 2024; Elhawy *et al.*; 2024; Castelán-Cabañas *et al,* 2024). Por fim, destaca-se a necessidade de desenvolver estratégias capazes de atrair investimentos e ampliar a participação do setor privado, por meio de modelos financeiros inovadores, parcerias público-privadas e fortalecimento institucional, como forma de viabilizar a implementação de ações mais eficazes no manejo das águas pluviais (Vinagre *et al*., 2025; Zhang *et al*., 2024).

O eixo de percepção social estabelece diálogo direto com o eixo de planejamento e políticas públicas, sobretudo no contexto das mudanças de paradigma na gestão e no planejamento territorial, que passam a reconhecer o espaço urbano como uma construção coletiva, na qual a atuação social assume papel estratégico. Nesse sentido, além da atuação do poder público, a perspectiva dos usuários dos espaços urbanos torna-se fundamental para que o manejo das águas pluviais atenda de forma efetiva às demandas dos diferentes agentes sociais. Assim, este eixo reúne estudos que evidenciam a importância da conscientização social sobre a drenagem urbana, bem como destacam a relevância de programas de educação ambiental e da participação popular nos processos de tomada de decisão relacionados às transformações e ao planejamento urbano.

Os trabalhos apontaram como principais problemáticas a baixa conscientização social acerca do manejo das águas pluviais, a ausência de diretrizes técnicas consolidadas, lacunas regulatórias e a insuficiência de incentivos para a adoção de soluções sustentáveis (Huq *et al.,* 2024). Observa-se, ainda, uma abordagem fragmentada dos riscos hídricos urbanos, que, em muitos casos, não integra de forma articulada as dimensões sociais, ecológicas e tecnológicas (Khromova *et al.*, 2025). Destacou-se também a vulnerabilidade de comunidades de baixa renda, que tendem a ser desproporcionalmente impactadas pelos riscos associados às águas pluviais (Khromova *et al.*, 2025; Wu *et al.*, 2025).

No que se refere às metodologias, os estudos analisados adotaram, predominantemente, questionários estruturados para a coleta de dados sociais (Huq *et al.,* 2024), bem como ferramentas de geoprocessamento, como o QGIS, utilizadas para a análise espacial e a correlação entre variáveis sociais, ecológicas e tecnológicas (Khromova *et al.*, 2025). Em alguns casos, essas abordagens foram complementadas por modelos hidráulicos e hidrológicos, permitindo uma análise mais integrada dos fenômenos (Wu *et al.*, 2025; Viti *et al.,* 2023).

Os resultados dos estudos analisados no eixo de percepção social destacaram que, embora a população demonstre algum nível de conhecimento sobre estratégias de manejo das águas pluviais, ainda persistem barreiras significativas à sua implementação, tais como a ausência de programas de educação e conscientização, a limitada disponibilidade de informações técnicas e os elevados custos de implantação e manutenção (Huq *et al.,* 2024). Os estudos também indicaram que a redução dos riscos associados a eventos de precipitação intensa está diretamente relacionada à diminuição das desigualdades sociais, à modernização dos sistemas de drenagem urbana e ao investimento em infraestrutura verde (Khromova *et al.*, 2025). Além disso, destacou-se a importância da integração entre sistemas tradicionais de drenagem e soluções baseadas na natureza, bem como a necessidade de ampliar a participação da população na formulação e implementação de políticas urbanas voltadas à adaptação às mudanças climáticas (Wu *et al.*, 2025; Viti *et al.,* 2023).

Para a adequada aplicação das técnicas de manejo de águas pluviais, o uso de ferramentas computacionais e softwares de modelagem é essencial, a fim de possibilitar a representação e análise dos sistemas de macrodrenagem, subsidiando o planejamento e a implementação de intervenções em microdrenagem urbana. Assim, o eixo de modelagem (uso de softwares) contempla trabalhos que que empregam modelos hidrológicos e hidráulicos, com destaque para ferramentas como o SWMM (Storm Water Management Model), voltadas à simulação, avaliação e apoio à tomada de decisão no manejo das águas pluviais.

Os trabalhos analisados evidenciaram importantes lacunas e desafios, destacando a ausência de modelos integrados capazes de avaliar, de forma conjunta, os efeitos hidrológicos, a qualidade da água e os benefícios ambientais, sociais e econômicos associados à infraestrutura verde em escala urbana (Wang *et al.,* 2024a; Biancardo *et al.*; 2025; Hua & Gu, 2025). Foi verificado também que, ainda são limitados os estudos que realizam avaliações quantitativas e multiescala dos efeitos combinados de diferentes técnicas de manejo das águas pluviais na gestão de enchentes e na melhoria da qualidade da água (Wang *et al.,* 2024b; Pochodyła-Ducka *et al.,* 2025; Zhang, 2025). Outra lacuna relevante estava relacionada à compreensão insuficiente de como fatores relacionados à infraestrutura urbana e ao adensamento, como características construtivas, presença de superfícies impermeáveis e altura das edificações, influenciam direta ou indiretamente a ocorrência de enchentes (Piazza & Ursino, 2023; Zhang, 2025). Soma-se a isso a necessidade de identificar áreas prioritárias para a implementação dessas técnicas, considerando dinâmicas espaciais e mudanças de curto prazo no território (Funke *et al.*, 2025).

Como estratégias metodológicas, os estudos adotaram, predominantemente modelos hidráulicos, como o SWMM (Wang *et al.,* 2024a; Wang *et al.,* 2024b; Pochodyła-Ducka *et al.,* 2025; Hua & Gu, 2025), bem como modelos específicos para análise de infiltração, a exemplo do Hydrus-1D (Wang *et al.,* 2024a). Também se destaca o uso de ferramentas de geoprocessamento (GIS) para análise espacial (Sehrawat & Shekhar, 2025; Funke *et al.*, 2025); da aplicação de tecnologias como o BIM (Building Information Modeling) para modelagem da informação da construção (Sehrawat & Shekhar, 2025); e o uso de plataformas de programação, como Python e Matlab, para o desenvolvimento de simulações e análises mais complexas (Funke *et al.*, 2025; Son *et al.*, 2023).

Os resultados dos trabalhos destacaram que a adoção combinada de múltiplas técnicas de manejo das águas pluviais, em escala, apresenta maior efetividade quando comparada à aplicação isolada de soluções (Wang *et al.,* 2024b). Constatou-se, ainda, que o uso de ferramentas digitais é fundamental para compreender o comportamento das águas pluviais em ambientes urbanos, contribuindo para a promoção da resiliência, da sustentabilidade e da segurança, especialmente frente aos desafios impostos pelas

mudanças climáticas (Sehrawat & Shekhar, 2025; Hua & Gu, 2025; Zhang, 2025). Os modelos computacionais também se mostram essenciais na identificação de áreas com maior risco de enchentes e na avaliação do desempenho das técnicas adotadas, inclusive em cenários de falha (Piazza & Ursino, 2023; Funke *et al.*, 2025; Son *et al.*, 2023).

Os trabalhos selecionados no eixo sobre técnicas de manejos abordaram diferentes sistemas voltadas ao manejo sustentável das águas pluviais, buscando integrar funcionalidade, qualidade estética e benefícios ambientais no contexto urbano. Sistemas como telhados verdes foram intensamente destacados, com ênfase na sua contribuição para a redução do escoamento superficial e benefícios para o conforto térmico; e os jardins de chuva, os quais favorecem a infiltração da água no solo, promovendo a filtragem de poluentes e a recarga de aquíferos. Os estudos levantam a discussão sobre o conceito de cidade esponja, como uma infraestrutura urbana planejada para absorver, armazenar e reutilizar a água da chuva. Tais abordagens apresentaram alternativas inovadoras às soluções convencionais baseadas na canalização rígida, ao mesmo tempo em que contribuem para o controle de alagamentos, a melhoria da qualidade ambiental, o aumento da biodiversidade e a promoção do bem-estar social.

Foram levantadas como principais problemáticas a forma como as mudanças climáticas intensificam a escassez hídrica, a qual, associada ao crescimento populacional e à urbanização, impõe limitações significativas aos sistemas de abastecimento urbano (Szabó *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2025; Duan *et al.*, 2025; Sommese *et al.,* 2025). Paralelamente, o desenvolvimento urbano acelerado tem ampliado a impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração das águas pluviais e aumentando o escoamento superficial, além de contribuir para a intensificação das ilhas de calor e alterações nos padrões de precipitação (Maglia *et al.*, 2025; El Bouzidi *et al.*, 2024; Apostolaki *et al.*, 2025; Jebamalar *et al.*, 2023; He, 2025; An *et al.,* 2024). Foi apontado também como problemática a carência de infraestrutura verde capaz de responder de forma integrada a esses desafios, bem como a insuficiência de estudos e diretrizes técnicas que orientem sua implementação em articulação com os sistemas tradicionais de drenagem (Burszta-Adamiak *et al.*, 2023; Farina *et al.*, 2024; Fei *et al.*, 2023; La Torre Rapp *et al.*, 2024; Sommese *et al.,* 2025).

Em termos metodológicos, observou-se a adoção de abordagens diversificadas e complementares. Destacaram-se o monitoramento *in loco* e a coleta de dados experimentais de variáveis físicas, químicas e biológicas, incluindo medições de níveis d'água, taxas de infiltração, qualidade da água e indicadores de biodiversidade (Burszta-Adamiak *et al.*, 2023; Sommese *et al.,* 2025; Ramm & Sielska, 2023; Szoldrowska *et al.*, 2025; Torello *et al.,* 2024; Muttuvelu *et al.*, 2024;). Também são amplamente utilizados métodos de geoprocessamento, simulação e modelagem por meio de softwares como EPA-SWMM, além do uso de bases de dados espaciais, aplicação de técnicas de análise de dados e aprendizado de máquina, algoritmos de otimização e análises cartográficas para caracterização territorial (El Bouzidi *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*, 2025; Burszta-Adamiak *et al.*, 2025; He, 2025; Farina *et al.*, 2024; Ali *et al.*, 2024; Rodrigues *et al.*, 2023).

Quanto aos principais resultados, destaca-se que a adoção dessas técnicas contribui significativamente para a redução do escoamento superficial e dos picos de vazão, com impactos positivos no controle de enchentes e na gestão das águas pluviais (El Bouzidi *et al.*, 2024; He, 2025; Sommese *et al.,* 2025; Rodrigues *et al.*, 2023). Outros aspectos positivos também foram observados como o aumento da infiltração e da recarga de aquíferos, bem como o potencial de reuso das águas pluviais em diferentes aplicações, aliado à melhoria de sua qualidade por meio da remoção de poluentes, nutrientes e sólidos suspensos (Burszta-Adamiak *et al.*, 2023; Szabó *et al.*, 2023; Apostolaki *et al.*, 2025; Jebamalar *et al.*, 2023; Fei *et al.*, 2023, Landu *et al.*, 2024). Além disso, destacaram-se benefícios relacionados à regulação térmica urbana, especialmente por meio de superfícies vegetadas, como telhados verdes e sistemas integrados *blue-green*, que contribuem para a redução das temperaturas, o conforto térmico e a eficiência energética. Tais soluções também promovem serviços ecossistêmicos adicionais, incluindo o incremento da biodiversidade, a valorização paisagística, a oferta de espaços de lazer, benefícios à saúde mental e o sequestro de carbono, reforçando seu papel estratégico na construção de cidades mais resilientes e sustentáveis (Apostolaki *et al.*, 2025; Striegel *et al.*, 2025; Pérez Cambra *et al*., 2025; Sommese *et al.,* 2025).

Considerações Finais

A presente pesquisa permitiu compreender a importância do manejo sustentável das águas pluviais diante dos desafios impostos pela urbanização acelerada e pelas mudanças climáticas. A revisão sistemática mostrou que os sistemas tradicionais de drenagem urbana, baseados em soluções de canalização rígida, são insuficientes para lidar com o aumento da impermeabilização do solo e com os volumes de escoamento superficial cada vez mais elevados. Essa constatação reforça a necessidade de incorporar soluções contemporâneas, alinhadas à infraestrutura verde e às soluções baseadas na natureza.

A análise dos artigos selecionados destacou a relevância de práticas arquitetônicas, urbanísticas e paisagísticas, como telhados verdes, jardins de chuva, pavimentos permeáveis e o conceito de cidade esponja, como estratégias eficazes para mitigar alagamentos, reduzir picos de vazão e promover benefícios ambientais adicionais. Além disso, verificou-se que essas técnicas, quando aplicadas de maneira integrada, apresentam resultados mais consistentes do que a aplicação isolada de soluções pontuais, confirmando a necessidade de uma abordagem sistêmica e multidisciplinar.

Outro ponto de destaque foi a contribuição da modelagem computacional, por meio de softwares como SWMM, GIS e BIM, para o planejamento urbano e o dimensionamento de obras de drenagem. Isso mostra que tais recursos tecnológicos são fundamentais para simular cenários de risco, avaliar alternativas de intervenção e subsidiar a tomada de decisão por parte de gestores e técnicos. Paralelamente, a percepção social e a participação comunitária surgiram como elementos centrais para o sucesso das medidas, revelando que o engajamento da população amplia a eficácia das soluções implementadas e fortalece a corresponsabilidade pela gestão das águas urbanas.

Por fim, os resultados evidenciaram que a adoção de políticas públicas integradas, acompanhadas de financiamento adequado e governança colaborativa, é condição indispensável para a consolidação de estratégias de manejo pluvial. A pesquisa, portanto, conclui

que a construção de cidades resilientes e sustentáveis depende da articulação entre técnicas inovadoras, participação social e marcos institucionais robustos, para haver avanço e busca por soluções mais eficazes frente aos impactos das mudanças climáticas.

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.

Referências Bibliográficas

ALI, Shahbaz; SANG, Yan-Fang; YANG, Moyuan; SHI, Jiali; ZHANG, Shouhong. Regionalization of environmental and economic performances of rainwater harvesting systems. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 53, 2024.

AN, Y. et al. Study on the pore blocking characteristics and cleaning methods of permeable asphalt mixtures based on accelerated clogging simulation experiments. Case Studies in Construction Materials, v. 21, 2024.

APOSTOLAKI, S. Nature-based solutions: From flood defense to addressing water security, reducing risks of climate change and of water scarcity and providing new options. Elsevier, 2025.

BEWKET, Woldeamlak; TIBEBE, Degefie; TEFERI, Ermias; DEGEFU, Mekonnen Adnew. Changes in mean and extreme rainfall indices over a problemscape in central Ethiopia. Environmental Challenges, v. 15, 2024.

BIANCARDO, S. A. INTIGNANO, M.; ABBONDATI, F.; DI FONZO, F.; GUALTIERI, C.; DELL'ACQUA, G. Rainwater drainage systems solutions for safer transport infrastructures. Transportation Research Procedia, v. 90, p. 304–311, 2025.

BURSZTA-ADAMIAK, E.; BINIAK-PIEROG, M.; DABEK, P.; STERNIK, A. Rain garden hydrological performance – Responses to real rainfall events. Science of the Total Environment, v. 887, art. 164153, 2023.

BURSZTA-ADAMIAK, E.; STANCZYK, J.; KAJEWSKA-SZKUDLAREK, J. Developing a new outdoor household water use index to identify rainwater harvesting potential. Journal of Cleaner Production, ahead of print, 2025.

CASTELÁN-CABAÑAS, R.; PADILLA-RIVERA, A.; MUNOZ-VILARREAL, C.; GUERECA-HERNANDEZ, L. P. Advancing urban water autonomy: A Social Life Cycle Assessment of rainwater harvesting systems in Mexico City. Cleaner Environmental Systems, v. 13, n. 4, 2024.

CASTELLAR, J. A. C.; POPARTAN, L. A.; PUCHER, B.; PINEDA-MARTOS, R.; HECHT, K.; KATSOU, E.; NIKA, C. E.; JUNGE, R.; LANGERGRABER, G.; ATANASOVA, N.; COMAS, J.; MONCLÚS, H.; PUEYO-ROS, J.. What does it take to renature cities? An expert-based analysis of barriers and strategies for the implementation of nature-based solutions. Journal of Environmental Management, v. 354, 2024.

DUAN, Yutong; XI, Hongbo; QIN, Zhikai; GUO, Ruili; WANG, Fang; YUAN, Yue. Water quality characteristics of municipal wastewater treatment plants and the prospect of reclaimed water utilization in lower-middle income and water-scarce areas: A case study of Puyang. Water Cycle, v. 6, p. 61-70, 2025.

EL BOUZIDI, A.; ANOUAR, A.; BOUZZIRI, M. Management and valuation of rainwater by alternative … [Título completo para confirmar]. Science of the Total Environment, 2024.

ELHAWY, H. A.; KHODEIR, L. M.; KHALED, A. Guideline towards sustainable infrastructure in new urban cities: Monitoring residents' perceptions and environmental impacts. Results in Engineering, v. 24, 2024.

FARINA, G.; NEVERRE, N.; HÉRIVAUX, C.; BARRIERE, J.; PINSON, S.; HABAROU, H.; PEREAU, J.-C.; LE COËNT, P. How to account for spatial trade-offs in planning for urban climate adaptation? Optimizing green and grey infrastructures. Journal of Environmental Management, v. 372, 2024.

FEI, Y.; RENE, E. R.; SHANG, Q.; SINGH, R. P. Comprehensive effect evaluation of LID facilities implemented in sponge campuses: A case study. Ecological Indicators, v. 155, 2023.

FUNKE, Fabian; REINSTALLER, Stefan; KLEIDORFER, Manfred. Impact of urban drainage system malfunctions on pluvial flooding – Peri-urban study site in Austria. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 54, p. 101550, 2025.

HE, Q. Ecological optimal layout method of rainwater garden in sponge city. Sustainable Cities and Society, v. 100, 2023.

HUA, Xiande; GU, Fenfei. Urban rainwater resource utilization: a sustainable environmental impact assessment using life cycle assessment (LCA) and water balance model. Sustainable Cities and Society, v. 122, p. 105095, 2025.

HUQ, Md. Habibul; RAHMAN, Md. Mafizur; HASAN, G.M. Jahid. Social perception on rainwater harvesting and wastewater reuse: Opportunities and challenges of a fast-growing township in Dhaka. Cleaner and Responsible Consumption, v. 12, p. 100168, 2024.

JEBAMALAR, A.; SUDHARSANAN, R.; RAVIKUMAR, G.; SASIKUMAR, M. Assessing the effectiveness of rainwater harvesting structures in an urban environment. Desalination and Water Treatment, v. 316, p. 224-236, 2023.

KIM, T.I. Definition and use of the water cycle area ratio. Cited by Sustainable Cities and Society, 2024.
KHROMOVA, S. et al A social-ecological-technological vulnerability approach for assessing urban hydrological risks. Ecological Indicators, v. 173, p. 113334, 2025.

LA TORRE RAPP, Viktor; KNUTSSON, Jesper; WALLIN, Jörgen. Stakeholder-driven development of a decision support framework targeting sustainable water supply systems. Energy Reports, v. 12, p. 2306-2320, 2024.

LANDU, E. L.; MAWE, G. I.; IMWANGANA, F. M.; BIELDERS, C.; DEWITTE, O.; POESEN, J.; HUBERT-FERRARI, A.; VANMAERCKE, M. The potential of runoff retention structures as a strategy to control urban gullying in tropical cities. International Soil and Water Conservation Research, v. 13, n. 2, p. 217-234, 2025.

LEE, E. H.; CHOI, Y. H.; KIM, J. H. 2019. *Real-time integrated operation for urban streams with centralized and decentralized reservoirs to improve system resilience.* Water, v. 11.

LONGATO, D.; CORTINOVIS, C.; BALZAN, M.; GENELETTI, D. Identifying suitable policy instruments to promote nature-based solutions in urban plans. Cities, v. 154, 2024.

MAGLIA, N.; RAIMONDI, A. A new approach on design and verification of integrated sustainable urban drainage systems for stormwater management in urban areas. Journal of Environmental Management, ahead of print, 2025.

MUTTUVELU, Dansani Vasanthan; WYKE, Simon; VOLLERTSEN, Jes. Measuring infiltration rates in permeable asphalt pavement in urban landscapes. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 28, n. 11, p. 5255-5265, 2024.

PARWEEN, S.; SINHA, R. C. An Analytical Hierarchy Process Approach for Prioritization of Objectives and Parameters for an Integrated Urban Water Management. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 28, n. 4, p. 1566–1579, 2024.

PÉREZ CAMBRA, María del Mar; MARTÍNEZ SANTAFÉ, Maria Dolors; ROCA CLADERA, Josep. Exploring the mitigation of compound events in Barcelona: Urban water scarcity, flood risk and reduction of surface temperatures through water-sensitive urban design. Urban Climate, v. 59, 2025.

PIAZZA, Paola; URSINO, Nadia. On the need to go beyond bucket modelling to evaluate NBS risk of failure under urban constraints. Journal of Hydrology, v. 622, p. 129704, 2023.

POCHODYŁA-DUCKA, E. BURANDT, P.; GLIŃSKA-LEWCZUK, K. GIS-based framework for assessing priority locations for blue-green infrastructure implementation in urban areas. Ecological Indicators, v. 165, p. 112279, 2025.

RAMM, Klara; SIELSKA, Małgorzata. The use of reclaimed water in the local urban cycle – a case study. Desalination and Water Treatment, v. 305, p. 52-59, 2023.

RAMÍSIO, P. J.; BRITO, R. S.; BECEIRO, P. P. 2022. *Accessing Synergies and Opportunities between Nature-Based Solutions and Urban Drainage Systems*. Sustainability, v. 14.

RIBEIRO, J. M.; CRISTO DIAS, D. F..; NIKA, E.; DELPECH, B.; KATSOU, E.; JOUHARA, H. Circularity assessment of industrial heat exchanger and economiser integration with water treatment in a ceramic industry. Journal of Cleaner Production, v. 420, p. 139070, 2025.

RIGHETTO, A. M. (coord.). 2009. Manejo de águas pluviais urbanas. ABES, Rio de Janeiro.

RODRIGUES, Bruno Noronha; MOLINA JUNIOR, Vitor Eduardo; CANTERAS, Felippe Benavente. Green Infrastructure as a solution to mitigate the effects of climate change in a coastal area of social vulnerability in Fortaleza (Brazil). Environmental Advances, v. 13, 2023.

ROGGERO, Matteo; BRILL, Fabio; TÜGEL, F. Providers of decentralized blue-green flood adaptation measures protect others, not themselves, even in flat urban terrain. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 128, 2025.

SEHRAWAT, Simran; SHEKHAR, Sulochana. Integrating low impact development practices with GIS and SWMM for enhanced urban drainage and flood mitigation: a case study of Gurugram, India. Urban Governance, v. 5, p. 240–255, 2025.

SOMMESE, Francesco; DIANA, Lorenzo. A holistic framework for the implementation of green roofs in urban areas. Building and Environment, v. 220, 2025.

SON, Cheol Hee; LEE, Chang Hwan; BAN, Yong Un. Analysis of the impact and moderating effect of high-density development on urban flooding. Heliyon, v. 9, e22695, 2023.

STRIEGEL, L.; BOUVENOT, J.-B.; WALTHER, E.; NOWAMOOZ, H. Experimental study of a geothermal rainwater tank concept. Energy and Buildings, v. 343, 2025.

SZABÓ, Z.; PEDRETTI, D.; MASETTI, M.; RIDAVITS, T.; CSISZÁR, E.; FALUS, G.; PALCSU, L.; MÁDL-SZŐNYI, J. Rooftop rainwater harvesting by a shallow well infiltration. Current Research in Environmental Sustainability, v. 5, p. 100064, 2023.

SZOLDROWSKA, Dominika; WLÓKA, Dariusz; SMOL, Marzena. Circular economy of water: Rainwater harvesting (RWH) and reuse solutions. Desalination and Water Treatment, v. 323, 2025.

TORELLO, M. E.; DHAKAL, N.; JANSEN, A.; VAN GROENESTIJN, J.; CUADRADO-QUESADA, G.; SAWALA, N.; MAGANA, M.; EKOWATI, Y.; BUIJTENHEK, H.; KENNEDY, M. D. From drops to drums: Assessing rainwater storage's quality and quantity for addressing water demands in dry periods – A case study from Arusha, Tanzania. Desalination and Water Treatment, v. 320, 2024.

VINAGRE, V.; FIDÉLIS, T.; LUÍS, A. Enhancing collaboration between water management and spatial planning agencies. Science of the Total Environment, 2025.

VITI, M.; RUGANI, B.; MAZZANTI, M.; NICOLAU, R.; GENELETTI, D. Holistic valuation of Nature-Based Solutions accounting for human perceptions and nature benefits. Journal of Environmental Management, v. 334, 2023.

VOROBEVSKII, I.; AL JANABI, F.; SCHNEEBECK, F.; BELLERA, J.; KREBS, P. 2020. *Urban Floods: Linking the Overloading of a Storm Water Sewer System to Precipitation Parameters.* Hydrology, v. 7, n. 35, p.1-23.
WANG, Qianwen; ZHAO, Runze; WANG, Ning. Spatially non-stationarity relationships between high-density built environment and waterlogging disaster: insights from Xiamen Island, China. Ecological Indicators, v. 162, p. 112021, 2024a.

WANG, Yixuan; WANG, Jiayu; CHEN, Tian. Multi-scenario analysis of rooftop greening regulation on runoff effects based on adaptive evaluation: a case study of Macau, China. Ecological Indicators, v. 163, p. 111856, 2024b.

WU, Jiahong; YANG, Pan; YI, Ke; ZHOU, Yuliang; TAN, Qian. Residents' heterogeneous willingness to adopt green roofs in a southern Chinese city revealed via interpretable machine learning. Ecological Indicators, v. 171, 2025.

ZHANG, B.; LI, Y.; WANG, J.; CHEN, X.; LIU, H. Optimizing eco-efficiency of green infrastructure: a comparative study of woody plant species utilizing SWMM-HYDRUS model and Analytic Hierarchy Process. Ecological Indicators, v. 165, p. 112312, 2025.

ZHANG, X.; KANG, A.; SONG, Q.; GUO, Y.; LIU, Y.; LEI, X.; WANG, H. . Characteristics and risk management of urban surface flooding in Guangzhou, China: Insights from 2022 ground monitoring. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 53, 2024.

ZHU, Lin. Rainwater runoff regulation effect in sponge reconstruction area based on rainstorm flood management model. Desalination and Water Treatment, v. 319, 2024.

RIOS URBANOS SOB PRESSÃO: TENDÊNCIAS E DESAFIOS CIENTÍFICOS EM UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

1 Heloisa Bortot, 2 Vilmar Steffens, 3 Thalita Grando Rauen

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão, e-mail: heloisabortot@gmail.com; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão, e-mail: vilmars@utfpr.edu.br; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão Instituição do Autor, e-mail: tgrauen@utfpr.edu.br

Palavras-chave: revitalização, drenagem urbana; gestão de águas.

Resumo

A urbanização acelerada tem provocado profundas transformações nos sistemas hidrológicos naturais, especialmente em bacias hidrográficas urbanas onde a impermeabilização do solo e a ocupação das margens fluviais intensificam problemas como enchentes, degradação ambiental e perda de qualidade dos espaços públicos associados aos rios. Nesse contexto, cresce o interesse científico por estratégias de revitalização de rios urbanos associadas a soluções de drenagem sustentável e planejamento urbano integrado. O presente estudo tem como objetivo analisar a evolução da produção científica internacional relacionada aos rios urbanos por meio de uma análise bibliométrica da literatura internacional. A base de dados foi construída a partir de buscas realizadas no Portal de Periódicos CAPES utilizando diferentes combinações do termo "urban rivers" associado aos termos "urban drainage", "urbanism" e "revitalization". Foram analisados 2.946 artigos científicos publicados entre 1963 e 2025. Os resultados indicam crescimento significativo das publicações a partir da década de 2010, com pico em 2023. Os periódicos com maior número de publicações incluem Ecological Indicators, Science of the Total Environment e Journal of Hydrology. A análise dos resultados evidencia a predominância de estudos relacionados à hidrologia urbana, gestão de drenagem e restauração ecológica de rios. Observou-se também o crescimento recente de pesquisas voltadas à integração entre infraestrutura, planejamento urbano e revitalização de rios urbanos. Os resultados contribuem para a compreensão das tendências de pesquisa e para a identificação das principais linhas de estudo relacionadas à gestão integrada de rios urbanos.

Introdução

Os rios urbanos desempenham papel fundamental na estrutura ambiental e paisagística das cidades, atuando como elementos essenciais na regulação hidrológica, manutenção da biodiversidade e qualificação do espaço urbano. No entanto, o processo de urbanização historicamente tem promovido profundas alterações nesses sistemas fluviais, caracterizadas pela canalização de cursos d'água, ocupação de áreas de várzea e aumento da impermeabilização do solo.

Essas intervenções resultam em alterações significativas nos regimes hidrológicos naturais, frequentemente associadas ao aumento do escoamento superficial, intensificação de eventos de inundação e degradação da qualidade da água (TUCCI, 2008). Esse fenômeno é amplamente descrito na literatura científica como "síndrome dos rios urbanos", caracterizada pela simplificação dos habitas fluviais e pela perda das funções ecológicas desses sistemas (WALSH et al., 2016).

Nas últimas décadas, tem-se observado uma mudança crescente em relação a gestão de rios urbanos, pois em vez de soluções baseadas exclusivamente em sistemas de engenharia tradiconais, construídos principalmente em concreto, como canalizações e retificações, diversos estudos têm destacado a importância da integração entre drenagem urbana sustentável, infraestrutura e planejamento urbano (FLETCHER et al., 2015).

Nesse contexto, estratégias de revitalização de rios urbanos vêm sendo discutidas como alternativas capazes de promover simultaneamente benefícios hidrológicos, ambientais e sociais, contribuindo para a requalificação de espaços urbanos degradados e para a melhoria da resiliência das cidades frente às mudanças climáticas (AHERN, 2011).

Diante do crescente volume de pesquisas sobre o tema, torna-se relevante compreender como a produção científica internacional tem evoluído e quais são os principais temas investigados na literatura. Assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica da produção científica relacionada aos rios urbanos, com ênfase na integração entre drenagem urbana, urbanismo e revitalização de rios urbanos.

Material e Métodos

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliométrica da literatura científica. A bibliometria consiste em um conjunto de métodos quantitativos utilizados para analisar padrões e tendências da produção científica em determinada área do conhecimento (PRITCHARD, 1969).

A coleta de dados foi realizada no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), uma das principais plataformas de acesso à produção científica internacional no Brasil, que reúne bases de dados multidisciplinares e periódicos científicos indexados em diferentes áreas do conhecimento. O processo de levantamento bibliográfico ocorreu entre os dias 20 e 30 de março de 2026, período no qual foram executadas as estratégias de busca, aplicação dos filtros e exportação dos registros bibliográficos utilizados na análise. A indicação do intervalo temporal da coleta é relevante para a reprodutibilidade da pesquisa, uma vez que as bases de dados científicas são continuamente atualizadas com novas publicações, podendo resultar em variações no número de registros recuperados em consultas realizadas em momentos distintos. Dessa forma, o registro do período de coleta constitui uma etapa metodológica importante em estudos de revisão e análises

bibliométricas, contribuindo para a transparência e rastreabilidade do processo de levantamento da literatura (KITCHENHAM; CHARTERS, 2007).

Foram definidas quatro estratégias de busca distintas, com o objetivo de abranger diferentes abordagens relacionadas ao tema dos rios urbanos e suas interfaces com drenagem urbana, urbanismo e revitalização.

Todas as buscas foram realizadas utilizando o operador lógico AND, que permite recuperar registros que contenham simultaneamente os termos especificados, ampliando a precisão da seleção de artigos relacionados ao tema investigado.

Com o objetivo de garantir a qualidade e a relevância científica das publicações analisadas, foram aplicados filtros específicos disponíveis no próprio sistema do Portal de Periódicos CAPES.

Pesquisa 01	Pesquisa 02	Pesquisa 03	Pesquisa 04
URBAN RIVERS	**"URBAN RIVERS" AND "URBAN DRAINAGE"**	**"URBAN RIVERS" AND "URBANISM"**	**"URBAN RIVERS" AND "REVITALIZATION"**
Qualquer campo **Contém** **Acesso aberto: sim** **Tipo de recurso: artigo** **Ano de pesquisa: todos** **Revisado por pares: sim** **Áreas: engenharias** **Idioma: todos**	Qualquer campo Contém Acesso aberto: sim Tipo de recurso: artigo Ano de pesquisa: todos Revisado por pares: sim Idioma: todos	Qualquer campo Contém Acesso aberto: sim Tipo de recurso: artigo Ano de pesquisa: todos Revisado por pares: sim Idioma: todos	Qualquer campo Contém Acesso aberto: sim Tipo de recurso: artigo Ano de pesquisa: todos Revisado por pares: sim Idioma: todos

Tabela 01: Estratégia da busca bibliográfica aplicada.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A aplicação desses filtros permitiu restringir os resultados a publicações científicas com maior rigor acadêmico, assegurando a confiabilidade das informações utilizadas na análise bibliométrica.

Resultados e Discussão

Análise Bibliométrica

Após a realização das buscas, os resultados obtidos em cada estratégia foram exportados do Portal de Periódicos CAPES em formato de planilha eletrônica contendo as principais informações bibliográficas dos artigos, incluindo título, autores, periódico, ano de publicação e identificador digital (DOI). Os dados foram organizados e analisados em ambiente de planilha eletrônica, permitindo identificar a quantidade total de publicações, distribuição temporal dos estudos e principais periódicos científicos associados ao tema. No total, foram compilados 2.946 registros bibliográficos provenientes das quatro estratégias de busca adotadas.

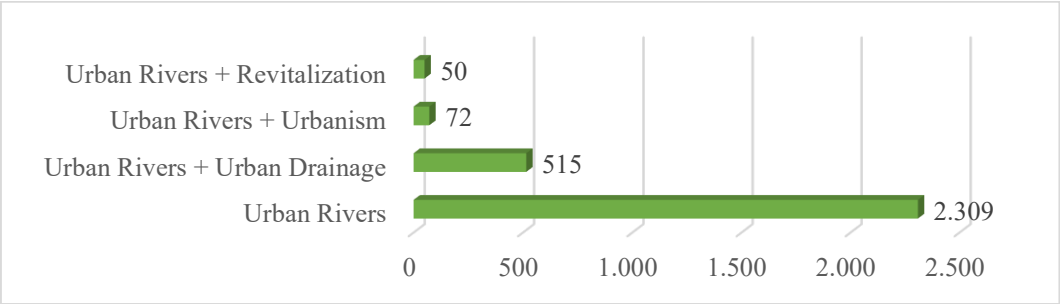


Figura 02: Síntese dos resultados da busca bibliográfica.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na etapa de tratamento e organização dos dados, os resultados obtidos nas quatro estratégias de busca foram inicialmente reunidos em uma planilha única, com o objetivo de consolidar todos os registros recuperados. Em seguida, realizou-se o processo de identificação e remoção de duplicidades, considerando como critérios principais o título do artigo e o identificador digital do objeto (DOI). Inicialmente, os títulos foram padronizados para evitar inconsistências decorrentes de diferenças de formatação, como uso de letras maiúsculas, espaços ou caracteres especiais. Posteriormente, os registros foram comparados automaticamente, priorizando-se o DOI quando disponível, por se tratar de um identificador único de publicações científicas. Na ausencia desse identificador, a verificação foi realizada com base na similaridade dos títulos. Os registros identificados como duplicados foram removidos, mantendo apenas uma ocorrência de cada artigo na base de dados. Esse procedimento permite eliminar repetições provenientes da sobreposição entre as diferentes combinações de palavras-chave utilizadas nas buscas, resultando em uma base final composta exclusivamente por 2.637 artigos únicos.

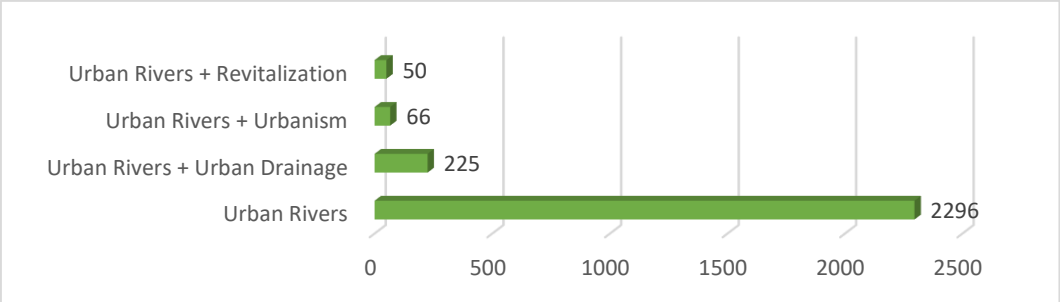


Figura 03: Síntese dos resultados da busca bibliográfica após tratamento dos dados.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A evolução temporal das publicações foi analisada a partir da base consolidada de artigos únicos obtida após a remoção de duplicidades. Inicialmente, foram extraídas das referências bibliográficas as informações referentes ao ano de publicação de cada artigo. Em seguida, os registros foram organizados cronologicamente e contabilizados, permitindo identificar a quantidade de publicações por ano ao longo do período analisado. Esse procedimento possibilita avaliar o comportamento temporal da produção científica, evidenciando tendências de crescimento, estabilidade ou declínio do interesse acadêmico sobre o tema investigado. A análise temporal das publicações constitui uma etapa importante em estudos bibliométricos, permitindo compreender a evolução do conhecimento científico em determinada área e identificar períodos de maior produção de pesquisas (ARAUJO, 2006; DONTHU et al., 2021).

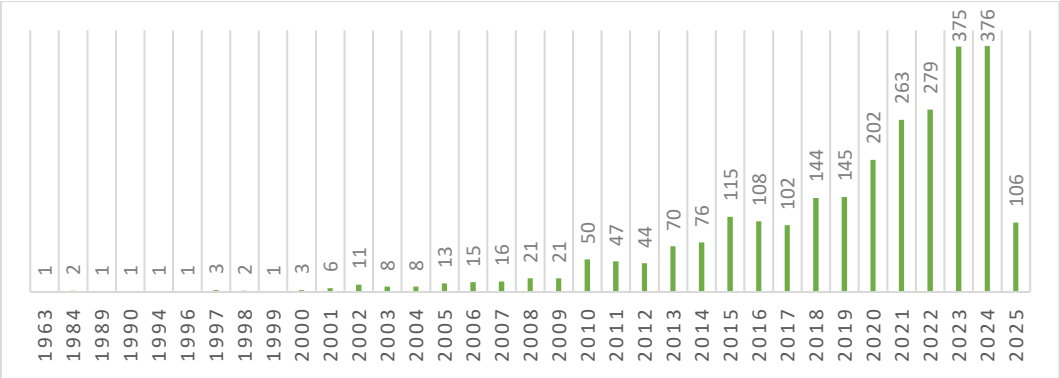


Figura 02: Distribuição temporal das publicações dos resultados da busca bibliográfica.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

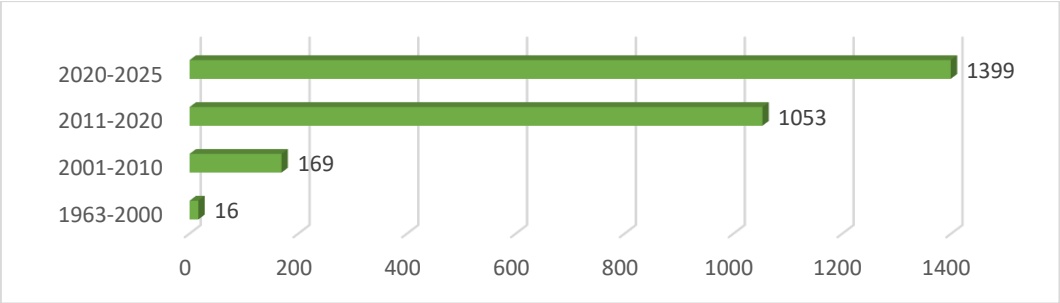


Figura 03: Distribuição temporal por períodos das publicações dos resultados da busca bibliográfica.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para identificar os periódicos científicos com maior relevância na disseminação das pesquisas relacionadas ao tema investigado, realizou-se uma análise da distribuição das publicações por fonte editorial. Inicialmente, foram extraídas das referências bibliográficas as informações referentes ao periódico de publicação de cada artigo. Em seguida, procedeu-se à contabilização da frequência de ocorrência de artigos por periódico, permitindo identificar aqueles com maior concentração de publicações. A partir dessa contagem, foram selecionados os dez periódicos com maior número de artigos, os quais foram considerados como os principais veículos de divulgação científica na área analisada. Esse procedimento é amplamente utilizado em estudos bibliométricos para identificar os periódicos mais produtivos e compreender a concentração da produção científica em determinadas fontes de publicação, fenômeno descrito pela Lei de Bradford, que estabelece que um núcleo reduzido de periódicos tende a concentrar a maior parte das publicações relevantes de um campo científico (BRADFORD, 1934; ARAÚJO, 2006).

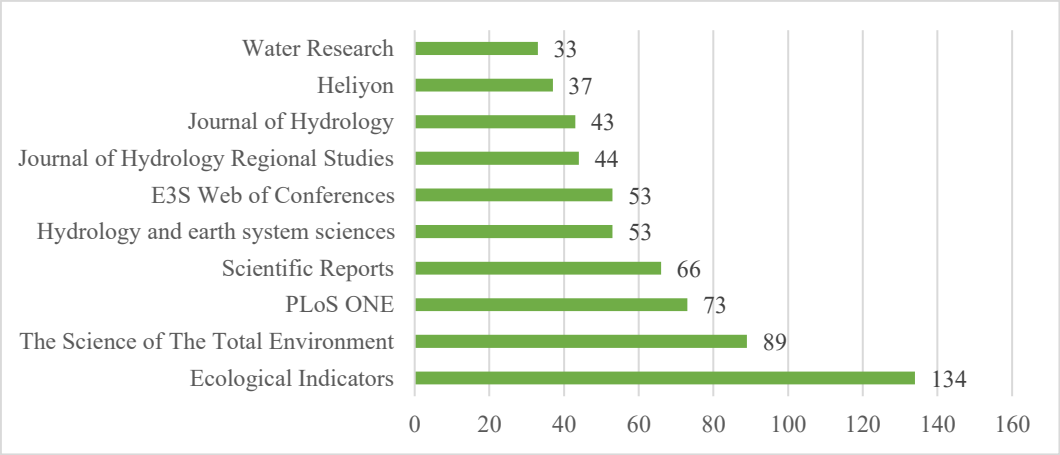


Figura 04: Distribuição das publicações por periódico científico.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para identificar as principais tendências temáticas da literatura analisada, foi realizada uma mineração textual exploratória baseada nos títulos dos artigos presentes na base de dados. Considerando o elevado número de registros (n = 2637), o processamento textual foi conduzido com o auxílio de ferramentas de inteligência artificial (chatgpt-versão free) aplicadas à análise textual, capazes de automatizar a identificação de padrões linguísticos em grandes volumes de dados. Os títulos foram submetidos a um processo de pré-processamento textual, incluindo padronização para letras minúsculas, remoção de caracteres especiais e exclusão de palavras de baixa relevância semântica. Em seguida, foi realizada a análise de frequência das palavras mais recorrentes, permitindo identificar termos dominantes e, consequentemente, inferir as principais tendências temáticas presentes na literatura. Esse tipo de abordagem é utilizada em estudos bibliométricos e revisões sistemáticas para investigar padrões conceituais em grandes bases de dados científicas, especialmente quando não há disponbilidade de resumos ou palavras-chave como é o caso da base de dados estudada (DONTHU et al., 2021; MINER et al., 2012).

Entre os termos mais recorrentes apareceram water quality, pollution, flood, land, spatial, ecological, management, climate, catchment e development. A interpretação dessas recorrências permite identificar três grandes tendências temáticas predominantes na literatura analisada:

Tendência temática	Foco principal
Qualidade da água e poluição	Monitoramento ambiental e contaminação em rios urbanos
Hidrologia urbana e enchentes	Modelagem hidrológica e avaliação de risco de inundação
Uso do solo e urbanização	Impactos da urbanização e gestão de bacias hidrográficas

Tabela 02: Síntese das principais tendências temáticas.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Evolução temporal da produção científica

A análise bibliométrica da literatura revelou um crescimento expressivo da produção científica relacionada aos rios urbanos nas últimas décadas. Embora existam registros de publicações desde a década de 1960, o número de estudos permaneceu relativamente baixo até o início dos anos 2000, indicando que o tema ainda não recebia muita atenção científica nesse período. Conforme apresentado nas figuras do artigo, apenas 16 publicações foram registradas entre 1963 e 2000, enquanto a produção aumenta progressivamente nas décadas seguintes.

A partir de 2010 observa-se um aumento significativo na quantidade de estudos publicados, com mais de mil artigos produzidos entre 2011 e 2020, havendo um crescimento ainda mais acentuado no período entre 2020 e 2025. Esse comportamento evidencia a consolidação do tema no campo da pesquisa científica internacional. O pico de publicações foi registrado em 2023, indicando um período de intensa produção acadêmica voltada à compreensão dos impactos da urbanização sobre os sistemas hidrológicos urbanos.

Esse crescimento pode ser explicado pelo aumento das preocupações relacionadas à gestão sustentável dos cursos d'água nas cidades, especialmente diante da intensificação de eventos hidrológicos extremos e dos efeitos das mudanças climáticas sobre os sistemas urbanos. Nesse contexto, estudos recentes destacam a necessidade de abordagens integradas para o planejamento e gestão de drenagem urbana, incorporando conceitos como infraestrutura sustentável, soluções baseadas na natureza e planejamento urbano resiliente (FLETCHER et al., 2015; AHERN, 2011).

Além disso, o aumento da produção científica também reflete o avanço das discussões relacionadas à chamada síndrome dos rios urbanos, caracterizada pela degradação ecológica dos cursos d'água decorrente da urbanização, incluindo alterações hidrológicas, perda de biodiversidade e deterioração da qualidade da água (WALSH et al., 2016). A evolução temporal da literatura evidencia o reconhecimento crescente da importância dos rios urbanos na sustentabilidade ambiental e na resiliência das cidades.

Principais periódicos científicos

A análise da distribuição das publicações por periódico científico revelou uma concentração significativa da produção científica em periódicos internacionais especializados nas áreas de hidrologia, engenharia ambiental e ciências ambientais. Entre os periódicos com maior número de publicações destacam-se Ecological Indicators, Science of the Total Environment, PLoS ONE, Scientific Reports, Hydrology and Earth System Sciences, Journal of Hydrology, Journal of Hydrology Regional Studies e Water Research, conforme ilustrado na Figura 04.

A predominância desses periódicos indica que as pesquisas relacionadas aos rios urbanos estão fortemente inseridas no campo interdisciplinar das ciências ambientais e da hidrologia urbana. Revistas como Journal of Hydrology e Hydrology and Earth System Sciences concentram estudos voltados à modelagem hidrológica e análise de processos hidrológicos em bacias hidrográficas, enquanto periódicos como Ecological Indicators e Science of the Total Environment publicam pesquisas relacionadas à avaliação ambiental, indicadores ecológicos e gestão de ecossistemas aquáticos.

Esse padrão de concentração da produção científica em um número reduzido de periódicos está alinhado com o comportamento descrito pela Lei de Bradford, segundo a qual a literatura científica tende a se organizar em torno de um núcleo de periódicos altamente produtivos responsáveis pela maior parte das publicações de determinado campo do conhecimento (BRADFORD, 1934; ARAÚJO, 2006). Esse fato é observado com frequencia em análises bibliométricas e evidencia a existência de veículos científicos que atuam como principais canais de disseminação do conhecimento em áreas específicas.

Tendências temáticas da produção científica

A análise de mineração textual aplicada aos títulos dos artigos permitiu identificar três principais tendências temáticas predominantes na literatura analisada, sendo uma delas a qualidade da água e poluição em rios urbanos, a outra a hidrologia urbana e avaliação de enchentes e por fim o uso do solo, urbanização e gestão ambiental de bacias hidrográficas.

A primeira tendência temática está associada aos estudos sobre qualidade da água e poluição em rios urbanos. A elevada frequência de termos como water quality, pollution, environmental e ecological indica que uma parcela significativa das pesquisas acaba por se concentrar na avaliação da contaminação de sistemas fluviais urbanos, monitoramento de parâmetros físico-químicos e identificação de impactos antrópicos sobre a qualidade da água. A urbanização intensifica o transporte de poluentes por meio do escoamento superficial e aumenta a pressão sobre os corpos hídricos urbanos, comprometendo a qualidade ambiental desses sistemas (TUCCI, 2008; WALSH et al., 2016).

A segunda tendência temática refere-se aos estudos relacionados à hidrologia urbana e ao risco de enchentes. Termos como flood, model, catchment e risk aparecem com frequência elevada na literatura analisada, evidenciando o interesse científico na modelagem hidrológica de bacias urbanas e na avaliação dos impactos da impermeabilização do solo sobre o comportamento hidrológico das cidades. O crescimento dessas pesquisas está associado à necessidade de desenvolver estratégias mais eficientes para a gestão da drenagem urbana, especialmente diante do aumento da frequência e intensidade de eventos extremos. Nesse contexto, sistemas de drenagem urbana sustentável e soluções baseadas na natureza têm sido amplamente discutidos como alternativas para reduzir riscos de inundação e melhorar o desempenho hidrológico das cidades (FLETCHER et al., 2015).

A terceira tendência temática identificada está relacionada às pesquisas sobre uso e ocupação do solo, urbanização e gestão ambiental de bacias hidrográficas. Termos como land, development, spatial e management refletem estudos voltados à análise das transformações territoriais decorrentes da expansão urbana e seus impactos sobre os sistemas fluviais. Esses trabalhos frequentemente utilizam ferramentas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e análise espacial para avaliar alterações no uso do solo e suas implicações na dinâmica hidrológica e ecológica das bacias hidrográficas. Diversos estudos apontam que a urbanização altera significativamente o ciclo hidrológico natural, aumentando o escoamento superficial e reduzindo a capacidade de infiltração do solo (TUCCI, 2008).

Considerações Finais

A análise bibliométrica realizada permitiu compreender a evolução e as principais tendências da produção científica internacional relacionada aos rios urbanos, com ênfase na integração entre drenagem urbana, urbanismo e estratégias de revitalização de sistemas fluviais em ambientes urbanos. A partir da aplicação de diferentes estratégias de busca no Portal de Periódicos CAPES, foram inicialmente identificados 2.946 registros bibliográficos, os quais, após o processo de tratamento e remoção de duplicidades, resultaram em uma base consolidada composta por 2.637 artigos científicos únicos.

Os resultados evidenciaram um crescimento significativo da produção científica nas últimas duas décadas, especialmente a partir da década de 2010, período marcado pela intensificação das discussões relacionadas aos impactos da urbanização sobre os sistemas hidrológicos e à necessidade de desenvolvimento de soluções sustentáveis para a gestão das águas urbanas. Esse aumento na produção científica reflete a crescente preocupação da comunidade científica e dos gestores urbanos com problemas como enchentes, degradação da qualidade da água e perda das funções ecológicas dos rios em áreas urbanizadas.

A análise da distribuição das publicações por periódico científico revelou a predominância de revistas internacionais especializadas nas áreas de hidrologia, engenharia ambiental e ciências ambientais, evidenciando o caráter interdisciplinar das pesquisas relacionadas aos rios urbanos. Esse padrão de concentração das publicações em um núcleo de periódicos confirma o comportamento descrito pela Lei de Bradford, frequentemente observado em estudos bibliométricos.

A análise temática da literatura permitiu identificar três principais linhas de investigação predominantes: a primeira de estudos voltados à qualidade da água e aos processos de poluição em rios urbanos, a segunda de pesquisas relacionadas à hidrologia urbana, modelagem hidrológica e avaliação de riscos de inundação, e a terceira acerca das investigações sobre os

impactos da urbanização, mudanças no uso do solo e gestão ambiental de bacias hidrográficas urbanas. Esses resultados indicam que a literatura científica tem se concentrado principalmente na compreensão dos processos hidrológicos e ambientais associados à urbanização.

Além dessas tendências identificadas, a análise dos estudos destacou a presença de abordagens que buscam integrar planejamento urbano, infraestrutura sustentável e soluções baseadas na natureza como estratégias para a gestão dos rios urbanos. Essas abordagens refletem uma mudança gradual em relação à gestão das águas urbanas, substituindo soluções baseadas exclusivamente em engenharia tradicional por estratégias mais integradas que conciliam aspectos ambientais, hidrológicos e urbanos.

Por fim, a base de dados obtida nesta pesquisa constitui um importante insumo para o desenvolvimento das etapas subsequentes do estudo. O conjunto de 2.637 artigos identificados e organizados através desta análise bibliométrica servirá como base inicial para uma segunda etapa de investigação, voltada à realização de uma revisão bibliográfica mais aprofundada sobre o tema. Nessa fase, será conduzido um processo de triagem dos estudos, iniciando-se pela leitura dos títulos dos artigos, com o objetivo de identificar os mais relevantes para a temática investigada. Em seguida, os artigos pré-selecionados serão submetidos à leitura dos resumos, permitindo uma avaliação mais detalhada da aderência dos estudos ao escopo da pesquisa.

A partir desse processo de filtragem estima-se selecionar aproximadamente 50 a 100 artigos para leitura integral, os quais serão a base para a realização de uma revisão bibliográfica mais aprofundada sobre rios urbanos, drenagem urbana e estratégias de revitalização fluvial em ambientes urbanos. Esse procedimento segue as recomendações metodológicas amplamente utilizadas em revisões sistemáticas da literatura, onde a triagem sequencial por títulos, resumos e textos completos constitui uma etapa importante para garantir a relevância e a qualidade dos estudos incluídos na análise (KITCHENHAM; CHARTERS, 2007; OKOLI, 2015; SNYDER, 2019). Dessa forma, a base bibliográfica estruturada neste trabalho não apenas permite compreender as tendências da produção científica internacional, mas também fornece suporte metodológico para o aprofundamento da investigação teórica sobre o tema.

Referências Bibliográficas

AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. Landscape and Urban Planning, 2011.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs and WSUD: The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Urban Water Journal, 2015.

PRITCHARD, A. Statistical bibliography or bibliometrics. Journal of Documentation, 1969.

TUCCI, C. E. M. Urban drainage in developing countries. Urban Water Journal, 2008.

WALSH, C. J. et al. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. Journal of the North American Benthological Society, 2016.

KITCHENHAM, Barbara; CHARTERS, Stuart. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Keele: Keele University, 2007.

ARAÚJO, C. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. Em Questão, v. 12, n. 1, p. 11–32, 2006.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research, v. 133, p. 285–296, 2021.

BRADFORD, S. C. Sources of information on specific subjects. Engineering, v. 137, p. 85–86, 1934.

ARAÚJO, C. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. Em Questão, v. 12, n. 1, p. 11–32, 2006.

AHERN, Jack.
From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. Landscape and Urban Planning, v. 100, n. 4, p. 341–343, 2011.
https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021

ARAÚJO, Carlos Alberto.
Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. Em Questão, v. 12, n. 1, p. 11–32, 2006.

BRADFORD, Samuel Clement.
Sources of information on specific subjects. Engineering, v. 137, p. 85–86, 1934.

DONTHU, Naveen; KUMAR, Satish; MUKHERJEE, Debmalya; PANDEY, Nitesh; LIM, Weng Marc.
How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research, v. 133, p. 285–296, 2021.
https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

FLETCHER, Tim D.; SHUSTER, William; HUNT, William F.; ASHLEY, Richard; BUTLER, David; ARTHUR, Scott;

TROWSDALE, Sam; BARRAUD, Sylvie; SEMADENI-DAVIES, Annette; BERTRAND-KRAJEWSKI, Jean-Luc; MIKKELSEN, Peter Steen; RIVARD, Guy; UHL, Matthias; DAGENAIS, Daniel; VIKLANDER, Maria.
SUDS, LID, BMPs and WSUD: The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Urban Water Journal, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.
https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314

KITCHENHAM, Barbara; CHARTERS, Stuart.
Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Keele: Keele University, 2007.

MINER, Gary; ELDER, John; FAST, Andrew; HILL, Thomas; NISBET, Robert; DELLA CROCE, Gianluca.
Practical Text Mining and Statistical Analysis for Non-Structured Text Data Applications. Burlington: Academic Press, 2012.

PRITCHARD, Alan.
Statistical bibliography or bibliometrics? Journal of Documentation, v. 25, n. 4, p. 348–349, 1969.

TUCCI, Carlos E. M.
Urban drainage in developing countries. Urban Water Journal, v. 5, n. 1, p. 3–12, 2008.
https://doi.org/10.1080/15730620701755480

WALSH, Christopher J.; ROY, Allison H.; FEMINELLA, Jack W.; COTTINGHAM, Peter D.; GROFFMAN, Peter M.; MORGAN II, Robert P.
The urban stream syndrome: Current knowledge and the search for a cure. Journal of the North American Benthological Society, v. 24, n. 3, p. 706–723, 2005.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S.
Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Keele University, 2007.

OKOLI, Chitu.
A guide to conducting a standalone systematic literature review. Communications of the Association for Information Systems, v. 37, 2015.

SNYDER, Hannah.
Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research, v. 104, p. 333–339, 2019.

ALAGAMENTOS EM ÁREA URBANA CONSOLIDADA: AUMENTAR O DIÂMETRO DAS TUBULAÇÕES É A SOLUÇÃO?

1Cristhiane Michiko Passos Okawa, 2 Lucas Gabriel de Souza Bairros, 3Deise Molinari, 4Ana Caroline Raimundini Aranha, 5Cássia Maria Bonifácio, 6Mariana dos Santos Bento, 7Maria Eduarda de Assis Souza, 8Ana Carla Fernandes Gasques

1 Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil, e-mail: cmpokawa@uem.br; 2 Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil, e-mail: pg404728@uem.br; 3 Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil, e-mail: deise.molinari8@gmail.com; 4 Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil e-mail: carolraimundini@gmail.com; 5 Alberami, Puglia, Itália, e-mail: cassiabonifacio@hotmail.com; 6 Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil, e-mail: pg407456@uem.br; 7 Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil, e-mail: ra143401@uem.br; 8 Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil, e-mail: anacarlafgasques@gmail.com

Palavras-chave: manejo de águas pluviais urbanas; drenagem urbana sustentável e convencional; soluções baseadas na natureza.

Resumo

O desenvolvimento acelerado das cidades provoca intensa impermeabilização do solo, aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial e gerando frequentes alagamentos. No entorno do Parque do Ingá, em Maringá, Paraná, Brasil, este problema tem se manifestado de forma recorrente, motivando o presente estudo, cujo objetivo foi diagnosticar a rede de drenagem existente e simular cenários de intervenção visando mitigar os impactos das chuvas intensas. Para tanto, foi utilizado o cadastro digital da rede de drenagem urbana fornecido pela prefeitura municipal e, por meio da licença acadêmica do programa SEWERGEMS, foram simulados dois cenários: a situação atual da rede de drenagem e a substituição de tubulações subdimensionadas por diâmetros maiores. Os principais resultados mostraram sobrecarga hidráulica na rede atual, com ocorrência de extravasamentos e alagamentos frequentes, enquanto o aumento do diâmetro das tubulações reduziu parcialmente os alagamentos, mas provocou picos de vazão mais elevados e mais rápidos, indicando maior impacto a jusante. Assim, os resultados evidenciaram que a simples troca de diâmetros das tubulações da rede de drenagem urbana não é uma solução adequada para mitigar alagamentos. Portanto, recomenda-se a continuação das simulações de outros cenários que considerem a implantação de soluções baseadas na natureza, as quais são apontadas como alternativas promissoras para promover a infiltração da água da chuva e reduzir a sobrecarga da rede de drenagem, contribuindo para o manejo sustentável das águas pluviais, a melhoria da qualidade ambiental, econômica e social e a gestão eficiente das águas pluviais urbanas.

Introdução

O êxodo rural ocorrido no Brasil nas décadas de 60, 70 e 80 propiciou a construção e o desenvolvimento das cidades (Alves, Souza e Marra, 2011), ocasionando uma elevação na densidade demográfica em um período relativamente curto. A atividade agrícola de subsistência foi substituída por atividades comerciais e industriais. A retirada das florestas para a construção das cidades e a impermeabilização do solo durante o seu desenvolvimento provocava alguns impactos, tais como diminuição da interceptação pelas árvores, diminuição da infiltração da água da chuva no solo e aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial (Chausson, Turner e Seddon, 2020; Hettiarachchi, Wickramasinghe e Ranathunga, 2018; Raymond et al., 2017), favorecendo a ocorrência de erosões e inundações urbanas. Havia ainda a necessidade da gestão do abastecimento público de água potável, do esgotamento sanitário, da drenagem urbana e dos resíduos sólidos urbanos.

Enquanto isso, ao redor do mundo, consolidava-se o conceito higienista para o manejo das águas urbanas, que consistia na construção de uma infraestrutura de canalizações enterradas, que rapidamente traziam a água potável para o cidadão e levavam para longe as águas residuárias, bem como drenavam as águas pluviais, em sistemas que poderiam ser separadores ou unitários. No Brasil, adotou-se o sistema separador absoluto, ou seja, tubulações subterrâneas separadas para o esgotamento sanitário (doméstico/industrial) e para as águas pluviais, embora não seja a realidade de muitas cidades brasileiras, em que as ligações clandestinas de esgoto sanitário se inserem nas redes de águas pluviais (Henriques et al., 2021). O conceito higienista apresentava muitas vantagens: as águas eram rapidamente retiradas das cidades e escoadas para jusante, o que favorecia o controle das doenças de veiculação hídrica e melhorava a circulação de pessoas e de meios de transporte urbano (Baptista e Nascimento, 2011; Zahed Filho, 2017). No entanto, os impactos também eram transferidos para jusante.

A partir da década de 70, conceitos de proteção ambiental, conservação ambiental e sustentabilidade começaram a surgir nas conferências organizadas por lideranças ao redor do mundo, como a ONU. Nessas discussões, novas maneiras de manejo das águas pluviais passaram a ser desenvolvidas. Surgiram, então, as pesquisas que buscavam alternativas de projetos de drenagem urbana sustentáveis, melhorando a gestão por meio de planejamento e promovendo técnicas que compensassem os impactos anteriormente citados.

Conforme Fletcher et al. (2015), as medidas mais conhecidas atualmente são as de *Low Impact Development* (LID – desenvolvimento de baixo impacto) e *Best Management Practices* (BMP – melhores práticas de gestão), ambas propostas pelos Estados Unidos; *Water Sensitive Urban Design* (WSUD – projeto urbano sensível à água) proposta pela Austrália; *Sustainable*

Urban Drainage System (SUDS – sistemas de drenagem urbana sustentável) proposto pela Grã-Bretanha; e *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD – desenvolvimento e projeto urbano de baixo impacto) proposto pela Nova Zelândia. A China cunhou o termo *Sponge City* (cidade esponja) por volta dos anos 2000, e a comunidade científica europeia adotou o termo *Nature-based Solutions* (soluções baseadas na natureza), por volta de 2016.

De acordo com Zhu e Chen (2017), essas concepções valorizam as características da paisagem e as condições naturais de drenagem para mitigar os impactos da ocorrência de chuvas intensas em meio urbano. Embora o desenvolvimento desses conceitos tenha se iniciado pela ocorrência de enchentes decorrentes das chuvas intensas, a partir dos anos 2000 eles passaram a ser fundamentados nas mudanças climáticas e em eventos extremos tanto de enchente quanto de seca.

Esse histórico se relaciona com a problemática da área de estudo, pois o Parque do Ingá está localizado em uma área que, a partir da década de 80, passou por um desenvolvimento imobiliário e as residências foram substituídas por grandes edificações verticais. As redes de drenagem urbana haviam sido projetadas no conceito higienista e suas descargas ocorriam dentro do lago do Parque, para alimentá-lo e torná-lo maior. Com o tempo, a impermeabilização provocou o aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial; além desse fato, as mudanças climáticas favoreceram a ocorrência de chuvas mais intensas com maior frequência a partir da década de 80. Nesse cenário, as descargas das águas pluviais que ocorriam no interior do lago começaram a provocar erosão.

Além disso, a poluição difusa proveniente das ruas e calçadas era levada diretamente para dentro do lago pelas tubulações de drenagem urbana. Para resolver esses impactos, o poder público municipal desviou a água pluvial por dois canais paralelos que contornam o parque e que efetuam suas descargas em um ponto a jusante do lago, no córrego Moscados. Ao mesmo tempo, a impermeabilização do solo cada vez maior aterrou as áreas de recarga da água subterrânea, secando as nascentes que se encontravam dentro do parque.

E recentemente, a partir de 2019, observou-se o início de uma crise hídrica no estado do Paraná, com eventos extremos de seca. Dessa forma, um dos principais problemas percebidos no interior do Parque do Ingá e diagnosticado na revisão do Plano de Manejo (2020) foi com relação ao nível do lago, que alcançou níveis extremamente baixos, pois sua alimentação pelas nascentes, pela descarga da drenagem das águas pluviais e pelas chuvas não mais ocorre como antes. Foram ainda constatadas erosões no interior do parque e os aspectos de qualidade da água evidenciaram a poluição difusa que provoca o não enquadramento do lago na classe estipulada (classe 3). Ao mesmo tempo, a intensa impermeabilização do solo propicia sobrecarga hidráulica dos sistemas convencionais de drenagem (Andimuthu et al., 2019; Maksimović et al., 2017), com ocorrências de alagamentos em território urbano (Seneviratne et al., 2021), o que tem sido observado com frequência na região.

Tal fato influencia o bem-estar humano (Su et al., 2023), prejudica as economias locais (Tyler, Sadiq e Noonan, 2019) e pode comprometer a saúde e a qualidade de vida da população (Senes et al., 2021). Portanto, o manejo das águas pluviais urbanas é imprescindível, reduzindo o risco da vulnerabilidade a alagamentos em áreas urbanas (Collier et al., 2023; Qi et al., 2022; Su et al., 2023).

Assim, essa pesquisa se justifica porque o manejo das águas pluviais urbanas promove desenvolvimento sustentável para a cidade e qualidade de vida para a população. Para que isso ocorra, é necessário identificar e compreender como se comporta a rede de drenagem na área de estudo e de que maneira os alagamentos frequentes podem ser mitigados.

Além disso, essa pesquisa atende aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS 6 (Água limpa e saneamento) e ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) recomendados pela ONU, sendo, portanto, de fundamental importância sua realização. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi realizar o diagnóstico da rede de drenagem atual na bacia hidrográfica do entorno do Parque do Ingá e simular o redimensionamento das tubulações subdimensionadas para avaliar alterações no volume e na velocidade do escoamento superficial.

Material e Métodos

Foi solicitado o cadastro digital de drenagem urbana da região de estudo à Prefeitura Municipal de Maringá, o qual foi verificado e consistido. Constatou-se a falta de dados em aproximadamente 10% das tubulações, incluindo ausência de diâmetro, comprimento ou declividade dos trechos, bem como a falta de bocas de lobo e ligações entre trechos. Para tornar o cadastro consistente, os dados de comprimento ausentes foram calculados no programa SEWERGEMS, considerando que o projeto estava desenhado em escala e georreferenciado. Quando havia falta do diâmetro da tubulação, adotou-se o diâmetro do trecho anterior ou posterior. Na ausência de declividade favorável para o escoamento, utilizou-se uma declividade entre 0,005 e 0,01%. Nas situações de ausência de bocas de lobo ou trechos isolados, os elementos foram desenhados conforme projeto convencional de drenagem urbana.

Para a modelagem e simulação de cenários, utilizou-se a licença acadêmica do programa SEWERGEMS. Foram simulados dois cenários: o diagnóstico da situação atual (cenário 1) e a troca do diâmetro das tubulações com sobrecarga hidráulica por tubulações de maiores dimensões (cenário 2). Os tubos foram dimensionados a seção plena, considerando velocidade máxima de 7 metros por segundo e mínima de 0,75 metros por segundo. O tempo de escoamento superficial inicial foi definido em 10 minutos e a chuva de projeto foi adotada com tempo de retorno de 3 anos, com intensidade de 100,6 mm/h, pela aplicação da Equação 01, que é a equação IDF (Intensidade, Duração, Frequência) definida para a cidade de Maringá utilizando o *software* Pluvio versão 2.1, disponível em https://www.gprh.ufv.br/?area=softwares.

$$i = \frac{2.115{,}18\, T_r^{0{,}145}}{(t+22)^{0{,}849}} \qquad (01)$$

Onde: i é a intensidade pluviométrica em mmh^{-1}, Tr é o tempo de retorno em anos, t é o tempo de concentração em minutos.

O método numérico escolhido foi o SWWN, adotando tipo de solo D, característico de solos com mais de 40% de argila e menos de 50% de areia. Os coeficientes de escoamento (CN) foram definidos como 95 para quadras e 98 para as superfícies de asfalto, considerando 90% de impermeabilização para quadras e 100% para asfalto. O armazenamento devido à depressão no terreno foi considerado de 2,5 mm em áreas impermeáveis e 5 mm em áreas permeáveis, representadas por grama curta. O coeficiente de Manning utilizado foi de 0,011 para as superfícies de asfalto, 0,013 para as áreas impermeáveis das quadras, 0,15 para áreas permeáveis com grama curta e 0,013 para os tubos.

A bacia do córrego Moscados foi dividida em sub-bacias de acordo com o sistema de drenagem a montante de cada saída do sistema, totalizando 16 saídas na região. As saídas que desaguam em um mesmo ponto receberam o mesmo número seguido de letras diferentes, enquanto as saídas que lançam em pontos distintos foram nomeadas apenas pelo número da saída. Cada sub-bacia recebeu o nome correspondente à saída de rede respectiva, como ilustrado na Figura 01.

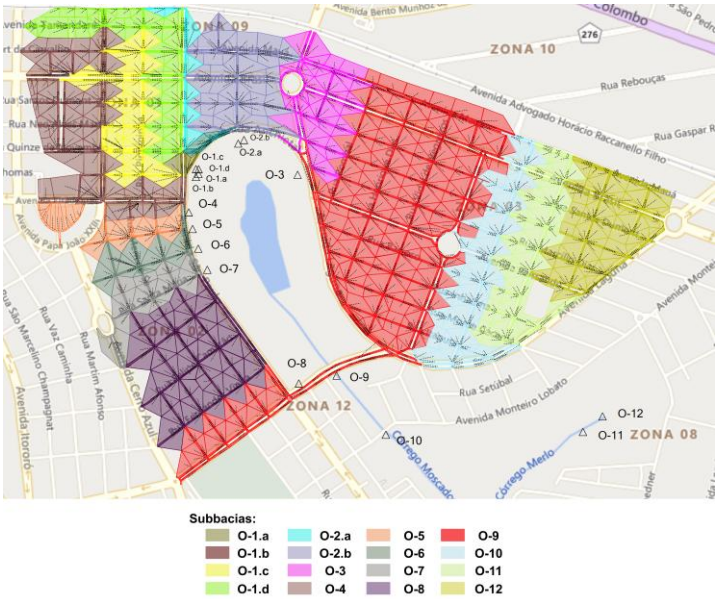


Figura 01: Sub-bacias de cada saída de rede existente na região do parque do ingá em Maringá/PR.
Fonte: Autoria própria (2025)

Resultados e Discussão

No diagnóstico da situação atual (cenário 1) da rede de drenagem, observa-se a rede de drenagem atual com os diâmetros das tubulações representados por cores (Figura 2). Observa-se que a maior parte da rede possui diâmetros entre 400 mm e 2.200 mm, abrangendo um total de 1.641 trechos de tubulação na área de estudo.

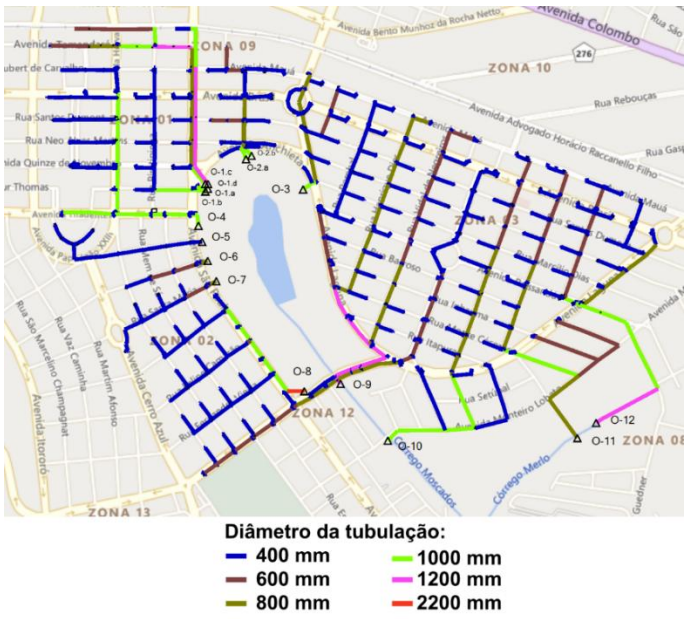


Figura 02: Representação de diâmetros na atual rede de drenagem.
Fonte: Autoria própria (2025)

Após a simulação da rede atual, foram detectados os poços de visita que apresentaram extravasamento e, também, os trechos de tubulações subdimensionados para a condição vigente na Lei Complementar 766, de 30 de junho de 2009 (Maringá, 2009), conforme ilustrado na Figura 03. Desse modo, constata-se o subdimensionamento da rede de drenagem urbana atual, que se encontra com sobrecarga hidráulica, o que provoca os alagamentos frequentes. Portanto, fica demonstrada a necessidade de intervenção para mitigar a ocorrência de alagamentos na região.

Na Tabela 01 são apresentados o comprimento de tubulações para cada diâmetro da rede de drenagem urbana atual. Nota-se que a maioria dos tubos possuem diâmetro de 400 mm, o que pode explicar a sobrecarga hidráulica na rede.



Figura 03: Poços de visita que apresentam extravasamento na atual rede de drenagem e tubulações subdimensionadas.
Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 01: Comprimentos das tubulações da rede atual de acordo com o diâmetro.

Saídas	Extensão (m)/ Diâmetro (mm)									Total (m)
	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2200	
O-1.a	52,8	0	0	0	50,1	0	0	0	0	102,9
O-1.b	1.333,6	0	0	0	227,3	0	0	0	0	1.560,9
O-1.c	857,8	0	527,5	657,6	316,7	177,7	0	0	0	2.537,3
O-1.d	108,0	0	0	0	189,6	537,8	0	0	0	835,4
O-2.a	125,5	0	0	0	58,0	0	0	0	0	183,5
O-2.b	1.839,7	0	324,5	337,7	45,6	0	0	0	0	2.547,5
O-3	1.600,8	0	212,8	490,6	65,9	0	0	0	0	2.370,1
O-4	2.723,8	0	0	0	1.182,1	0	0	0	0	3.905,9
O-5	1.056,2	0	0	0	0	0	0	0	0	1.056,2
O-6	345,4	0	233,2	27,8	0	0	0	0	0	606,4
O-7	939,5	0	120,9	29,0	0	0	0	0	0	1.089,4
O-8	3.069,1	0	27,4	0	450,6	0	0	0	75	3.622,1
O-9	7.792,5	0	2051,3	1838,5	0	670,6	0	0	0	12.352,9
O-10	2.443,4	0	415,6	597,4	656,3	0	0	0	0	4.112,7
O-11	1.662,1	0	1249,3	787,1	353,7	0	0	0	0	4.052,2
O-12	2.586,2	0	519,9	412,2	619,3	312,4	0	0	0	4.450,0
Total (m)	**28.536,0**	**0**	**5.682,4**	**5.177,9**	**4.215,2**	**1.699,0**	**0**	**0**	**75**	**45.385,4**

Fonte: Autoria própria (2025)

No estudo da troca do diâmetro de tubulações que estejam com sobrecarga hidráulica por tubulações com diâmetros maiores (cenário 2), o redimensionamento foi realizado considerando chuva de projeto com duração de 10 minutos e tempo de

retorno de 3 anos. Para esses parâmetros, a chuva de projeto apresenta intensidade de 100,6 mm/h, de acordo com a Equação 01. A Figura 04 apresenta os novos diâmetros das tubulações da rede de drenagem conforme os parâmetros adotados.

Dos 1.641 trechos de tubulação existentes, a simulação indicou a necessidade de aumento do diâmetro em 174 trechos. Comparando com a Figura 02, que representa os diâmetros da rede atual, observa-se a necessidade de alteração de diâmetro para diversos trechos da rede. Na Tabela 02, apresenta-se os trechos com alterações mais significativas, enquanto na Tabela 03 detalha-se a quantidade de tubulação (em metros) necessária para realizar a troca de diâmetro em toda a rede.

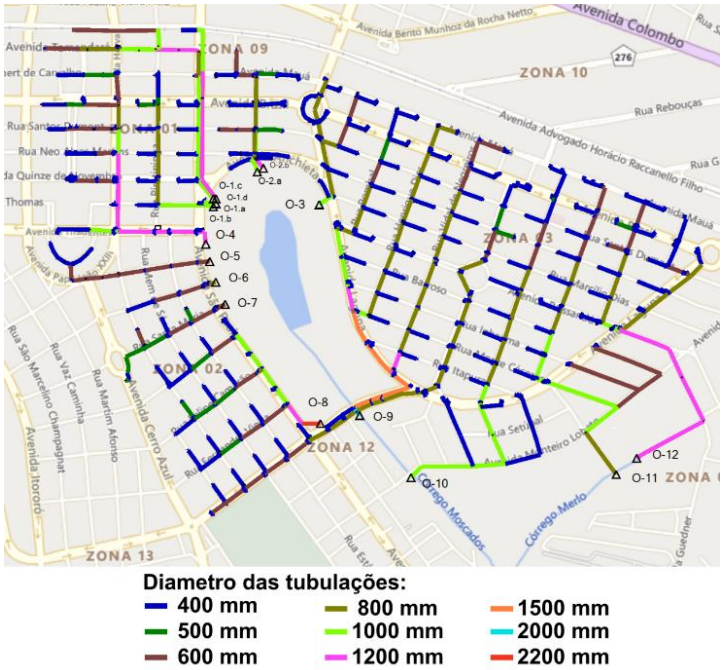


Figura 04: Diâmetros de tubulações alterados e poço de visita com sobrecarga para tempo de retorno de 3 anos.
Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 02: Trechos onde a alteração de diâmetro da rede de drenagem urbana foi mais significativa, para tempo de duração da chuva de projeto de 5 minutos e tempo de retorno de 3 anos.

Trecho da rede de drenagem	Alteração de diâmetro (mm)	
	De	Para
Avenida São Paulo, entre as avenidas Tamandaré e XV de Novembro	800	1.000
Rua Octávio Perioto, entre as avenidas Mauá e Av. Brasil	400	800
Avenida Laguna, entre a Av. Paissandu e a rua Monte Cáceros	600	1.000 e 1.200
Avenida Laguna até o cruzamento com a Av. Pres Juscelino Kubitschek	1.000	1.500
Avenida Herval, entre as avenidas Brasil e Tiradentes	400 e 1.000	600, 800 e 1.200
Avenida Tiradentes, entre as avenidas Herval e São Paulo	1.000	1.200
Av. Riachuelo entre rua Marcílio Dias e Av. Laguna	400 e 600	800
Av. Guedner até a saída de rede	1.000	1.200

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 05 apresenta-se o comparativo entre a vazão total na descarga da rede de drenagem antes e após o redimensionamento das tubulações. A linha azul representa o escoamento superficial no diagnóstico da situação atual, enquanto a linha vermelha corresponde ao cenário com aumento dos diâmetros das tubulações. Observa-se que, embora o redimensionamento solucione o problema de extravasamento e reduza os alagamentos localizados, o pico de vazão aumenta consideravelmente, atingindo valores próximos de 3,5 m³/s, além de ocorrer em menor intervalo de tempo.

Esse comportamento indica que o aumento dos diâmetros, apesar de melhorar o escoamento interno do sistema, acelera a concentração do volume de água que chega à saída da rede. Como a área de estudo não dispõe de infraestrutura capaz de receber esse volume adicional de maneira segura, o resultado é a transferência do problema de alagamento para jusante, potencializando impactos ambientais e estruturais.

Diante disso, ressalta-se a importância de estratégias complementares de manejo das águas pluviais, como a infiltração ao longo da bacia e o uso de dispositivos de retenção, que permitam reduzir o volume e a velocidade do escoamento superficial, atenuando o pico de vazão e evitando sobrecarga no ponto de descarga.

Tabela 03: Comprimento necessário para redimensionamento da rede, em função do diâmetro.

Saídas	Extensão (m)/ Diâmetro (mm)									Total
	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2200	
O-1.a	52,8	0	0	0	50,1	0	0	0	0	102,9
O-1.b	817	108,2	0	408,4	227,3	0	0	0	0	1.560,9
O-1.c	825,2	0	513	263,4	758	177,7	0	0	0	2.537,3
O-1.d	108	0	0	0	189,6	537,8	0	0	0	835,4
O-2.a	125,5	0	0	0	58	0	0	0	0	183,5
O-2.b	1.516,8	195,8	324,5	343,4	115,4	51,6	0	0	0	2547,5
O-3	1.528,2	0	212,8	563,2	65,9	0	0	0	0	2.370,1
O-4	1.927,9	203,8	742,6	94,7	215,4	721,5	0	0	0	3.905,9
O-5	419	0	637,2	0	0	0	0	0	0	1.056,2
O-6	345,4	0	233,2	27,8	0	0	0	0	0	606,4
O-7	409,2	338,9	341,3	0	0	0	0	0	0	1.089,4
O-8	2.071,7	509,6	424,1	91,1	354,1	96,5	0	0	75	3.622,1
O-9	6.724,9	304	1.064,7	3.077,2	301,9	209,6	630,1	40,5	0	12.352,9
O-10	2.648,1	12	198,9	503,3	750,4	0	0	0	0	4.112,7
O-11	1.662,1	0	1141	531,1	718	0	0	0	0	4.052,2
O-12	2.298,4	77,7	401,4	740,8	76,1	855,6	0	0	0	4.450,0
Total	**23.480,2**	**1.750,0**	**6.234,7**	**6.644,4**	**3.880,2**	**2.650,3**	**630,1**	**40,5**	**75**	**45.385,4**

Fonte: Autoria própria (2025)

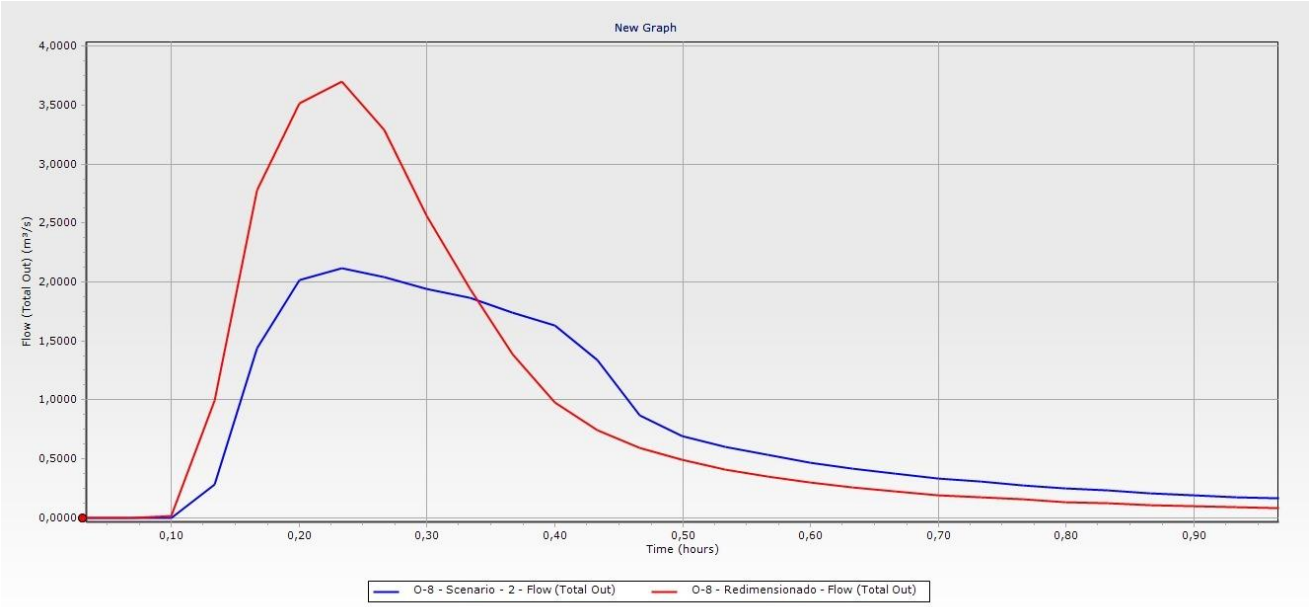


Figura 05: Comparativo entre as vazões na descarga da rede de drenagem antes (linha azul) e após (linha vermelha) o redimensionamento das tubulações.
Fonte: Autoria própria (2025)

Considerações finais

Esta pesquisa contribuiu para o diagnóstico do manejo das águas pluviais urbanas no entorno do Parque do Ingá, em Maringá/PR, ao identificar os trechos da rede de drenagem com sobrecarga hidráulica, responsáveis pelos recorrentes alagamentos na área, e ao propor a simulação de um cenário voltado à mitigação desses eventos.

A simulação do cenário de redimensionamento de tubulações mostrou-se eficaz no alívio das pressões internas da rede, eliminando pontos críticos de extravasamento. No entanto, a ampliação dos diâmetros, de forma isolada, aumentou a velocidade e o pico de vazão na saída da bacia, o que demonstra que o simples aumento da capacidade de condução não representa uma solução definitiva, apenas desloca o problema para jusante, potencializando impactos ambientais e estruturais.

A mitigação dos eventos de alagamento representa um ganho social relevante, pois contribui para o bem-estar da população, melhora a mobilidade urbana durante chuvas intensas e reforça a sustentabilidade ambiental, especialmente pela conservação dos recursos naturais.

Recomenda-se, portanto, a realização de novas simulações envolvendo diferentes Soluções Baseadas na Natureza (SbN) que favoreçam a infiltração das águas pluviais, bem como a análise de cenários integrados que associem essas SbN ao redimensionamento seletivo de trechos específicos da rede. Essa abordagem combinada pode proporcionar maior eficiência hidráulica e ambiental, equilibrando o escoamento superficial e reduzindo os impactos a jusante.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Prefeitura Municipal de Maringá pelo fornecimento dos dados utilizados nesta pesquisa, os quais foram fundamentais para a realização das simulações e análises da rede de drenagem urbana no entorno do Parque do Ingá. Agradecemos ainda à Fundação Araucária, pela concessão da bolsa de pós-doutorado para a terceira autora.

Referências Bibliográficas

ALVES, E.; E SOUZA, G. S.; & MARRA, R. Êxodo e sua contribuição à urbanização de 1950 a 2010. **Revista de Política Agrícola**, v. 2, 2011. Disponível em: Exodoesuacontribuicao.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

ANDIMUTHU, R.; KANDASAMY, P.; MUDGAL, B. V.; JEGANATHEN, A.; *et al.* Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian coastal city. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-43859-3.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2ª Edição Revisada. Porto Alegre: ABRH, 2011.

CHAUSSON, A.; TURNER, B.; SEDDON, D.; CHABANEIX, N.; *et al.* Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. **Global Change Biology**, v. 26, n. 11, p. 6134-6155, 2020. DOI: 10.1111/gcb.15310.

COLLIER, M. J.; FRANTZESKAKI, N.; CONNOP, S.; DICK, G.; *et al*. An integrated process for planning, delivery, and stewardship of urban nature-based solutions: The connecting nature framework. **Nature-Based Solutions**, v. 3, n. 100060, 2023. DOI: 10.1016/j.nbsj.2023.100060.

FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; HUNT, W. F.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; ARTHUR, S; MIKKELSEN, P. S. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.

HENRIQUES, J.A.; DE OLIVEIRA, R.; COURA, M.A.; LIBÂNIO, M. Água de drenagem ou esgoto sanitário? Uma análise do sistema de macrodrenagem em cidade de médio porte na Região Nordeste. **Eng. Sanit. Ambient**. v. 26, n. 05, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-415220190223.

HETTIARACHCHI, H. A. H.; WICKRAMASINGHE, C. N.; RANATHUNGA, S. The influence of social commerce on consumer decisions. **The International Technology Management Review**, v. 7, n. 1, p. 47-58, 2018. DOI: 10.2991/itmr.7.1.5.

MAKSIMOVIC, C.; BOZOVIC, R.; MIJIC, A.; SMITH, K. M.; *et al.* Blue Green Guide Solutions: A systems approach to sustainable, resilient and cost-efficient urban development. **Climate KIC**, v. 1, 53 p., 2017. Disponível em: https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2018/03/BGDGuide.pdf. Acesso em 24 de set. 2023.

QI, M.; HUANG, H.; LIU, L.; CHEN, X. An integrated approach for urban pluvial flood risk assessment at catchment level. **Water,** v. 14, n. 13, p. 2000, 2022. DOI: 10.3390/w14132000.

RAYMOND, C. M.; BERRY, P.; BREIL, M.; NITA, M.R.; *et al.* An Impact Evaluation Framework to Support Planning and Evaluation of Nature-based Solutions Projects. *In:* **Expert Working Group on Nature-based Solutions to Promote Climate Resilience in Urban Areas.** EKLIPSE. Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, United Kingdom, v. 1, 2017b. Disponivel em: https://www.iflaeurope.eu/assets/docs/EKLIPSE_Report1-NBS_FINAL_Complete-02022017_LowRes_4Web.pdf. Acesso em 5 jul 2023.

SENES, G.; FERRARIO, P.S.; CIRONE, G.; FUMAGALLI, N.; *et al.* Nature-based solutions for stormwater management: Creation of a green infrastructure suitability map as a tool for land-use planning at the municipal level in the Province of Monza-Brianza, Italy. **Sustainability**, v. 13, n. 6124, 2021. DOI: 10.3390/su13116124.

SENEVIRATNE, S.I.; ZHANG, X.; ADNAN, M.; BADI, W.; *et al*. **Weather and climate extreme events in a changing climate.** *In*: Climate Change 2021: The physical science basis. MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; *et al.* (org.). Contribution of working group i to the sixth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, n. 11, p. 1513-1766, 2021. DOI:10.1017/9781009157896.013.

SU, J.; WANG, M.; RAZI, M. A. M.; DOM, N. M.; SULAIMAN, N.; TAN, L.-W. A bibliometric review of nature-based solutions on urban stormwater management. **Sustainability**, v. 15, n. 7281, 2023. DOI:10.3390/su15097281.

TYLER, J.; SADIQ, A. A.; NOONAN, D.S. A review of the community flood risk management literature in the USA: Lessons for improving community resilience to floods. **Natural Hazards Journal,** v. 96, p. 223-1248, 2019. DOI: 10.1007/s11069-019-03606-3.

ZAHED FILHO, K. Z.; MARTINS, J. R. S.; PORTO, M. F. A. **Coleção Águas Urbanas - Fascículo 5: Medidas de armazenamento artificial e facilitadores de infiltração para controle de inundações urbanas**. 2017. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ZHU, Z.; CHEN, X. Evaluating the effects of low impact development practices on urban flooding under different rainfall intensities. **Water**, v. 9, n. 7, 2017.

DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DO SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL URBANA EM UMA BACIA URBANIZADA

1 Letícia de Jesus Brotti Gaspar, 2 Matheus Cordeiro da Costa, 3 Gabrielly França de Almeida, 4 Leonardo Henrique Pavani dos Santos, 5 Ariadny Muzza Subtil, 6 Cássio Barros De Aguiar, 7 Andrea Sartori Jabur

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Apucarana, Departamento de engenharia civil, e-mail: leticiagaspar@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Apucarana, Departamento de engenharia civil; matheusc.2022@alunos.utfpr.edu.br; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Apucarana, Departamento de engenharia civil, gabriellyalmeida@alunos.utfpr.edu.br; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Apucarana, Departamento de engenharia civil leonardos.2004@alunos.utfpr.edu.br; 5 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Apucarana, Departamento de engenharia civil ariadnymuzza@alunos.utfpr.edu.br; 6 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Apucarana, Departamento de engenharia civil cassioaguiar@utfpr.edu.br; 7 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Apucarana, Departamento de engenharia química, jabur@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Drenagem pluvial urbana; Escoamento superficial; Dissipador de energia.

Resumo

O presente estudo analisa os impactos do desenvolvimento urbano desordenado sobre o sistema de drenagem em um município na região do Vale do Ivaí (PR), com foco na falha de uma barragem de controle de água construída sem o devido embasamento técnico. A elevada impermeabilização do solo intensificou o escoamento superficial, resultando em picos de vazão superiores à capacidade do sistema existente, ocasionando alagamentos e processos erosivos.A área de estudo, com aproximadamente 3,69 km², foi subdividida em quatro zonas de contribuição, sendo analisada por meio do Método Racional, considerando coeficiente de escoamento de 0,7, tempo de concentração de 10 minutos e intensidades de chuva associadas aos tempos de retorno de 2 e 5 anos. As simulações hidráulicas, realizadas com auxílio de softwares especializados, indicaram vazões elevadas e regime de escoamento supercrítico, com velocidades acima do ideal. O dimensionamento da rede de drenagem evidenciou a insuficiência do sistema existente, composto por tubulações de 600 mm, incapazes de suportar as vazões de projeto. Como solução, propõe-se a adequação do número de condutos e a implementação de um dissipador de energia em escada, visando reduzir a energia cinética do escoamento e garantir maior segurança hidráulica. Conclui-se que a intervenção proposta é fundamental para mitigar riscos de alagamentos e erosão, destacando a importância do planejamento técnico adequado em obras hidráulicas urbanas e o papel das instituições acadêmicas no desenvolvimento de soluções eficientes e sustentáveis.

Introdução

O desenvolvimento urbano desordenado impõe grandes desafios para a administração dos recursos de água e dos sistemas de escoamento. A impermeabilização do solo, decorrente da expansão de pavimentação e edificações, altera drasticamente o ciclo hidrológico natural, resultando em picos de vazão que frequentemente ultrapassam a capacidade de projeto de infraestruturas antigas ou mal dimensionadas (OLIVEIRA; JABUR, 2022). Esse desequilíbrio pode ser agravado pela ausência de planejamento integrado entre o uso e a ocupação do solo e a infraestrutura de drenagem, um cenário comum em municípios de médio e pequeno porte, onde o crescimento urbano frequentemente se sobrepõe às áreas de preservação permanente e aos fundos de vale.

A bacia hidrográfica pode ser definida como uma área delimitada por divisores topográficos, na qual o escoamento das águas converge por meio de uma rede de drenagem até um ponto comum de saída, denominado exutório. Essa rede é composta por cursos d'água principais e seus afluentes, organizados de forma hierárquica, sendo responsável pela condução do escoamento superficial. O comportamento hidrológico da bacia está diretamente relacionado às características de uso e ocupação do solo, uma vez que alterações como a urbanização e a remoção da cobertura vegetal modificam processos como infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial, influenciando o tempo de concentração e a dinâmica do escoamento. Em áreas urbanizadas, observa-se de modo geral o aumento do escoamento superficial e a redução da infiltração, o que pode intensificar a ocorrência de alagamentos e contribuir para a degradação da qualidade da água, evidenciando a importância do planejamento adequado dos sistemas de drenagem urbana (TARGA et al., 2012).

Nesse contexto, o escoamento superficial corresponde à parcela da precipitação que não infiltra no solo e escoa sobre a superfície, sendo intensificado em áreas urbanizadas devido à presença de superfícies impermeáveis. Um dos parâmetros fundamentais para sua análise é o tempo de concentração, definido como o intervalo necessário para que toda a bacia contribua simultaneamente para o escoamento em uma determinada seção. Esse parâmetro está diretamente relacionado à resposta hidrológica da bacia e influencia a determinação das vazões de pico (TUCCI, 2001).

Outro parâmetro relevante é o coeficiente de escoamento superficial (C), que representa a fração da precipitação que efetivamente se transforma em escoamento. Em áreas urbanas, esse coeficiente tende a assumir valores elevados, em função da baixa infiltração e alta taxa de impermeabilização (DNIT, 2005). Para a estimativa das vazões máximas em bacias de pequena extensão, é amplamente utilizado o Método Racional, que relaciona a vazão de pico às características da bacia e à intensidade da precipitação.

Este processo de urbanização acelerada é particularmente crítico nas áreas de fundo de vale. Historicamente, a drenagem urbana no Brasil adotou uma abordagem mais tradicional, cujo princípio fundamental é retirar rapidamente as águas pluviais por

meio de canalizações e galerias, transferindo o problema para jusante o mais velozmente possível. Ao avaliar a fragilidade do sistema de drenagem na bacia do Córrego das Melancias (Santos Júnior, 2014), identificou um grau de fragilidade "Muito Forte" justamente em áreas onde predominava essa lógica de transferência rápida, evidenciando que a ausência de dispositivos de controle na origem e a ocupação desordenada dos vales resultam em impactos severos a jusante. Tal prática, além de negligenciar a função ecológica dos vales, intensifica a degradação dos fundos. Como consequência, observa-se diretamente o agravamento de processos erosivos, de assoreamento de corpos hídricos e o aumento da frequência das inundações em diversas áreas, uma vez que o sistema receptor não consegue comportar o volume concentrado e acelerado gerado, conforme Santos Júnior (2014).

Além disso, as intervenções em áreas rurais adjacentes ao tecido urbano também são afetadas. Pequenas barragens, comumente utilizadas para piscicultura ou dessedentação animal, tornam-se receptoras finais desse escoamento superficial excedente. Quando a bacia de contribuição a montante sofre um processo rápido de urbanização sem as devidas medidas compensatórias de drenagem, o volume e a velocidade da água que chega a esses reservatórios aumentam significativamente. Essa alteração no regime hidrológico não apenas eleva o risco de galgamento e ruptura das estruturas de barramento, muitas vezes dimensionadas empiricamente para cenários de uso do solo rural, como também acelera o transporte de sedimentos finos e nutrientes para dentro dos lagos, intensificando o processo de assoreamento e a eutrofização da água (CANHOLI, 2015).

Esse tipo de cenário evidencia a necessidade de soluções técnicas que considerem não apenas a condução, mas também o controle e a dissipação da energia do escoamento, especialmente em áreas sujeitas a rápidas transformações no uso do solo (RIBEIRO; SILVA, 2024).

Diante desse contexto, o presente estudo aborda a intervenção técnica realizada por uma Empresa Júnior de Engenharia Civil em um município, localizado na região do Vale do Ivaí - Paraná. A área analisada sofreu um processo de urbanização com a instalação de novos loteamentos de casas geminadas, o que resultou no aumento do escoamento superficial direcionado ao fundo do vale. Como consequência, verificou-se o agravamento de impactos em uma área rural adjacente, caracterizada pela presença de duas barragens que vêm sofrendo intenso processo de assoreamento.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar o diagnóstico hidráulico do sistema de drenagem, avaliar a segurança das estruturas existentes e propor o dimensionamento de um sistema de dissipação de energia, visando restabelecer condições adequadas de escoamento e minimizar os impactos no corpo receptor.

Material e Métodos

Materiais

Para a realização dos trabalhos de campos na área de estudo, optou-se pela utilização do software Google Earth para delimitação da bacia, planilhas eletrônicas (Excel) para organização e cálculo dos parâmetros hidrológicos, e dos softwares Canal e SISCCOH para simulação hidráulica e dimensionamento da rede de drenagem. Também foi realizada uma visita técnica à área de estudo, com levantamento de informações por meio de medições com trena e registros fotográficos.

Métodos

Para a realização do diagnóstico do sistema de drenagem pluvial urbano da bacia hidrográfica, foram realizados os cálculos de vazões máxima e a avaliação dos diâmetros finais. O quadro 1 descreve os métodos escolhidos, as equações e softwares utilizados, o conceito e as referências utilizadas.

Quadro 1. Equações e softwares utilizados no diagnóstico do sistema de drenagem pluvial

Parâmetros		
Índice	**Equação/ Método**	**Referências**
A – Área da bacia hidrográfica em km2	Utilização do software Google Earth Pro	Google Earth Pro 2026
Intensidade pluviométrica (i) mm/h	$i = 3092 \cdot Tr^{0,18}(tc+26,4)^{0,94}$ (1)	Gonçalves, 2011.
Coeficiente C	Tabelado e uso de média ponderada	
Vazão máxima m3/s	Método Racional $Q = 0,278.C.i.A$ (2)	foi adotado como 0,7. Esse valor é compatível com áreas urbanas com elevado grau de impermeabilização, conforme valores apresentados pelo manual de hidrologia básica (DNIT, 2005).
Gal ex erias pluviais	Equação de Chezy- Manning, com o uso do software Canal	Universidade Federal de Viçosa, 2026.

Quadro 1. Equações e softwares utilizados no diagnóstico do sistema de drenagem pluvial.
Fonte: organizado pelos autores

Para atingir os objetivos propostos, foram adotados procedimentos metodológicos que envolveram a caracterização da área de estudo. A delimitação das áreas de contribuição foi realizada com base na análise topográfica da região, considerando o escoamento superficial direcionado aos pontos de interesse do sistema de drenagem. A bacia foi subdividida em quatro zonas distintas com o Google Earth e possui as seguintes áreas: Zona 1: 0,25685 km², Zona 2: 1,59915 km², Zona 3: 0,70659 km², Zona 4: 1,13462 km². Essa divisão permite uma análise mais precisa das vazões geradas, uma vez que cada subárea pode apresentar diferentes contribuições ao escoamento total, mesmo adotando parâmetros hidrológicos uniformes para simplificação do modelo.



Figura 01: Zonas de contribuições.
Fonte: organizado pelos autores, Google Earth (2026).

Nesse sentido, a área de estudo apresenta uma bacia hidrográfica inserida em região urbana residencial de médio porte, com baixa cobertura vegetal e predominância de superfícies impermeabilizadas, como pavimentação asfáltica e calçadas, além da ausência de edificações verticais. Essas características influenciam diretamente o comportamento hidrológico local, favorecendo o escoamento superficial e dificultando os processos de infiltração.

A bacia analisada possui área total de aproximadamente 3,70 km², conforme ilustrado na Figura 2. Considerando o nível de urbanização observado e as recomendações da literatura técnica, como Linsley e Franzini (1964), que indicam a aplicação do Método Racional para bacias de pequena extensão (tipicamente inferiores a 5 km²), a área em estudo mostra-se adequada para a utilização desse método. As medidas foram obtidas e delimitadas com o uso do software Google Earth, e a subdivisão foi realizada conforme critérios de microdrenagem do sistema analisado.

Ressalta-se, entretanto, que, de acordo com o DNIT, sua aplicação é recomendada para bacias com área inferior a 2 km², devendo, portanto, ser utilizada com cautela em áreas superiores, devido às simplificações inerentes ao método e à redução de sua precisão com o aumento da área de contribuição. Para o dimensionamento, adotaram-se tempos de retorno de 2 e 5 anos, compatíveis com sistemas de microdrenagem urbana em áreas residenciais, comerciais e de prédios públicos, conforme diretrizes do Plano Diretor de Drenagem (PARANÁ, 2007).



Figura 02: Área total de contribuição.
Fonte: Google Earth (2026).

A partir dessas definições, determinou-se o tempo de concentração (Tc), que representa o intervalo necessário para que toda a bacia contribua simultaneamente para o escoamento na seção de saída. Para o presente estudo, foi adotado um valor de Tc = 10 minutos. Esse valor é compatível com bacias urbanas de pequena extensão, nas quais o escoamento ocorre de forma rápida devido à elevada impermeabilização e à presença de sistemas de drenagem artificial. A adoção de um tempo de concentração reduzido reflete a resposta hidrológica rápida da bacia, sendo fundamental para a determinação da intensidade de precipitação associada.

Também foi adotado o coeficiente de escoamento superficial (C), que representa a fração da precipitação que contribui efetivamente para o escoamento superficial, foi adotado como 0,7. Esse valor é compatível com áreas urbanas com elevado grau de impermeabilização, conforme valores apresentados na literatura clássica de drenagem urbana (DNIT, 2005). A adoção de um coeficiente único para toda a bacia constitui uma simplificação inerente ao Método Racional, sendo adequada para análises preliminares e dimensionamento de sistemas de microdrenagem. Posteriormente, realizou-se a simulação da rede de drenagem com o auxílio do software Canal, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos DEA - UFV.

Por fim, foram definidos os critérios de dimensionamento dos condutos onde adotou-se um canal circular de concreto com coeficiente de rugosidade igual a n = 0,013, lâmina d'água máxima de 98% da seção transversal, condição que garante o funcionamento do conduto como escoamento livre, e declividade de 7,6%, correspondente ao trecho de maior declividade. A variável de projeto considerada foi o diâmetro da tubulação, sendo o dimensionamento realizado para configurações de 1 a 4 tubulações em paralelo.

Resultados e Discussão

Com adoção de tempo de concentração sendo 10 minutos foi realizada a determinação da intensidade da precipitação para os tempos de retorno de 2 e 5 anos. As intensidades obtidas foram de 119,40 mm/h para o período de retorno de 2 anos e 140,81 mm/h para 5 anos, representando cenários com diferentes níveis de criticidade e permitindo a avaliação do comportamento hidráulico do sistema em condições usuais e mais severas.

A partir desses dados, realizou-se a simulação das vazões para ambos os tempos de retorno em cada uma das zonas da bacia. Os valores de vazão obtidos estão apresentados na Tabela 1. Observa-se que, por se tratar de uma região predominantemente urbana, com baixa presença de áreas permeáveis, há uma contribuição significativa para a geração de escoamento superficial, resultando em valores elevados de vazão. Conforme ilustrado na Figura 1, a Zona 2 é a que apresenta maior contribuição.

Zona	Q (Tr = 5 anos) m³/s	Q (Tr = 2 anos) m³/s
Zona 1	7,037869	5,96768803
Zona 2	43,81783	37,15537271
Zona 3	19,36106	16,41723091
Zona 4	31,08938	26,36227308

Tabela 01: Valores de Vazão para os períodos de retorno.
Fonte: Autoria Própria.

Com base nas vazões calculadas, realizou-se o dimensionamento hidráulico da rede, considerando de 1 a 4 condutos circulares de concreto, com coeficiente de Manning n = 0,013. As simulações foram feitas com o auxílio do software SISCOOH, adotando como incógnitas a lâmina d'água e o diâmetro. A lâmina (γ_n) foi limitada a 98% da seção transversal, garantindo o escoamento livre, e utilizou-se declividade de 7,6%, correspondente ao trecho de maior inclinação.

A Tabela 2 apresenta os resultados para a Zona 2 (Figura X) para os tempos de retorno de 2 a 5 anos, que se destacou como a condição mais crítica do estudo, com velocidade de 14,142 m/s e número de Froude de 1,915, caracterizando escoamento supercrítico. Esse comportamento está associado à elevada impermeabilização da área, com predominância urbana, baixa presença de áreas verdes e localização em fundo de vale.

Já a Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para as Zonas 1, 3 e 4, considerando o tempo de retorno de 5 anos (situação mais crítica). Mesmo mais afastadas do fundo de vale, essas áreas ainda apresentam velocidades elevadas, próximas de 10 m/s, evidenciando a forte influência da urbanização no escoamento superficial.

Tr (anos)	Nº condutos	Vazão (m³/s)	Yn (m)	Decliv. (m/m)	n	D (m)	Yn/D (%)	Froude	Veloc. (m/s)
5	1	43,81783	1,9502	7,60%	0,013	1,99	98%	1,915	14,142
	2	21,90891	1,5092	7,60%	0,013	1,54	98%	1,834	11,892
	3	14,60594	1,2936	7,60%	0,013	1,32	98%	1,788	10,746
	4	10,95446	1,1564	7,60%	0,013	1,18	98%	1,756	9,999
2	1	37,15537	1,8326	7,60%	0,013	1,87	98%	1,896	13,571
	2	18,57769	1,3916	7,60%	0,013	1,42	98%	1,815	11,412
	3	12,38512	1,2152	7,60%	0,013	1,24	98%	1,77	10,312
	4	9,288843	1,0878	7,60%	0,013	1,11	98%	1,738	9,596

Tabela 02: Dimensionamento hidráulico para a Zona 2.
Fonte: SISCOOH.

Zona	Nº condutos	Vazão (m³/s)	D (m)	Froude	Veloc. (m/s)
1	1	7,037869	1	1,708	8,953
	2	3,5189346	0,77	1,636	7,529
	3	2,3459564	0,66	1,595	6,805
	4	1,7594673	0,6	1,567	6,331
3	1	19,36106	1,47	1,82	11,53
	2	9,680529	1,13	1,743	9,695
	3	6,453686	0,97	1,699	8,759

	4	4,840265	0,87	1,669	8,153
4	1	31,0893796	1,75	1,87	12,379
	2	15,5446898	1,35	1,795	10,913
	3	10,3631265	1,16	1,75	9,861
	4	7,7723449	1,04	1,719	9,177

Tabela 03: Dimensionamento hidráulico para as Zonas 1, 3 e 4 para um tempo de retorno de 5 anos. Fonte: SISCOOH.

Devido aos elevados valores de velocidade de escoamento obtidos nas simulações, associados a números de Froude superiores a 1, caracterizando regime supercrítico, verifica-se a necessidade da implementação de um sistema dissipador de energia ao longo da rede de drenagem.

No local da área de estudo, observa-se a presença de um dissipador de energia do tipo skinning flow, composto por duas tubulações com diâmetro de 600 mm. Durante a vistoria, não foram identificadas ligações clandestinas à rede de drenagem, indicando que o sistema opera isoladamente. Entretanto, a análise hidráulica demonstrou que esse sistema existente não possui capacidade suficiente para conduzir adequadamente as vazões de projeto associadas aos tempos de retorno de 2 e 5 anos. Dessa forma, torna-se necessária a revisão e adequação do sistema de drenagem existente, com o objetivo de garantir o correto funcionamento hidráulico e a dissipação adequada da energia do escoamento nas condições analisadas.



Figura 03: Dissipador skinning flow presente no local. Fonte: acervo dos autores (2026)

Considerações Finais

O presente estudo permitiu diagnosticar e propor uma solução técnica para a falha estrutural e hidráulica observada no sistema de controle de águas do município analisado. Por meio da caracterização hidrológica da bacia de 3,69 km², evidenciou-se que o alto grau de impermeabilização (C = 0,7) resulta em respostas hidrológicas rápidas e vazões de pico elevadas, especialmente na Zona 2, que apresentou a maior contribuição superficial.

A análise hidráulica realizada com o auxílio dos softwares Canal e SISCCOH foi determinante para comprovar a insuficiência do sistema de drenagem e dissipação existente. Verificou-se que as tubulações atuais de 600 mm não possuem capacidade de condução para os tempos de retorno de 2 e 5 anos, operando em regime supercrítico (Froude > 1) e com velocidades excessivas. Tais condições explicam os processos erosivos e alagamentos reportados no loteamento adjacente, evidenciando que a construção original, realizada sem supervisão técnica, era inadequada para a realidade hidrológica local.

O dimensionamento proposto, que contempla a adequação do número de condutos e a implementação de um dissipador de energia em escada, apresenta-se como uma solução eficaz para reduzir a energia cinética do escoamento e reconduzi-lo ao regime natural de forma segura. Essa intervenção é fundamental não apenas para a preservação do leito do rio a jusante, mas também para garantir a integridade das vias públicas e a segurança dos moradores da região.

Por fim, este trabalho ressalta a importância do rigor técnico e da aplicação de metodologias científicas no planejamento da infraestrutura urbana. A atuação da Empresa Júnior neste contexto demonstra como a parceria entre a universidade e a comunidade pode oferecer soluções de engenharia de baixo custo e alta precisão, mitigando riscos socioambientais e promovendo o desenvolvimento urbano resiliente.

Agradecimentos

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelo suporte acadêmico e infraestrutura que fundamentam nossa formação profissional. À Professora Doutora Andrea Sartori Jabur, pela orientação técnica precisa, incentivo à pesquisa e compartilhamento de conhecimentos essenciais para o desenvolvimento deste projeto. À Empresa Júnior Solução Jr., pela oportunidade de aplicar a engenharia em benefício da comunidade e pelo compromisso com a excelência técnica na resolução de problemas complexos de drenagem urbana.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2005. (Publicação IPR-715).

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. E-book. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=BPAtCQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 11 abr. 2026.

GONÇALVES, L. S. *Relações intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. Dissertação (Mestrado).

GOOGLE EARTH. *Software de geoprocessamento*. Disponível em: https://earth.google.com/. Acesso em: 22 mar. 2026.

LINSLEY, Ray K.; FRANZINI, Joseph B. *Engenharia de recursos hídricos*. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1979.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, n. 9, p. 860-869, set. 2004.

OLIVEIRA, C. V.; JABUR, A. S. Análise hidráulica do bueiro localizado no Ribeirão Barra Nova, Apucarana - PR. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA, 30., 2022, Foz do Iguaçu. *Anais...* [S. l.]: IAHR, 2022.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA). *Manual de drenagem urbana: Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba*. Curitiba, 2002. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao01.pdf. Acesso em: 22 mar. 2026.

RIBEIRO, Andressa Alves; SILVA, Rodrigo Coelho e. Tecnologias alternativas de drenagem urbana para o controle de inundações: revisão de literatura com foco na prevenção de tragédias urbana. REMUNOM - Revista Multidisciplinar do Norte de Minas, [S. l.], v. 9, n. 1, 2024. DOI: 10.61164/rmnm.v9i1.2834. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/2834. Acesso em: 11 abr. 2026.

SISCCOH. *Sistema para cálculos de componentes hidráulicos*. Versão 1.0. [S. l.], 2026.

TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DINIZ, H. N.; DIAS, N. W.; MATOS, F. C. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, v. 7, n. 2, 2012. Disponível em: http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.905. Acesso em: 11 abr. 2026.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 2001.

DIAGNÓSTICO, DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE SISTEMA HIDRÁULICO DE CONTROLE DE CHEIAS COM POLDER E RESERVAÇÃO NO BAIRRO SÃO BENTO, DUQUE DE CAXIAS, RJ, COM BASE EM MODELAGEM HIDRODINÂMICA QUASI-2D

1 Nichollas Schmidt Bastos Marques Pereira Santos, 2 Luiz Eduardo Siqueira Saraiva, 3 Matheus Martins de Sousa

1 Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: nichollas.smps@hotmail.com; 2 Escola Politécnica da UFRJ, e-mail: lessaraiva@poli.ufrj.br; 3 Programa de Engenharia Ambiental da UFRJ, e-mail: matheus@poli.ufrj.br

Palavras-chave: Drenagem urbana; Controle de cheias; Modelagem hidráulica.

Resumo

A recorrência de eventos de inundação em áreas urbanas densamente ocupadas evidencia a necessidade de soluções estruturais mais robustas para o controle de cheias. No bairro São Bento, em Duque de Caxias, a combinação entre elevada impermeabilização do solo e reduzida declividade topográfica favorece a concentração do escoamento superficial e a ocorrência de alagamentos recorrentes. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento de um sistema de pôlder, adotando como critério hidráulico uma borda livre de 0,5 m acima do nível d'água associado ao tempo de recorrência de 50 anos (TR50), assegurando simultaneamente atendimento ao evento de 100 anos (TR100). A abordagem metodológica fundamenta-se em modelagem hidrodinâmica quasi-bidimensional, utilizando o modelo ModCel, aplicado a uma sub-bacia urbanizada discretizada em células de escoamento interconectadas. Adicionalmente, são avaliadas alternativas de controle de cheias, contemplando diferentes configurações de reservatórios e a adoção de sistemas de bombeamento. Os cenários simulados são comparados com base na redução das áreas inundadas e dos níveis máximos de água. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos para a seleção de soluções mais eficientes, considerando desempenho hidráulico, limitações operacionais, viabilidade de implantação e potenciais implicações na qualidade da água em áreas urbanas consolidadas.

Abstract

The recurrence of flood events in densely urbanized areas highlights the need for more robust structural solutions for flood control. In the São Bento district, located in Duque de Caxias, the combination of high soil impermeability and low topographic gradient promotes surface runoff concentration and recurrent flooding. In this context, this study aims to design a polder system based on a hydraulic criterion that adopts a 0.5 m freeboard above the water level associated with a 50-year return period event (RP50), while simultaneously ensuring safety for the 100-year event (RP100). The methodological approach is based on quasi-two-dimensional hydrodynamic modeling using the ModCel model, applied to an urbanized sub-basin discretized into interconnected flow cells. Additionally, different flood control strategies are evaluated, including alternative reservoir configurations and pumping systems. The simulated scenarios are compared in terms of flood extent reduction and maximum water levels. The results provide technical support for selecting the most suitable solutions, considering hydraulic performance, operational constraints, implementation feasibility, and potential implications for water quality in urban areas.

Introdução

A ocorrência recorrente de enchentes e alagamentos em áreas urbanas constitui um dos principais desafios para a gestão da drenagem em municípios densamente ocupados, como Duque de Caxias. No bairro de São Bento, esses impactos vêm se manifestando de forma concreta e recente: durante o evento de chuvas intensas registrado em janeiro de 2026, moradores tiveram suas residências invadidas pela água, sofreram perdas materiais, enfrentaram interrupções no acesso a serviços básicos e dificuldades de mobilidade, chegando, em alguns casos, a permanecer temporariamente isolados. Episódios dessa natureza evidenciam a vulnerabilidade da população diante da insuficiência da infraestrutura existente, agravada pela urbanização acelerada e pela impermeabilização do solo, fatores que intensificam o escoamento superficial.

Além disso, as limitações das soluções convencionais — entre elas a canalização de cursos d'água — impõem desafios adicionais ao controle de cheias, uma vez que podem transferir impactos para jusante ou apresentar baixa sustentabilidade a longo prazo. Nesse contexto, este estudo realiza, para o bairro São Bento (Duque de Caxias, RJ), o dimensionamento de um sistema de polder associado à avaliação comparativa de alternativas de reservação e bombeamento, por meio de modelagem hidrodinâmica quasi-2D, com o objetivo de identificar soluções mais robustas para o controle de cheias em áreas urbanas de baixa declividade, considerando seus desdobramentos hidráulicos e operacionais em contextos de ocupação consolidada.

Área de Estudo

O bairro de São Bento, localizado no município de Duque de Caxias, insere-se integralmente na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu–Sarapuí, unidade caracterizada por intensa urbanização e limitações históricas na infraestrutura de drenagem. A escolha da área de estudo fundamenta-se na recorrência de eventos de inundação, amplamente documentados ao longo dos anos,

incluindo episódios recentes em que a população foi diretamente afetada por alagamentos persistentes. Esse contexto evidencia a necessidade de compreender, de forma integrada, a interação entre condicionantes naturais e processos antrópicos na dinâmica das cheias, contribuindo para a avaliação da vulnerabilidade hidrológica em setores urbanizados da Baixada Fluminense.

Do ponto de vista fisiográfico, a bacia apresenta baixas cotas altimétricas, relevo predominantemente plano e declividades reduzidas, condições que limitam o escoamento das águas pluviais e favorecem o acúmulo superficial. Esses fatores são intensificados pela elevada impermeabilização do solo urbano e pelas alterações na rede de drenagem, resultando em rápida geração de escoamento e sobrecarga dos sistemas de micro e macrodrenagem. Adicionalmente, a baixa declividade dos cursos d'água e a ocorrência de efeito de remanso contribuem para a permanência prolongada da lâmina d'água em áreas deprimidas. Como consequência, observam-se alagamentos recorrentes, especialmente em setores de menor altitude, evidenciando a forte influência conjunta de fatores naturais e urbanos na configuração do risco hidrológico local.

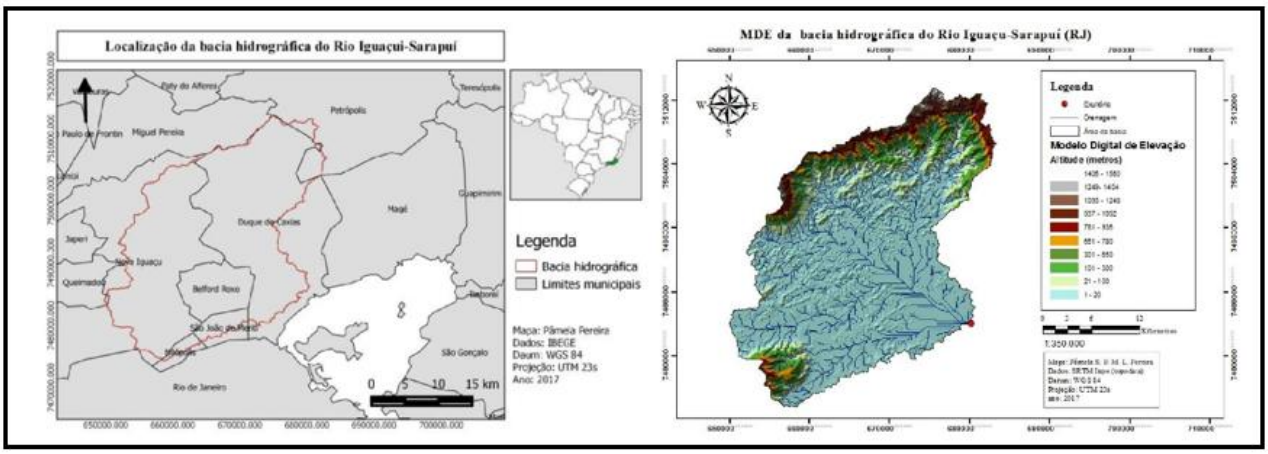


Figura 01: Caracterização e Perfil Topográfico da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí. Fonte: PEREIRA; MENDES (2019)

A sub-bacia modelada abrange aproximadamente 2,9 km² do bairro de São Bento, compreendendo toda a área urbanizada situada à esquerda da Rua Castro Alves até a divisa com o município de Belford Roxo, na Rua Alexandrino Pinto. Adicionalmente, inclui cerca de 1,4 km² do bairro Parque Fluminense, ambos pertencentes ao município de Duque de Caxias. No total, estima-se que 38.971 pessoas residam na área analisada, com base nos dados mais recentes dos setores censitários do IBGE (Censo Demográfico 2022), conferindo elevado detalhamento e confiabilidade à análise da distribuição populacional.

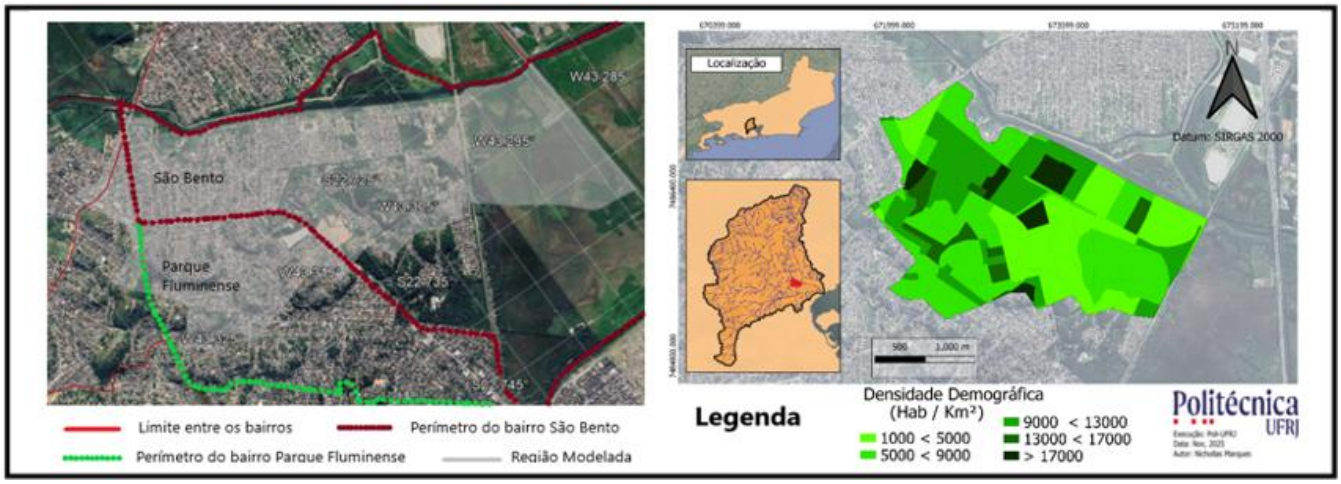


Figura 02: Localização da área de estudo e demografia. Fonte: Elaboração própria com base em dados do IBGE (2022)

Material e Métodos

A simulação hidrodinâmica foi realizada por meio do software ModCel, que consiste em um modelo quasi-2D em multicamadas baseado na discretização da bacia hidrográfica em células de escoamento interconectadas (Miguez et al., 2017). Cada célula representa um compartimento homogêneo, caracterizado por parâmetros geométricos, hidráulicos e topográficos, tendo seu comportamento definido a partir de um centro hidráulico no qual são atribuídas cotas, áreas e capacidades de armazenamento. A interação entre células ocorre por meio de ligações hidráulicas, nas quais o escoamento é descrito pelas equações de Saint-Venant, permitindo a simulação integrada do fluxo em canais, planícies de inundação e áreas urbanizadas.

No presente estudo, foi utilizado o modelo da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu–Sarapuí, composto por 1598 células, incluindo 58 adicionais para detalhamento do bairro São Bento. Destas, 37 foram classificadas como células de planície (tipo 2),

associadas ao armazenamento temporário, e 21 como células de canal (tipo 0), representando o escoamento confinado. Essa discretização permitiu o refinamento da representação local sem comprometer a consistência do modelo global, possibilitando a simulação de cenários de precipitação, identificação de áreas críticas de inundação, estimativa de níveis máximos e avaliação de alternativas de controle de cheias. A calibração dos parâmetros e a definição dos eventos de precipitação adotados basearam-se em aplicações previamente validadas para a bacia Iguaçu–Sarapuí, com o modelo de base calibrado por Marques et al. (2017) e posteriormente validado com eventos reais por Saraiva et al. (2025), com boa concordância entre níveis simulados e observados. A divisão das células resulta do cruzamento entre a topografia, representada pelas curvas de nível, e a malha urbana.

.

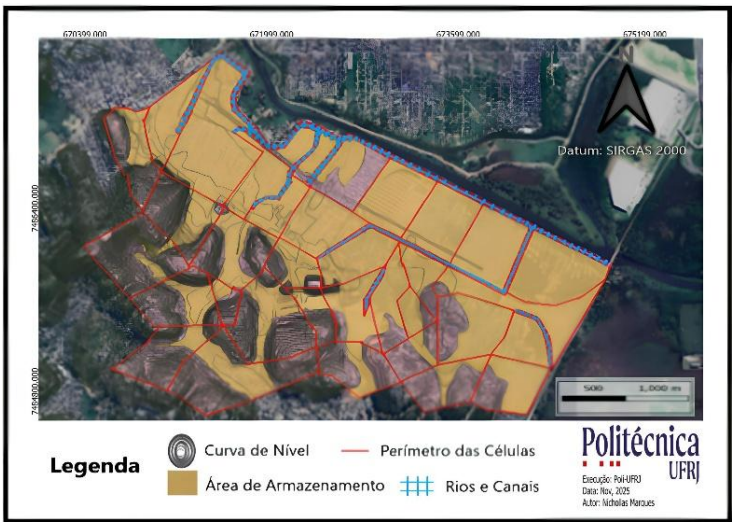


Figura 03: Discretização espacial e parametrização das células de escoamento. Fonte: Elaboração própria, com base topográfica extraída da Fundação CIDE (1996).

Modelagem Hidrológica

No processo de modelagem, foi atribuído a cada célula um coeficiente de deflúvio (*c*), representando a fração da precipitação convertida em escoamento superficial direto em função do uso do solo e do grau de impermeabilização. Adotou-se uma abordagem hidrológica simplificada do tipo chuva–vazão, voltada à estimativa das vazões geradas. Os valores de *c* foram definidos com base no Manual de Hidrologia Básica do DNIT (IPR-715, 2005), considerando faixas típicas do Método Racional: elevadas para áreas densamente urbanizadas (≈0,70–0,95), intermediárias para áreas residenciais (≈0,30–0,50) e reduzidas para superfícies pouco impermeabilizadas (≈0,10–0,30). A distribuição espacial desses coeficientes reflete a heterogeneidade da ocupação na bacia, com maiores valores associados a setores mais impermeáveis.

Para as 37 células do tipo 2, correspondentes a planícies com comportamento de reservação no bairro São Bento, os coeficientes foram atribuídos individualmente conforme a ocupação predominante, resultando em média ponderada de $c = 0{,}603$, compatível com um cenário de urbanização significativa. A análise integrada dos campos de coeficiente de deflúvio e de elevação indica que áreas com maiores valores de c coincidem com setores mais urbanizados, enquanto a topografia condiciona o direcionamento e a concentração dos fluxos, com tendência de acúmulo nas porções de menor altitude, configurando uma resposta hidrológica rápida, com maior geração de escoamento superficial e maior suscetibilidade a processos de alagamento.

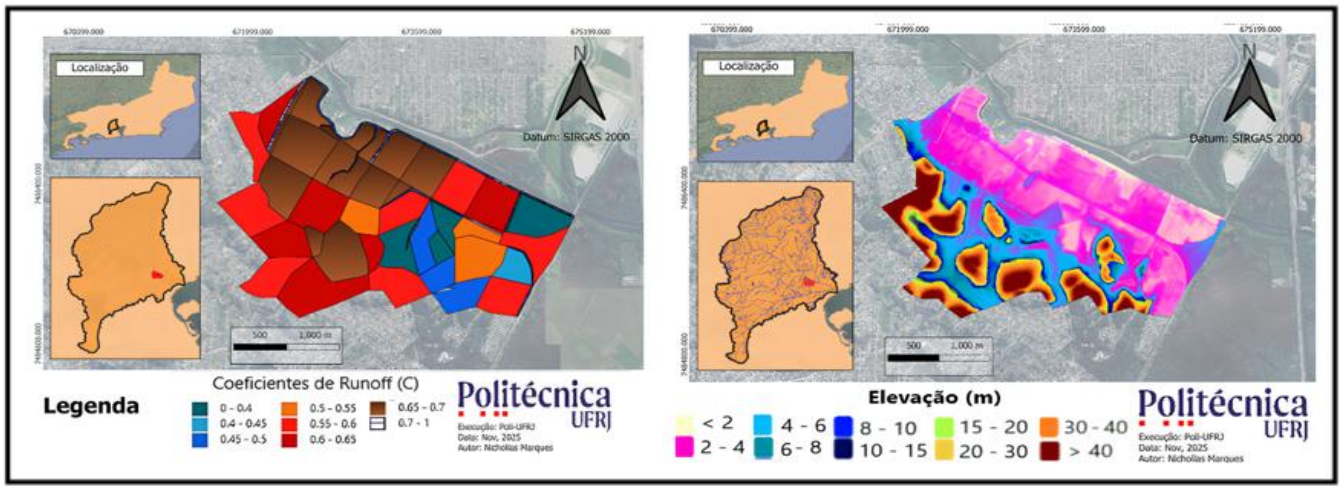


Figura 04: Distribuição dos coeficientes de deflúvio (C) e da elevação, associada ao potencial de geração e acúmulo de escoamento superficial. Fonte: Elaboração própria , fundamentada nas diretrizes de DNIT (2005, IPR-715)

Modelagem Hidrodinâmica

Na modelagem hidrodinâmica do escoamento superficial, adotou-se o coeficiente de rugosidade de Manning (n) para representar a resistência ao fluxo imposta pelas condições dos pavimentos urbanos. Os valores — n = 0,06 (avenidas largas), 0,07 (ruas comuns) e 0,08 (vias com pavimento degradado) — refletem o aumento progressivo da rugosidade associado ao estado de conservação e às irregularidades do piso. Superfícies lisas favorecem o escoamento, resultando em menores valores de n, ao passo que defeitos como rachaduras e buracos elevam a resistência hidráulica e reduzem a velocidade do fluxo.

Esses valores são coerentes com faixas típicas adotadas para escoamento superficial em áreas urbanas, nas quais a rugosidade efetiva tende a ser superior à observada em canais regulares, em função da baixa lâmina d'água e da presença de obstáculos. Assim, a distribuição espacial do coeficiente de Manning permite representar diferenças na propagação do escoamento, influenciando a velocidade, o tempo de resposta hidrológica e o potencial de acúmulo superficial na área modelada..

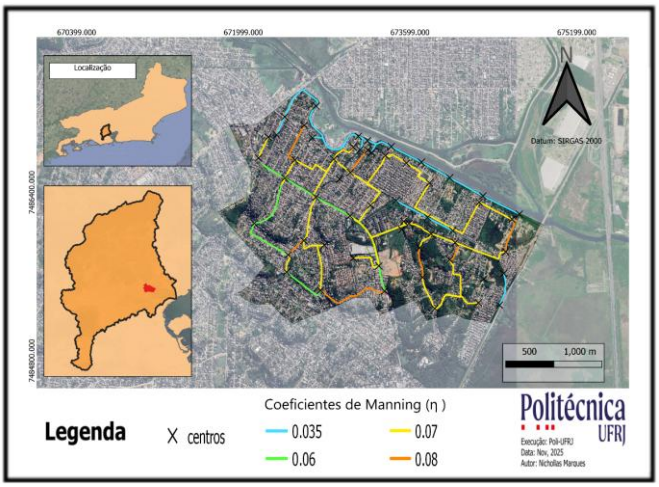


Figura 05: Distribuição espacial do coeficiente de Manning (n) em função das tipologias de superfície e vias urbanas. Fonte: Elaboração própria, conforme critérios de FHWA (2024), HEC-22 – Urban Drainage Design.

Diagnóstico TR25 e TR50

Para um evento de chuva com tempo de recorrência de 25 anos, estima-se que uma área ligeiramente superior a 1,3 km² seja inundada com lâmina d'água mínima de 0,30 m. Para o evento de 50 anos (TR50), observa-se intensificação do cenário, com ampliação da mancha e aumento das profundidades, de modo que grande parte das áreas urbanas de uso comum passa a apresentar lâminas superiores a 0,75 m, incluindo a região da Praça do Beira Rio, área pública de lazer do bairro. As inundações concentram-se em setores mais impermeabilizados, como o entorno da oficina Delta Comerc, caracterizados pela predominância de edificações térreas com cotas de piso próximas ao nível do terreno.

Projeta-se que ao menos 10 mil habitantes sejam afetados por lâminas iguais ou superiores a 0,30 m, com ocorrência pontual de níveis próximos a 1,0 m, sendo esse impacto substancialmente ampliado no cenário TR50. Nessas condições, as profundidades atingem patamares críticos para a mobilidade urbana, com inviabilização do tráfego de veículos leves, comprometimento do acesso a serviços essenciais e potencial intrusão de água nas edificações, configurando um evento de alto impacto, com danos estruturais significativos, interrupção de atividades econômicas e riscos à segurança da população, especialmente de grupos mais vulneráveis, como crianças e idosos.

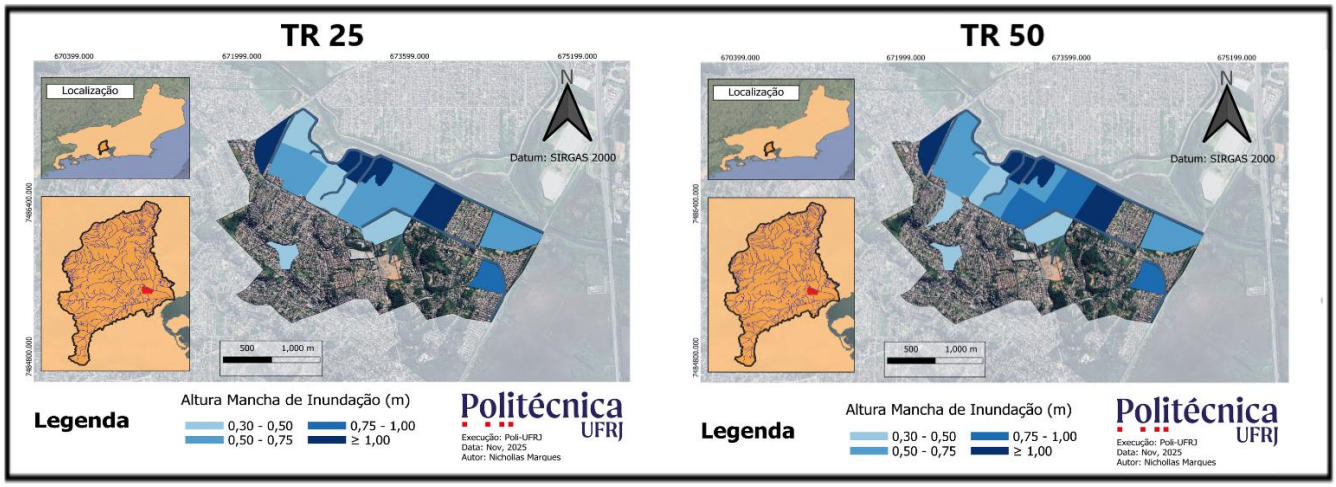


Figura 06: Manchas de inundação (TR25 e TR50) na situação atual da área modelada. Fonte: Elaboração própria.

Controle de cheias via polder

O sistema proposto fundamenta-se no princípio de funcionamento de um polder, no qual a área protegida é isolada hidraulicamente do corpo hídrico responsável pelas inundações por meio de diques. Paralelamente, são implantados dispositivos de controle destinados a drenar, armazenar e, por fim, conduzir a água precipitada na região interna da área protegida. Nesse contexto, deverá ser construído um dique de proteção contra as cheias do Rio Iguaçu e, internamente, um canal auxiliar com largura compatível à do canal existente (entre 11 e 12 metros), estruturando um eixo contínuo de drenagem ao longo da área de estudo.

Dimensionamento Altura do Polder

O dimensionamento do dique foi inicialmente realizado com base na equação de Manning, sendo posteriormente ajustado por meio de modelagem hidrodinâmica, incorporando efeitos de remanso, variação temporal das cheias e condições de contorno mais realistas. Verifica-se a influência de componentes barotrópicos na variação de cotas ao longo do trecho, com valores aproximados de -0,5 m em relação ao nível do mar na região a jusante, próxima à Rua Castro Alves, e de +0,2 m na extremidade a montante, nas proximidades da Rua Beira Rio Novo São Bento. Nesse contexto, foram previstas duas comportas com abertura de 1 metro, posicionadas de forma a controlar o escoamento e assegurar o funcionamento adequado do polder frente às oscilações de nível no corpo hídrico receptor.

A cota de coroamento do polder no Rio Iguaçu foi definida a partir de dois critérios hidráulicos complementares: (i) adoção de borda livre mínima de 0,50 m acima do nível associado ao evento com tempo de recorrência de 50 anos (TR50); e (ii) garantia de que essa cota permaneça superior ao nível máximo correspondente ao TR100. Esse critério mostrou-se suficiente para todos os trechos do dique, garantindo margem de segurança frente às condições simuladas. Como resultado, observam-se diferenças de altura ao longo do sistema, com valores aproximados de 2,9 m na jusante e 3,8 m na montante. No canal auxiliar, os níveis máximos simulados para TR50 atingem cerca de 0,6 m a jusante e permanecem abaixo de 1,5 m a montante, evidenciando a variação longitudinal da lâmina d'água.

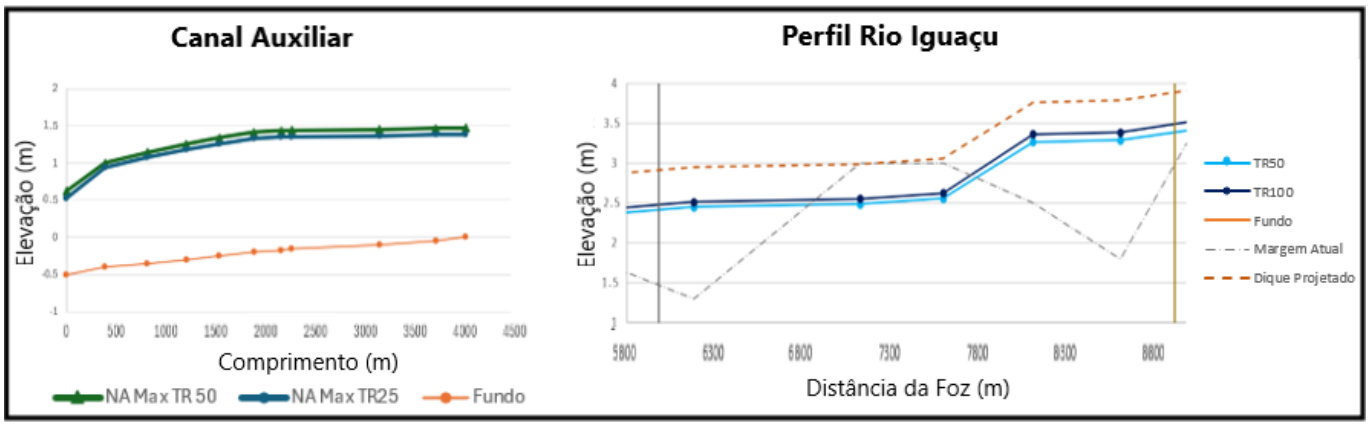


Figura 07: Perfis longitudinais de elevação no canal auxiliar e no Rio Iguaçu, incluindo níveis d'água para TR25 e TR50, fundo do canal e cota do dique projetado, utilizados no dimensionamento do sistema polder. Fonte: Elaboração própria.

Canal Auxiliar

O trecho pré-existente corresponde a um canal natural superficial, parcialmente inserido na malha urbana, e foi integralmente mantido e incorporado ao sistema. Em seu segmento sul, esse canal desenvolve-se no sentido sul–norte, adjacente à Rua Alexandrino Pinto — que se origina transversalmente à Avenida Governador Leonel de Moura Brizola — tornando-se visível após ultrapassar a Rua P. Ferreira. No segmento norte, o canal apresenta direção oeste–leste, acompanhando a Travessa Presidente Kennedy, que passa a constituir a Rua Beira Rio Novo São Bento, estendendo-se até o término dessa via, nas proximidades do estabelecimento Chiquinho Forrações.

A partir desse ponto, onde o canal natural se interrompe, propõe-se a implantação do canal auxiliar, mantendo a mesma direção e sentido de escoamento, de forma a garantir a continuidade hidráulica do sistema. Esse novo trecho estende-se até a região inicial da Rua Beira Rio, desenvolvendo-se parcialmente ao longo das adjacências da Rua Otacílio Pereira Bastos e, posteriormente, acompanhando a Rua Beira Rio em toda a sua extensão, além de atravessar um segmento intermediário sem via definida, onde, ainda assim, se estabelece o traçado hidráulico proposto. Ao final, o canal conecta-se à região da Rua Castro Alves, nas proximidades da saída do sistema. Dessa forma, estabelece-se uma continuidade hidráulica que abrange praticamente toda a área drenada, integrando o canal natural existente à infraestrutura proposta. Ressalta-se que essa configuração constitui o arranjo base do sistema, comum aos cenários simulados, englobando o canal auxiliar, as comportas e as estruturas de condução, ao passo que o bombeamento é considerado apenas como medida complementar em cenários específicos.

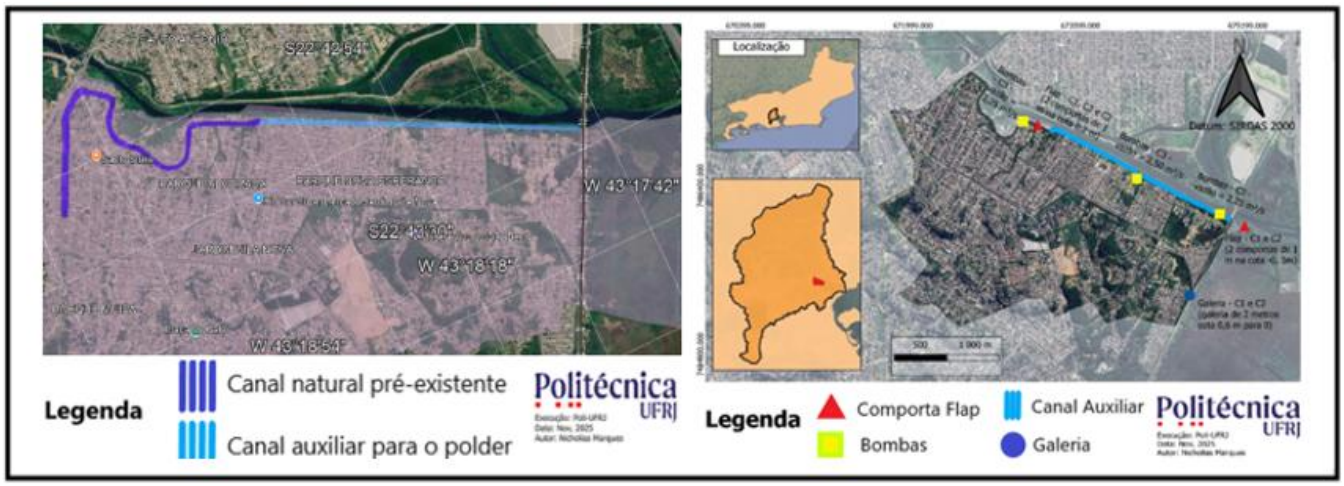


Figura 08: Arranjo hidráulico do sistema de polder proposto, com canal auxiliar, estruturas de controle e integração ao canal existente. Fonte: Elaboração própria. Nota: a largura dos canais foi ampliada para exibição, não estando em escala.

Cenários e Alternativas

Os aportes gerados durante eventos de cheia tendem a exceder a capacidade de regularização do polder previamente descrito, tornando necessária a incorporação de uma solução de controle volumétrico para limitar a elevação dos níveis internos e garantir a operação adequada do sistema. Nesse contexto, foram avaliadas três alternativas: (i) implantação de um reservatório único de grande porte, com área aproximada de 59 ha, atuando isoladamente no amortecimento dos picos de vazão; (ii) configuração combinada, com o reservatório principal associado a uma unidade complementar de cerca de 3,83 ha, favorecendo a distribuição espacial do armazenamento; e (iii) adoção de sistema de bombeamento, composto por duas unidades nas extremidades, com vazão de 2,25 m³/s cada, e uma unidade central de 2,5 m³/s, operando de forma modulada conforme os níveis internos.

Ressalta-se que, nesta última alternativa, não se utiliza o reservatório de grande porte, sendo empregado exclusivamente o reservatório de pequeno porte (comum à alternativa ii), que passa a atuar como acumulação intermediária vinculada ao sistema de recalque. Assim, definem-se três arranjos distintos: reservação concentrada, reservação distribuída e drenagem forçada com armazenamento reduzido. O reservatório principal foi implantado em área não ocupada à direita da Rua Castro Alves, caracterizada por relevo plano, baixa variação altimétrica e mínima interferência antrópica, mantendo afastamento de segurança em relação à Estação Reguladora Caxias. Por sua vez, o reservatório complementar foi inserido em um dos poucos espaços disponíveis na área urbanizada, delimitado pelo Condomínio Galileia (Rua Doze de Julho), pelo clube Piscina Vila Rica, pela Igreja Célula e pelo canal auxiliar, evidenciando condicionantes urbanas.

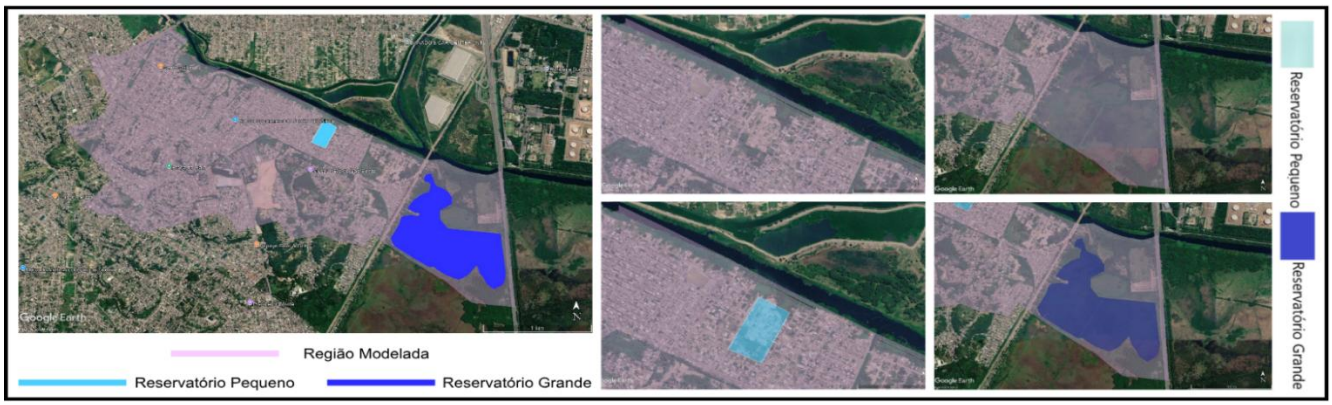


Figura 09: Localização e configuração dos reservatórios propostos, incluindo reservação concentrada (reservatório único) e distribuída (principal e complementar). Fonte: Elaboração própria.

Reservação concentrada em unidade externa

Os resultados obtidos para o cenário de precipitação com tempo de recorrência de 50 anos (TR50) demonstram que a adoção do reservatório proposto promove redução significativa da área inundada, restringindo os alagamentos a faixas pontuais. As lâminas d'água permanecem abaixo de 0,5 m em praticamente toda a área modelada, com exceção de um trecho estreito adjacente ao Rio Iguaçu, nas imediações do restaurante Point da Picanha. Esse desempenho representa ganho expressivo de segurança hidráulica frente ao cenário de referência, que apresentava extensas áreas acima de 1,0 m. A análise diferencial da lâmina d'água confirma reduções consistentes, superiores a 0,30 m em todas as áreas críticas previamente identificadas no diagnóstico, evidenciando a efetividade da reservação hidráulica tanto na mitigação das cheias quanto na diminuição das profundidades máximas observadas.

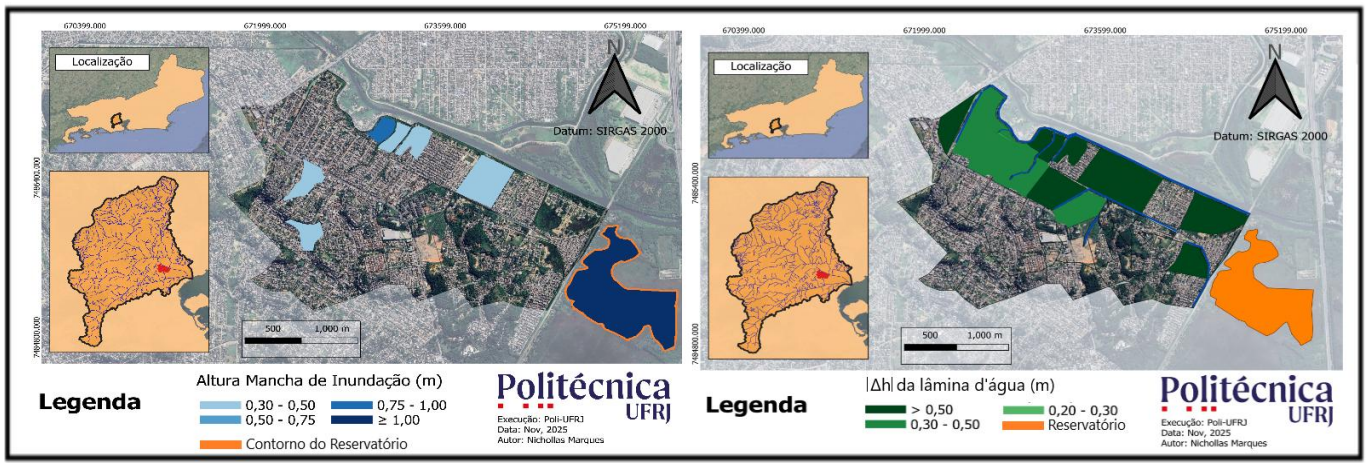


Figura 10: Mancha de inundação (TR50) e variação da lâmina d'água (|Δh|) em relação à condição inicial, considerando a alternativa de reservação concentrada por reservatório de grande porte. Fonte: Elaboração própria.

Reservação distribuída com unidade complementar

No cenário que incorpora um reservatório externo associado a uma unidade interna, as alterações em relação à condição anterior concentram-se sobretudo na área adjacente ao reservatório complementar. Essa região, marcada por ocupação urbana consolidada e onde se localiza a instituição Sociedade Educativa Paraíso do Saber, apresentava antes lâminas d'água acima de 0,30 m no cenário anterior, enquanto no diagnóstico inicial superavam 1,0 m, considerando-se o tempo de recorrência de 50 anos (TR50). Com a inclusão do reservatório interno, observa-se a eliminação das manchas de inundação nesse setor, indicando que os volumes afluentes passam a ser devidamente amortecidos e drenados. Nas demais porções da área modelada não se verificam mudanças no padrão de inundação, evidenciando que o efeito da solução se restringe às imediações da estrutura implantada, com reduções de igual magnitude nas demais áreas críticas apontadas no diagnóstico. A análise diferencial indica que, na adjacência do reservatório, as reduções são relativamente menores quando comparadas ao diagnóstico inicial, mas ainda significativas em relação ao cenário anterior, evidenciando a importância de uma drenagem eficaz em área destinada ao ensino infantil.

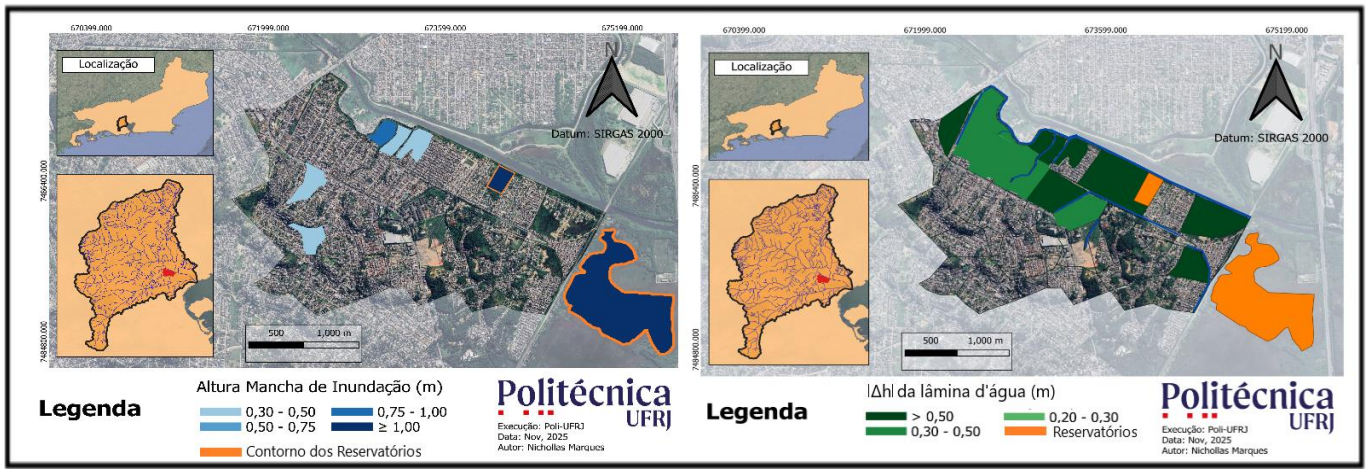


Figura 11: Mancha de inundação (TR50) e variação da lâmina d'água (|Δh|) em relação à condição inicial, adotando reservação concentrada por reservatório de grande porte associado a unidade interna. Fonte: Elaboração própria.

Sistema de bombeamento associado à reservação complementar

No cenário com adoção exclusiva do sistema de bombeamento associado ao reservatório de pequeno porte, observa-se desempenho superior para o evento com tempo de recorrência de 25 anos (TR25), apresentando as menores extensões de mancha de inundação entre as alternativas avaliadas. Esse resultado decorre da elevada capacidade de evacuação forçada, que, para eventos de menor magnitude, é suficiente para compensar a limitação volumétrica do sistema de armazenamento. Entretanto, para o evento com tempo de recorrência de 50 anos (TR50), o desempenho torna-se equivalente ao obtido na alternativa com um único reservatório de grande porte e inferior à solução combinada (reservatório grande + pequeno), conforme indicado também pela análise diferencial, indicando limitação operacional frente a maiores volumes afluentes. Do ponto de vista de engenharia, trata-se ainda da alternativa mais onerosa, tanto em termos de implantação quanto de operação e manutenção, envolvendo custos energéticos contínuos, necessidade de sistemas redundantes e maior suscetibilidade a falhas eletromecânicas. Dessa forma, embora apresente elevada eficiência em eventos mais frequentes, sua confiabilidade global e custo-benefício tendem a ser menos favoráveis quando comparados às soluções baseadas predominantemente em armazenamento hidráulico.

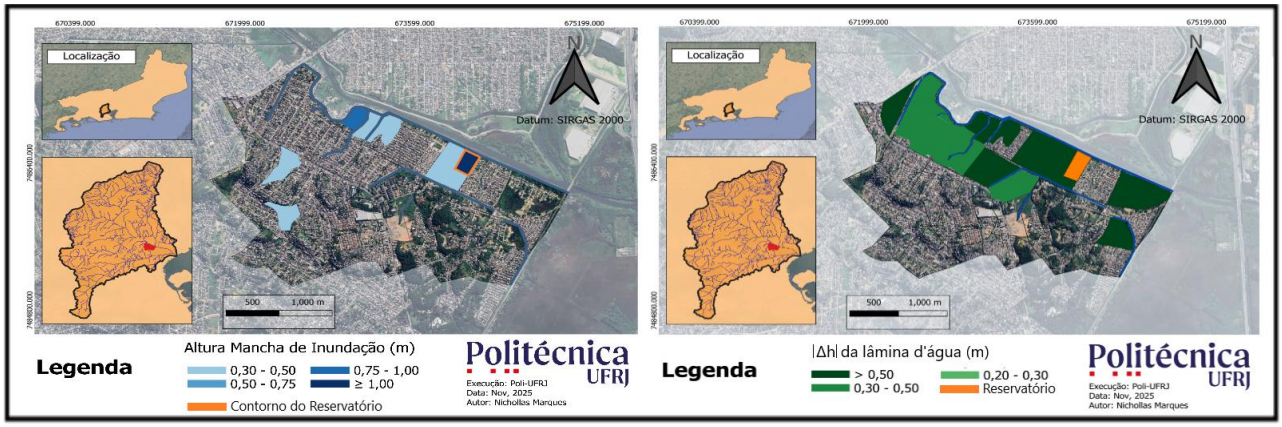


Figura 12: Manchas de inundação (TR50) e variação da lâmina d'água (|Δh|) em relação à condição inicial, adotando drenagem forçada por bombeamento associada a reservatório de pequeno porte. Fonte: Elaboração própria.

Comentários Finais

Os resultados evidenciam que a adoção de soluções de reservação hidráulica, integradas ao sistema de polder proposto, constitui a alternativa mais eficiente e robusta para o controle de cheias na localidade estudada. As simulações hidrodinâmicas indicam reduções expressivas na área inundada e nas profundidades máximas, com destaque para a configuração com reservatórios — especialmente a abordagem combinada —, que apresentou o melhor desempenho global. Em contraste, o uso de bombeamento, embora eficiente para eventos de menor magnitude, revelou limitações operacionais em cenários críticos, além de maior complexidade e custo de implantação, operação e manutenção. Dessa forma, ainda que sujeitos a incertezas inerentes à parametrização indireta com uso de dados secundários, conclui-se que, sob as óticas técnico-econômica e de resiliência sistêmica, as estratégias de armazenamento hidráulico associadas ao polder são mais adequadas para aplicação em áreas densamente ocupadas e com baixa declividade, como a porção mais urbanizada do bairro São Bento (Duque de Caxias–RJ) modelada.

Adicionalmente, no âmbito da gestão integrada, a adoção de reservatórios apresenta vantagens também sob a perspectiva da qualidade da água. A análise, com base em condições extrapoladas da estação O14 – Vila Sarapuí (INEA/RJ), indica que o Rio Iguaçu no trecho estudado apresenta elevada carga orgânica e sólidos em suspensão, condição em que a reservação pode favorecer a melhoria de parâmetros físico-químicos por sedimentação. Assim, os resultados sugerem benefícios potenciais tanto na mitigação de cheias quanto nas condições ambientais do rio adjacente, aspecto que ainda demanda avaliação em modelagens integradas, sem substituir intervenções estruturais de saneamento básico, essenciais à sustentabilidade urbana.

Referências Bibliográficas

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). (2005). *Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem*. Publicação IPR-715. Rio de Janeiro: DNIT.

FUNDAÇÃO CENTRO DE INFORMAÇÕES E DADOS DO RIO DE JANEIRO (CIDE). (1996). *Base cartográfica e topográfica do rio Botas (escala 1:10.000 e 1:2.000)*. Rio de Janeiro: CIDE.

MARQUES, L. S.; SOUSA, M. M.; MIGUEZ, M. G.; MAGALHÃES, P. C.; OLIVEIRA, L. F. G. S.; ARRAIS, C. M.; BIGATE, I. L.; VERÓL, A. P.; OLIVEIRA, A. K. B. (2017). *Elaboração e calibração de um modelo hidrodinâmico para simulação de cheias fluviais na bacia dos rios Iguaçu e Sarapuí com uso do MODCEL*. In: Anais XXII SBRH, Florianópolis, nov. 2017.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; SOUSA, M. M. (2017). *Urban flood simulation using MODCEL – an alternative quasi-2D conceptual model*. *Water (Switzerland)*, v. 9, n. 6. DOI: 10.3390/w9060445.

PEREIRA, P. S. P. M. L.; MENDES, L. D. (2019). *Morfometria de bacia hidrográfica urbanizada: uma análise do Rio Iguaçu-Sarapuí, na Baixada Fluminense (RJ), para avaliação de parâmetros de suscetibilidade à ocorrência de enchente e inundação*. *Revista Continentes*, n. 13, p. 34–48.

SARAIVA, L. E. S.; CEZANA, L. T. A.; MEDEIROS, V. S. B.; MELLO NETO, H.; MAGALHÃES, P. M. C.; BATTEMARCO, B. P.; MIGUEZ, M. G.; SOUSA, M. M. (2025). *Calibração e validação de modelo hidrodinâmico para simulação de cheias urbanas em Nova Iguaçu-RJ*. In: Anais XXVI SBRH, Vitória-ES, nov. 2025.

UNITED STATES. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). (2024). *Urban Drainage Design*. Hydraulic Engineering Circular No. 22 (HEC-22). Publication No. FHWA-HIF-24-006. Washington, D.C.

MODELAGEM HIDROLÓGICA APLICADA À DRENAGEM URBANA PARA GESTÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM TAPEROÁ/PB

1 Francisco de Assis Correia Diniz Filho, 2 José Matheus da Silva Miranda, 3 Joab Kleber Lucena Machado, 4 Aurea Kelly Jordão Borges de Araújo, 5 Sonaly Rodrigues Felix, 6 Dayse Luna Barbosa, 7 Andréa Carla Lima Rodrigues, 8 Mônica de Amorim Coura

1 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: franciscofilhocorreiatpb@gmail.com; 2 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: matheus45sm@gmail.com; 3 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: joabmachado@gmail.com; 4 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: engaureajborges@gmail.com;5 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: felix.sonaly6@gmail.com; 6 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail:dayseluna@yahoo.com.br;7 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail:andreaufcg@gmail.com; 8 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e-mail: macoura1@yahoo.com.br

Palavras-chave: *SWMM*; Bacias urbanas; Escoamento superficial.

Resumo

O manejo inadequado das águas pluviais em áreas urbanas tem se intensificado em função da urbanização desordenada e da ocorrência de chuvas mais concentradas, especialmente no Semiárido brasileiro. Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento hidrológico e estratégias de manejo da drenagem urbana no município de Taperoá/PB, classificado como de pequeno porte, utilizando o modelo *Storm Water Management Model (SWMM)*. A metodologia incluiu a caracterização da área de estudo, a delimitação da bacia de contribuição e a definição de chuvas de projeto a partir de curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF), considerando tempos de retorno de 10 e 50 anos. Foram avaliados três cenários: condição atual, implantação de bacias de infiltração e solução combinada com bacias de infiltração e cisternas residenciais. Os resultados indicaram que as bacias de infiltração propostas promoveram redução de aproximadamente 10% no pico de vazão, enquanto o cenário combinado apresentou redução de até 50%, além de aumento no tempo de resposta da bacia. Conclui-se que a adoção de técnicas de baixo impacto, associadas à modelagem computacional, constitui estratégia eficaz para a mitigação de impactos hidrológicos, contribuindo para o planejamento urbano e a gestão de águas pluviais em municípios do Semiárido.

Introdução

A urbanização tem promovido profundas transformações no ciclo hidrológico natural, especialmente em áreas urbanas, onde a impermeabilização do solo altera significativamente os processos de infiltração, armazenamento e escoamento das águas pluviais. Como consequência, observa-se o aumento do escoamento superficial, a redução do tempo de concentração das bacias e a intensificação dos picos de vazão, fatores diretamente associados à ocorrência de alagamentos, enxurradas e processos erosivos nas cidades (Tucci, 2012; Fletcher *et al*., 2015; Moura *et al*., 2020).

No Brasil, tais problemas são agravados pela ocorrência de precipitações intensas e concentradas em curtos períodos, características do regime climático tropical. Os eventos extremos têm provocado impactos expressivos em áreas urbanas, resultando em perdas humanas, danos à infraestrutura e elevados prejuízos econômicos. De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, mais de 25 mil eventos hidrológicos foram registrados entre 1991 e 2023, sendo a maioria associada a chuvas intensas (CEPED/UFSC, 2023).

O desafio torna-se ainda maior no Semiárido brasileiro, onde o regime pluviométrico é marcado pela elevada irregularidade, longos períodos de estiagem e concentração das chuvas em poucos eventos ao longo do ano (SUDENE, 2017; EMBRAPA, 2020). Essa dinâmica favorece a ocorrência de escoamentos superficiais rápidos e intensos, capazes de gerar enxurradas e provocar danos à infraestrutura urbana. Tais impactos são potencializados em municípios de pequeno porte, que frequentemente apresentam limitações técnicas e financeiras para a implantação e manutenção de sistemas de drenagem adequados (ANA, 2022).

Diante desse cenário, é fundamental a adoção de estratégias integradas de planejamento e gestão das águas pluviais, que combinem soluções estruturais e medidas de controle na fonte. Nesse sentido, destacam-se as práticas baseadas em infraestrutura verde e nas técnicas de baixo impacto, conhecidas como *Low Impact Development (LID)*, que buscam promover a infiltração, retenção e armazenamento das águas pluviais próximas ao local de sua geração, contribuindo para a mitigação dos impactos do escoamento superficial (Tucci, 2005; Wilken, 2018).

Complementarmente, ferramentas de modelagem hidrológica têm se consolidado como importantes instrumentos de apoio à tomada de decisão. Entre as ferramentas já consolidadas pode-se citar o modelo *Storm Water Management Model (SWMM)*, desenvolvido pela *Environmental Protection Agency (EPA)*, que possibilita a simulação de diferentes cenários de drenagem urbana, permitindo analisar o comportamento hidrológico das bacias e avaliar a eficiência de medidas de controle do escoamento superficial.

Portanto, realizou-se a modelagem da drenagem pluvial de uma área urbana no município de Taperoá, localizado na região do Cariri paraibano. A área foi selecionada por apresentar elevado grau de impermeabilização e recorrência de problemas relacionados ao escoamento superficial, como alagamentos e enxurradas durante eventos de chuva intensa, além de limitações

na infraestrutura de drenagem. Por representar a realidade de municípios de pequeno porte do Semiárido, a área constitui um estudo de caso relevante para a avaliação de estratégias de manejo de águas pluviais. Assim, a pesquisa busca analisar o comportamento hidrológico da área de contribuição e avaliar o desempenho de medidas de controle por meio de simulações no modelo *SWMM*, contribuindo para a compreensão dos processos hidrológicos e para o planejamento e a gestão sustentável das águas pluviais em contextos semelhantes.

Materiais e métodos

O estudo foi desenvolvido a partir de uma abordagem metodológica estruturada em etapas sequenciais, envolvendo caracterização da área, análise pluviométrica, definição da chuva de projeto e modelagem hidrológica, seguindo o detalhamento expresso na Figura 01.

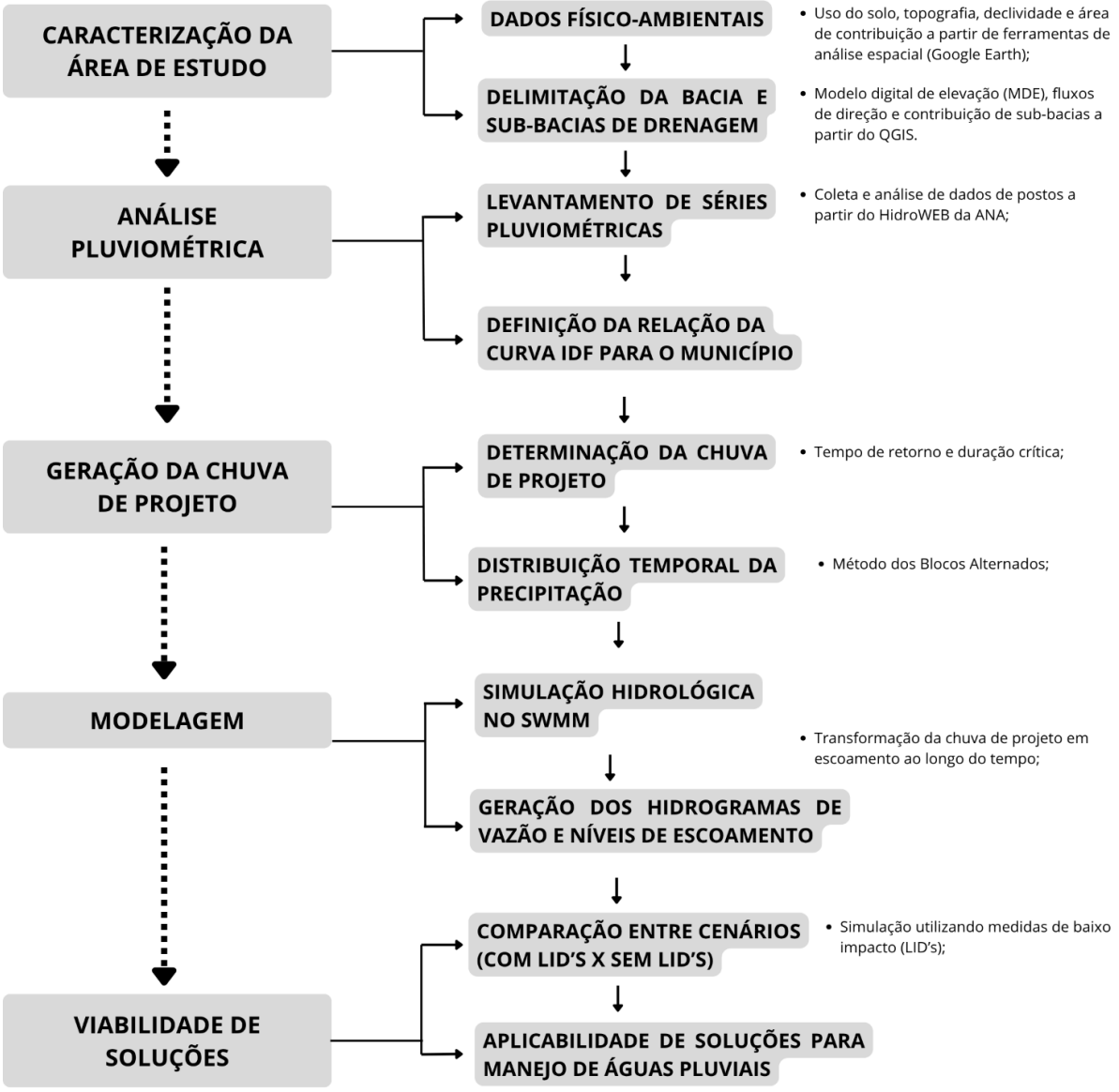


Figura 01: Esquema Metodológico da Pesquisa.
Fonte: Autores (2026)

Área de Estudo

Situado na mesorregião do Cariri paraibano, em ambiente semiárido (Figura 02), o município de Taperoá/PB integra a sub-bacia do Rio Taperoá, pertencente à bacia do Rio Paraíba, que abrange área superior a 5.000 km² e população de mais de 200 mil habitantes. O município apresenta capacidade populacional de 15.068 habitantes com taxa de urbanização superior a 68%, conforme o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022), e clima do tipo BSh, com precipitações irregulares e concentradas, além de elevado grau de impermeabilização e infraestrutura de drenagem limitada.



Figura 02: Localização Geográfica do Município de Taperoá/PB.
Fonte: AESA (2019)

A área de estudo corresponde ao trecho central da malha urbana, com ênfase na Avenida Governador Dorgival Terceiro Neto e nas quadras adjacentes. Nesse contexto, eventos de chuvas intensas têm provocado alagamentos recorrentes na via analisada, evidenciando a insuficiência do sistema de microdrenagem existente.

Caracterização Físico-Ambiental e Delimitação da Bacia

A delimitação da área de contribuição foi realizada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o *software QGIS* e o Modelo Digital de Elevação (MDE) do satélite ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 metros entre pontos coordenados. Foram aplicadas ferramentas de análise hidrológica para definição das direções de fluxo, áreas de contribuição e sub-bacias urbanas.

A bacia foi delimitada a partir de um ponto de exutório localizado na via em estudo, considerando as características de relevo e uso do solo, resultando em seis sub-bacias, conforme localizações dispostas na Figura 03. A área em estudo não possui dispositivos completos de drenagem pluvial, como galerias, bocas de lobo e poços de visita. No entanto, esses elementos foram adotados na modelagem, de forma simplificada, para melhor representar e analisar o comportamento do escoamento.

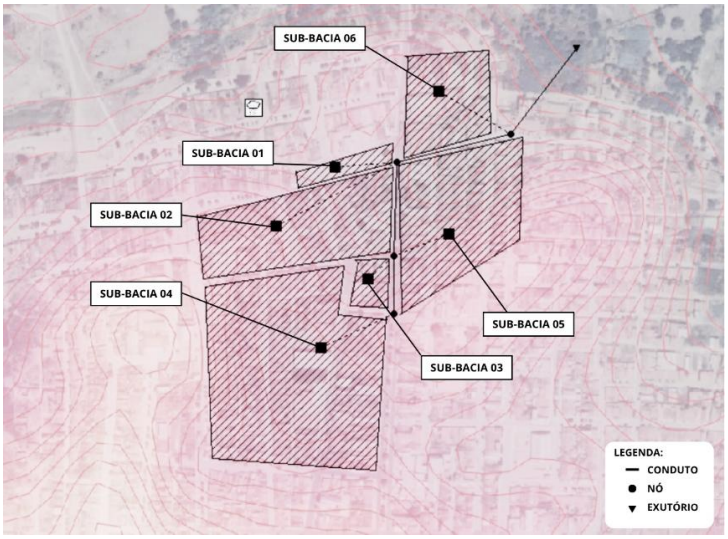


Figura 03: Delimitação das Sub-bacias, nós e condutos.
Fonte: Autores (2026)

Análise Pluviométrica e Curva IDF

Foram utilizadas séries históricas de precipitação obtidas no sistema HidroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com registros de dados acumulados entre 1927 a 2025, referentes às estações pluviométricas de Taperoá (código 736000) e Taperoá (código 736002). A análise evidenciou elevada variabilidade temporal e concentração das chuvas em eventos intensos de curta duração, características típicas do semiárido.

A relação Intensidade–Duração–Frequência (IDF) adotada para o município baseou-se na Equação (01) proposta por Aragão *et al.* (2024), previamente ajustada para a região. Essa equação permite estimar a intensidade da precipitação em função da duração da chuva e do tempo de retorno, sendo uma etapa fundamental para a definição da chuva de projeto utilizada na modelagem hidrológica.

$$i = \frac{1168{,}797 T_R^{0{,}14}}{(d+12{,}63)^{0{,}792}} \qquad (01)$$

A Figura 4 apresenta as intensidades de precipitação correspondentes a diferentes durações e tempos de retorno, calculadas a partir da equação IDF.

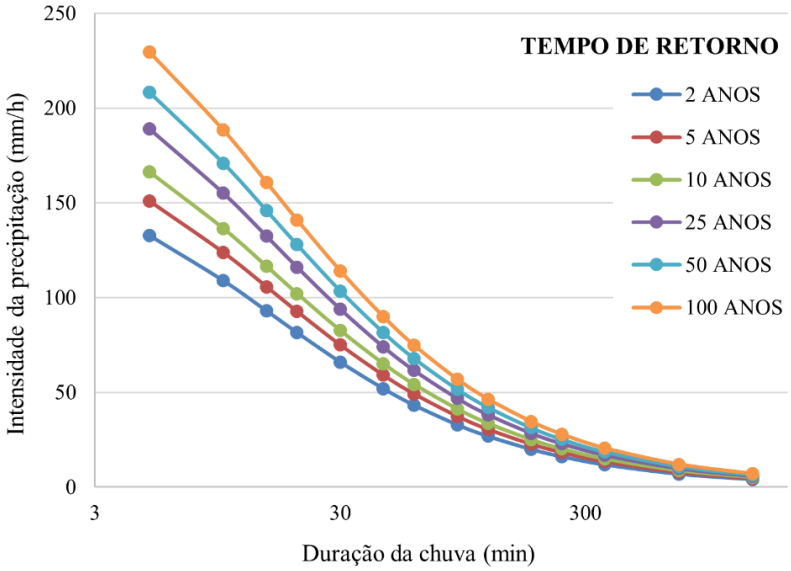


Figura 04: Curvas IDF para o município de Taperoá-PB.
Fonte: Autores (2026)

Definição da Chuva de Projeto

A chuva de projeto foi definida com base na curva IDF, considerando uma duração de 60 minutos e dois cenários de tempo de retorno: 10 anos (evento moderado) e 50 anos (evento extremo). A adoção desses dois tempos de retorno permite comparar o desempenho do sistema frente a eventos usuais e extremos, evidenciando limitações da rede e sua sensibilidade ao aumento da intensidade da precipitação.

A distribuição temporal da precipitação foi obtida pelo método dos blocos alternados, com intervalos de 5 minutos, possibilitando a construção de hietogramas representativos de eventos convectivos intensos. Esse método proporciona uma representação mais realista da variação temporal da precipitação, especialmente quanto à concentração do pico ao longo do evento.

Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica foi realizada no *software SWMM,* amplamente utilizado para a simulação do escoamento superficial em áreas urbanas.

Dividiu-se a região de estudo em 6 sub-bacias, com áreas de 0,24, 2,40, 0,30, 5,70, 2,40 e 1,50 hectares (ha), totalizando uma contribuição de aproximadamente 12,54 ha. As sub-bacias foram parametrizadas com base em características físicas, incluindo declividade média (variando entre 0,30% e 0,85%), percentual de impermeabilização (entre 80% e 100%) e coeficiente de rugosidade de *Manning* (n = 0,01 para áreas impermeáveis e n = 0,10 para áreas permeáveis).

Para o processo de infiltração, representado pelo modelo de Horton, adotaram-se os seguintes parâmetros: taxa de infiltração inicial (f_0 = 3 mm/h), taxa de infiltração final (fc = 0,5 mm/h) e coeficiente de decaimento (k = 4 h^{-1}), definidos com base em EMBRAPA (2020) e pelo modelo calibrado do *SWMM* (literatura/dados locais).

A rede de drenagem foi representada por 4 nós e 4 condutos, com comprimentos variando entre 40 m e 120 m, e declividades entre 0,20% e 1,25%. Devido às limitações da infraestrutura existente, foram necessárias algumas simplificações na representação hidráulica. Assim, os condutos foram inseridos exclusivamente no modelo hidrológico-hidráulico, não correspondendo a estruturas implantadas na área de estudo, sendo utilizados com a finalidade de viabilizar a simulação do escoamento superficial e a análise do comportamento hidráulico do sistema.

As chuvas de projeto, inseridas no modelo como séries temporais com duração total de 60 minutos e intervalo de discretização de 5 minutos, permitiram a simulação do comportamento hidrológico da bacia e a geração de hidrogramas no exutório.

Cenários de Simulação

Foram definidos três cenários para avaliação do comportamento hidrológico, conforme a Tabela 01:

	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3
Condição Urbana	Atual	Atual com intervenção pública	Atual com intervenção pública e privada
Técnicas LID	Não aplicável	Bacias de infiltração	Bacias de infiltração e cisternas
Localização	Não aplicável	Praças urbanas	Praças urbanas e residências
Tipo de controle	Não aplicável	Controle centralizado	Controle centralizado e descentralizado
Armazenamento de água	Não	Temporário no solo	Temporário no solo e reservatórios
Infiltração	Natural	Incrementada nas áreas das bacias	Incrementada nas bacias e redução do escoamento das coberturas
Aproveitamento de água pluvial	Não	Não	Possível uso não potável
Objetivo	Referência hidrológica	Avaliar eficiência de infraestrutura verde pública	Avaliar eficiência de estratégia integrada de manejo

Tabela 01: Comparação entre os cenários aplicados.
Fonte: Autores (2026)

Os cenários foram simulados para eventos com tempos de retorno de 10 e 50 anos, sendo avaliados com base nos hidrogramas no exutório da bacia. Essa abordagem permitiu analisar a eficiência das técnicas *LID*, a partir da redução do escoamento superficial e dos picos de vazão.

Resultados e discussão

Os resultados da modelagem hidrológica realizada no *SWMM* indicaram que a adoção de técnicas de baixo impacto gerou alterações significativas na resposta hidrológica da bacia, com redução dos picos de vazão e aumento do tempo de resposta, em consonância com estudos prévios realizados em regiões semiáridas (Liu *et al*., 2021; Essamlali; Nhaila; El khaili, 2024).

Para o evento com tempo de retorno de 10 anos, o cenário atual apresentou resposta rápida, com pico de vazão de 136,42 L/s. A implantação de bacias de infiltração em áreas públicas, como praças urbanas e espaços livres ao longo da via (cenário 2) resultou em redução de 11,38% no pico de vazão, indicando efeito moderado no controle do escoamento. Por sua vez, o cenário combinado, com bacias de infiltração e cisternas residenciais (cenário 3), apresentou redução expressiva de escoamento superficial, atingindo aproximadamente 50% na diminuição da vazão máxima, conforme ilustrado na Figura 05. Adicionalmente, observou-se, no cenário combinado, a ocorrência de um pico secundário tardio, associado à liberação gradual da água armazenada nos dispositivos, evidenciando o efeito de amortecimento e redistribuição temporal do escoamento proporcionado pelas técnicas *LID*.

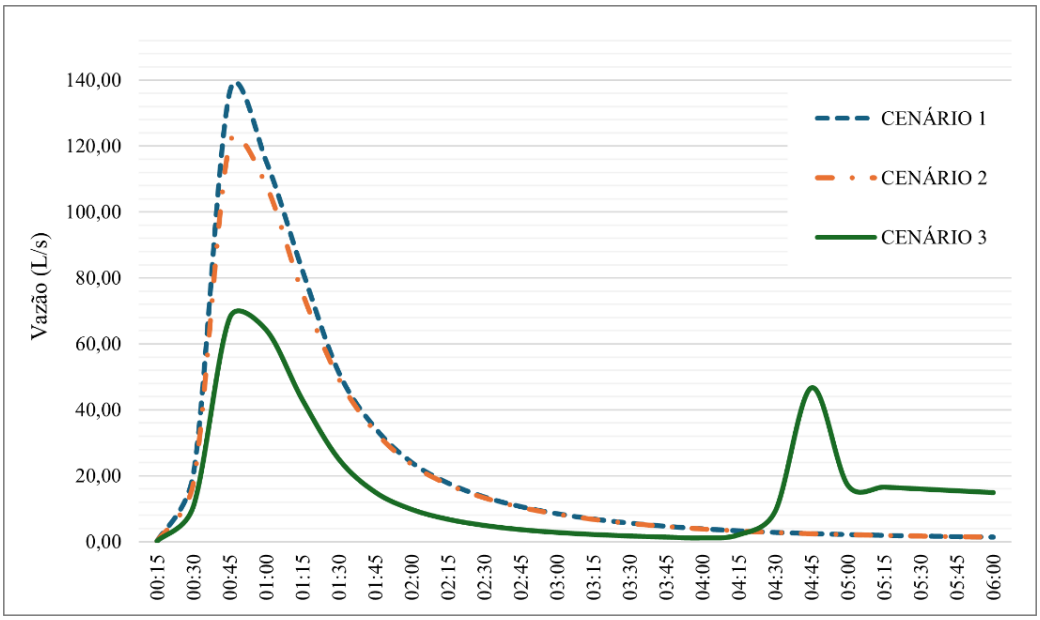


Figura 05: Hidrograma para TR = 10 anos.
Fonte: Autores (2026)

Para o evento de maior magnitude (tempo de retorno de 50 anos), observou-se comportamento semelhante ao do evento de 10 anos, porém com vazões mais elevadas. O cenário atual apresentou um pico de 186,39 L/s, reduzido para 167,68 L/s no cenário 2 (redução de 10,04%) e para 105,27 L/s no cenário 3 (redução de 43,52%). No cenário combinado, também foi verificado atraso no escoamento, decorrente do armazenamento temporário promovido pelas medidas adotadas, sem comprometer a eficiência global da solução.

A análise comparativa evidencia que o cenário 2 promove reduções moderadas tanto no pico de vazão quanto no volume escoado, enquanto o cenário 3 apresenta maior eficiência, com reduções de até 50,19% no pico e 29,37% no volume para o evento com tempo de retorno de 10 anos, e de 43,52% e 35,21%, respectivamente, para o evento de 50 anos, conforme ilustrado na Figura 06. De modo geral, as medidas adotadas mostraram maior efeito na atenuação dos picos de vazão, enquanto a redução do volume total escoado ocorre de forma mais moderada, uma vez que parte da água armazenada nas estruturas é liberada gradualmente.

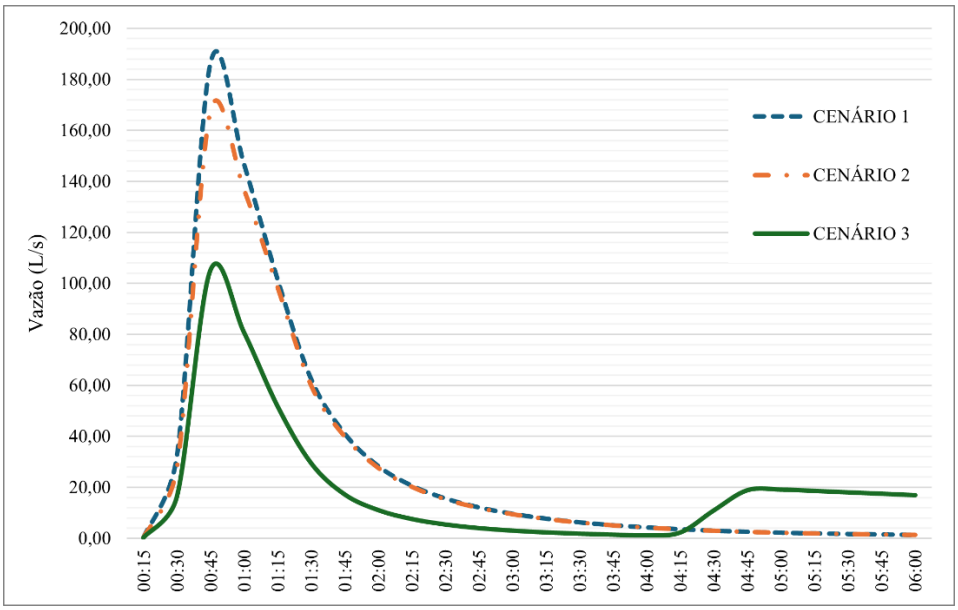


Figura 06: Hidrograma para TR = 50 anos.
Fonte: Autores (2026)

Do ponto de vista aplicado, os resultados demonstram que técnicas de baixo impacto, como bacias de infiltração em áreas públicas e cisternas residenciais, são tecnicamente viáveis e eficazes para o controle do escoamento superficial, especialmente em municípios de pequeno porte do semiárido. A integração entre medidas centralizadas e descentralizadas mostrou ser a estratégia mais eficiente, contribuindo para a mitigação de alagamentos urbanos e para a promoção de sistemas de drenagem mais resilientes e sustentáveis, conforme ilustrado na Figura 07, que apresenta a proposta de requalificação urbana.



Figura 07: Proposta de requalificação urbana.
Fonte: Autores (2026)

A implantação de bacias de infiltração em praças da região central destaca-se como uma estratégia adequada ao poder público, pois aproveita espaços já consolidados, permitindo a incorporação de soluções sustentáveis sem prejuízo do uso social. Essa integração com infraestrutura verde favorece o manejo das águas pluviais, melhora o microclima urbano e valoriza a paisagem (Fletcher *et al*., 2015).

De forma complementar, as cisternas residenciais atuam no controle do escoamento em escala de lote, podendo ser implementadas por iniciativa dos próprios moradores, com apoio de políticas públicas. Além de reduzir o volume escoado em superfícies impermeáveis, possibilitam o aproveitamento da água de chuva para usos não potáveis, contribuindo para o uso mais eficiente dos recursos hídricos (Ghisi; Ferreira, 2007; Campisano *et al*., 2017).

Diante das limitações típicas desses municípios, como restrições orçamentárias e ausência de sistemas de drenagem estruturados, tais soluções se mostram ainda mais adequadas por apresentarem menor custo de implantação e manutenção em comparação às alternativas convencionais de macrodrenagem.

Considerações finais

A presente pesquisa analisou o comportamento do escoamento superficial em uma área urbana do município de Taperoá/PB por meio de modelagem hidrológica com o *software SWMM*, como ferramenta de suporte à avaliação de estratégias de manejo de águas pluviais. A abordagem adotada integrou aspectos físicos, hidrológicos e urbanos, contribuindo para uma compreensão mais abrangente da dinâmica do escoamento em ambientes urbanos do Semiárido brasileiro.

A caracterização da área de estudo evidenciou as particularidades do contexto semiárido, marcado pela elevada irregularidade pluviométrica e pela concentração das chuvas em eventos de curta duração temporal. Essas condições, associadas à impermeabilização do solo urbano, favorecem a geração de escoamentos superficiais intensos e rápidos, aumentando a suscetibilidade a alagamentos, enxurradas e processos erosivos, sobretudo em áreas com infraestrutura de drenagem limitada.

Os resultados demonstraram que o aumento da intensidade das chuvas está diretamente relacionado à elevação dos picos de vazão, evidenciando a sensibilidade do sistema de drenagem às variações do regime pluviométrico. A análise dos hidrogramas permitiu identificar a influência de fatores como a área de contribuição, declividade e grau de impermeabilização no comportamento hidrológico da bacia.

As simulações indicaram que a adoção de medidas de controle na fonte, com bacias de infiltração em áreas públicas e cisternas residenciais, apresenta potencial significativo para reduzir os picos de vazão e retardar o escoamento superficial. Destaca-se que a integração entre medidas centralizadas e descentralizadas se mostrou mais eficiente, reforçando a importância de estratégias combinadas no manejo de águas pluviais.

A escolha dessas soluções considerou a realidade socioeconômica de municípios de pequeno porte do Semiárido, onde alternativas de baixo custo e fácil implementação tendem a apresentar maior viabilidade. Nesse contexto, a utilização de áreas públicas, como praças urbanas, para a implantação de bacias de infiltração, configura-se como alternativa promissora, ao integrar funções hidráulicas e sociais no espaço urbano.

De forma geral, o estudo evidencia que a aplicação de técnicas de manejo de águas pluviais, aliada à modelagem hidrológica, pode contribuir significativamente para o planejamento urbano e para a mitigação dos impactos associados ao escoamento superficial. Embora o modelo represente uma simplificação da realidade, os resultados reforçam a relevância do uso do *SWMM* na análise de cenários e na avaliação preliminar de estratégias de drenagem urbana.

Por fim, os resultados obtidos podem subsidiar futuras pesquisas e apoiar o desenvolvimento de soluções adaptadas às condições das cidades do Semiárido brasileiro, contribuindo para o avanço de práticas de planejamento urbano mais resilientes e para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022.** Brasília: ANA, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA**). HidroWeb: sistema de informações hidrológicas**. Brasília, 2026.

ARAGÃO R., COSTA F. F., RUFINO I. A. A., FILHO R. S. R., VAJAPEYAM S. S., NETO J. B. T. Intensity-duration-frequency equations (IDF) for the state of Paraíba, Brazil, and regionalization of its parameters. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, 2024.

CAMPISANO, A. BUTLER, D.; WARD, S.; BURNS, M. J.; FRIEDLER, E.; DEBUSK, K.; FISHER-JEFFES, L. N.; GHISI, E.; RAHMAN, A.; FURUMAI, H.; HAN, M. Urban rainwater harvesting systems: research, implementation and future perspectives. **Water Research**, v. 115, p. 195–209, 2017.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES (CEPED/UFSC). **Atlas brasileiro de desastres naturais (1991–2023)**. Florianópolis: UFSC, 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Semiárido brasileiro: caracterização**

climática e ambiental. Brasília: EMBRAPA, 2020.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Storm water management model (SWMM) – user's manual.** Washington: EPA, 2022.

ESSAMLALI, I.; NHAILA, H.; EL KHAILI, M. A new architecture of Low Impact Development (LID)-based stormwater management system through Internet of Things (IoT) and Machine Learning integration. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 10, 2024.

FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; HUNT, W.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; ARTHUR, S.; TROWSDALE, S.; BARRAUD, S.; SEMANEDI-DAVIES, A.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J, L.; MIKKELSEN, P. S.; RIVARD, G.; UHL, M.; DAGENAIS, D.; VIKLANDER, M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal,** v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.

GHISI, E.; FERREIRA, D. F. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. **Building and Environment,** v. 42, n. 4, p. 1654–1666, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e informações municipais.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

LIU, Z.; LI, W.; WANG, L.; LI, L. The scenario simulations and several problems of the Sponge City construction in semi-arid loess region, Northwest China. **Landscape and Ecological Engineering**, v. 18, n. 1, p. 95–108, 2021.

MOURA, A.; *et al*. Gestão sustentável de águas pluviais urbanas. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2020.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE). **Delimitação do semiárido brasileiro.** Recife: SUDENE, 2017.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da drenagem urbana**. Brasília: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL); Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2012.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades; Global Water Partnership; World Bank; UNESCO, 2005.

WILKEN, P. S. **Engenharia de Drenagem Superficial**. São Paulo: CETESB; Oficina de Textos, 2018.

CIDADES ESPONJAS COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL PARA MITIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS URBANOS EM UBERLÂNDIA: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

1 Álvaro Henrique Ormonde Ferreira, 2 João Pedro da Silva, 3 Jorge Luiz Mateus Moreira do Carmo
1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: alvaro.ormode@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: joao.silva7@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail:jdotpapi@ufu.br

Palavras-chave: Cidades Esponja; Jardins de Chuva; Drenagem Urbana Sustentável.

Resumo

O crescimento urbano acelerado tem intensificado a ocorrência de alagamentos e enxurradas em cidades brasileiras, especialmente em áreas com elevada impermeabilização do solo e sistemas de drenagem insuficientes. Nesse contexto, o conceito de cidades esponja surge como uma abordagem baseada na natureza para o manejo sustentável das águas pluviais, por meio da implantação de infraestruturas verdes, como jardins de chuva, áreas de retenção e pavimentos permeáveis. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura acerca da aplicação dessas estratégias na mitigação de alagamentos urbanos, com enfoque na sua viabilidade para a cidade de Uberlândia – MG. A metodologia baseou-se nas diretrizes do PRISMA, com buscas realizada no Portal de Periódicos CAPES, abrangendo publicações entre 2005 e 2025, em língua inglesa, por meio dos descritores relacionados ao tema, incluindo os termos: “rain garden”, “sustainable drainage system” e “sponge cities”. Após triagem e aplicação dos critérios de elegibilidade, nove estudos foram selecionados para análise qualitativa. Os resultados indicam que as infraestruturas verdes contribuem para a redução do escoamento superficial, amortecimento dos picos de vazão, aumento da infiltração e melhoria da qualidade da água, além de benefícios ambientais e sociais associados. Conclui-se que os princípios das cidades esponja apresentam potencial como estratégia sustentável para a mitigação de alagamentos em Uberlândia, especialmente em áreas críticas, desde que associada a um planejamento urbano integrado e adaptado às condições hidro ambientais locais.

Introdução

Nas últimas décadas, o crescimento urbano acelerado de Uberlândia tem sido acompanhado pelo aumento da impermeabilização do solo, expansão viária e ocupação extensiva do espaço urbano, fatores que contribuem para a elevação do escoamento superficial e para a recorrência de alagamentos e enxurradas, em períodos chuvosos. A redução das áreas permeáveis e a sobrecarga dos sistemas convencionais de drenagem intensificam impactos socioambientais, incluindo danos materiais, interrupção da mobilidade urbana, riscos à saúde pública e degradação ambiental.

Nesse contexto, soluções baseadas na natureza têm ganhado destaque como estratégias complementares aos sistemas tradicionais de macrodrenagem. Entre essas abordagens, destaca-se o conceito de Cidades Esponja, difundido na China a partir das contribuições de Kongjian Yu e posteriormente incorporado a políticas públicas urbanas. O modelo busca aumentar a capacidade das cidades de absorver, infiltrar, armazenar, retardar e reutilizar águas pluviais por meio de infraestruturas verdes, como jardins de chuva, parques inundáveis, wetlands construídos, telhados verdes e pavimentos permeáveis. Experiências semelhantes também são observadas internacionalmente, como os Sistemas de Drenagem Sustentável (SUDS) no Reino Unido, o Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) nos Estados Unidos, o Design Urbano Sensível à Água (WSUD) na Austrália, o Design e Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LIUDD) na Nova Zelândia, o programa Active, Beautiful and Clean Waters (ABC) em Singapura, evidenciando tendência global de adaptação urbana frente às mudanças climáticas e eventos extremos.

Em Uberlândia, diversos pontos críticos de alagamento concentram-se em áreas densamente urbanizadas, com elevada pavimentação e limitada infiltração hídrica. Um dos locais mais emblemáticos é o da Avenida Rondon Pacheco, uma das principais vias da cidade, que há anos enfrenta recorrentes episódios de enxurradas, sobretudo durante o período de maior precipitação no município, entre setembro e dezembro. No ano de 2024, foram registrados mais de quatro eventos críticos de alagamento ao longo da via. Dentre esses, destacam-se o episódio de 28 de setembro, no qual foram observados acumulados superiores a 55 mm de precipitação, e o de 24 de novembro, quando, em menos de 30 minutos, foram registrados quase 50 mm de chuva concentrada no local. Este último evento resultou na morte de uma pessoa, evidenciando a severidade e os impactos desses fenômenos sobre a população e a infraestrutura urbana.

Além de promover a integração entre infraestrutura e sistema naturais, os parques esponja desempenham funções ecossistêmicas relevantes para a adaptação climática das cidades. Essa estrutura contribui para a mitigação de ilhas de calor urbanas por meio do aumento da evapotranspiração, sombreamento vegetal e melhoria do microclima local, favorecendo maior conforto térmico e qualidade ambiental. Em Uberlândia, a adoção dessa estratégia pode representar importante alternativa para elevar a resiliência urbana frente à expansão territorial e à intensificação de eventos extremos de precipitação, contribuindo simultaneamente para a qualidade de vida da população, valorização dos espaços públicos e conservação ambiental. Espaços públicos estratégicos, como o Parque do Sabiá e corredores verdes urbanos existentes, apresentam potencial para adaptação voltada ao amortecimento de cheias e retenção temporária de águas pluviais.

Diante do contexto apresentado, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o modelo de Cidades Esponja e outras estratégias sustentáveis de manejo de águas pluviais, avaliando sua aplicabilidade como alternativa para a mitigação de alagamentos urbanos em Uberlândia.

Materiais e Métodos

A revisão sistemática foi conduzida com base nas diretrizes do protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). A busca bibliográfica foi realizada em 27 de fevereiro de 2026, por meio do Portal de Periódicos da CAPES, contemplando bases indexadoras internacionais disponíveis na plataforma. Foram considerados artigos científicos revisados por pares, publicados em língua inglesa, no período de 2005 a 2025.

A estratégia de busca utilizou descritores relacionados ao conceito de cidades esponja e drenagem urbana sustentável, incluindo os termos: “rain garden”, “sustainable drainage system” e “sponge cities”. Os termos foram combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, com a restrição de que estivessem presentes apenas em materiais do tipo artigo, a fim de garantir maior relevância temática dos resultados encontrados. O processo de seleção seguiu quatro etapas recomendadas pelo protocolo PRISMA: (1) identificação dos registros; (2) triagem inicial mediante leitura de títulos e resumos, com remoção de registros duplicados; (3) avaliação de elegibilidade por leitura integral; e (4) inclusão final dos estudos pertinentes.

Foram excluídos estudos sem aderência direta ao objetivo da revisão, especialmente aqueles centrados exclusivamente em modelagem computacional sem aplicação urbana, avaliações estritamente econômicas dissociadas de intervenções físicas, análises conceituais sem validação prática ou pesquisas focadas em componentes isolados sem relação sistêmica com mitigação de alagamentos.

Ao final do processo, os estudos selecionados foram analisados qualitativamente às tipologias de infraestrutura verde empregadas, desempenho hidrológico, benefícios ambientais, aplicabilidade urbana e potencial de adaptação ao contexto de Uberlândia.

Resultados e Discussão

Inicialmente, foram identificados 48 registros, dos quais 9 artigos foram incluídos na revisão após todas as etapas de triagem. As razões de exclusão estão dispostas no fluxograma PRISMA (Figura 1) e ocorreram, principalmente, por não apresentarem análises diretamente relacionadas à implementação de infraestruturas de drenagem urbana sustentável em centros urbanos.

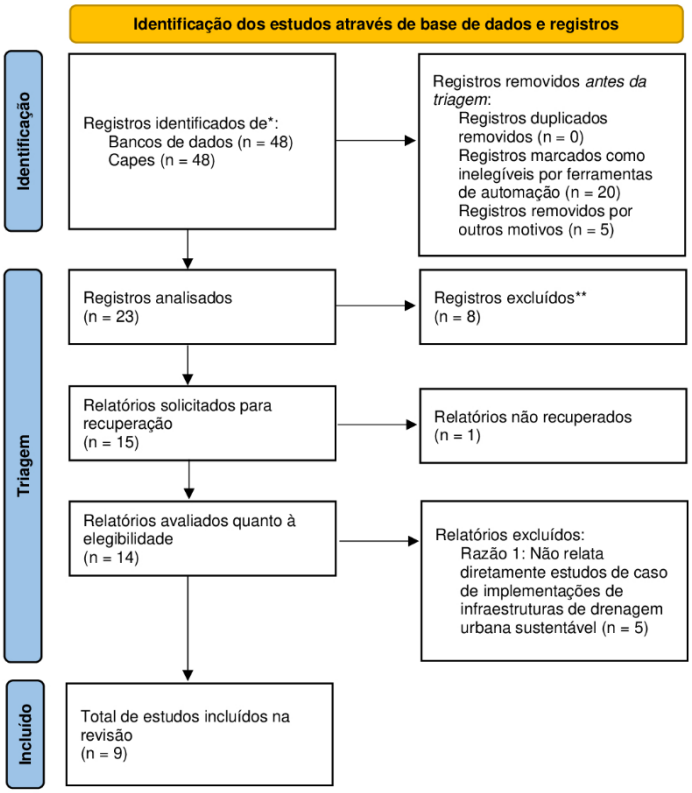


Figura 1: Diagrama de fluxo PRISMA 2020 para novas revisões sistemáticas que incluíram buscas apenas em bancos de dados e registros.
Fonte: Adaptado de PRISMA Statement (2026).

A análise dos nove estudos permitiu identificar três convergências principais: a eficácia das infraestruturas verdes na redução do escoamento superficial; a necessidade de combinar diferentes técnicas conforme o tipo de evento de chuva; e a importância do planejamento espacial, manutenção e monitoramento para garantir desempenho hidrológico ao longo do tempo. Como divergência, observou-se que a eficiência das soluções varia conforme escala de aplicação, condições locais de solo, intensidade da precipitação e grau de urbanização da bacia.

Autor/ano	País/cidade	Técnica analisada	Principal resultado	Aplicabilidade para Uberlândia
PERALES-MOMPARLER et al., 2017	Espanha/Valência	SuDS	Redução de escoamento e melhoria da qualidade da água	Jardins de chuva e retenção urbana
HERNES et al., 2020	Noruega/Oslo	Jardins de chuva/telhados verdes	Eficiência varia com intensidade da chuva	Combinação de técnicas
QIU et al., 2021	França/Guyancourt	Distribuição espacial de infraestrutura verde	Pico de vazão varia conforme arranjo espacial	Planejamento por bacia
REN et al., 2015	China/Beihai	Modelagem e simulação de drenagem urbana	Adoção de sistemas integrados de drenagem e armazenamento	Concepção de plano de implantação otimizado para obras
SU et al., 2023	China/Zhengzhou	Adequação de corpos naturais esponjosos sob análise geológica	Determinação de áreas geologicamente adequadas para construções de infraestruturas verdes	Referência de planejamento e construção de cidades esponja
; DUARTE et al., 2020	Brasil/Brasília	Análise de densidade e da ordem de drenagem da região; uso do cálculo do fator topográfico (LS)	Localização de áreas de alagamento e de locais ideais para implantação de jardins de chuva	Catalogação de áreas alagáveis e de possíveis áreas para jardins de chuva
HLUSHCHENKO et al., 2022	Ucrânia/Kiev	Testes de estruturas-verdes em estradas	Alta capacidade de captação e filtragem de águas pluviais, além de promover mais segurança nas estradas	Concepção de estruturas-verdes nas avenidas alagáveis
SHREEWATSAV; XERIFE, 2022	Índia/Karnataka	Jardins de Chuva em vias expressas	Melhoria do lençol freático, revitalização dos lagos adjacentes e no aumento da biodiversidade	Criação de modelos de desenvolvimento de infraestrutura verde ao longo de vias expressas
DING et al., 2019	China/Shouxian	LID	Desaparecimento de fenômenos de alagamento; Economia de água; Aprimoração do paisagismo urbano; Aumento nos benefícios sociais, econômicos e ambientais	Adoção consciente de infraestruturas verdes pela cidade

A síntese dos estudos permitiu identificar convergências importantes quanto ao papel das infraestruturas verdes na mitigação de alagamentos urbanos, especialmente por meio da redução do escoamento superficial, do amortecimento dos picos de vazão, do aumento da infiltração e da melhoria da qualidade da água. As principais soluções relatadas envolveram jardins de chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis, valas vegetadas, áreas de retenção e sistemas integrados de drenagem sustentável.(PERALES-MOMPARLER et al., 2017).

EFICÁCIA: No que se refere ao desempenho hidrológico, verificou-se que diferentes técnicas apresentam respostas distintas conforme a intensidade dos eventos de chuva. No estudo de Hernes, observou-se que jardins de chuva apresentam maior eficiência na redução de extravasamentos em eventos de maior magnitude, enquanto telhados verdes demonstram melhor desempenho em eventos de menor intensidade, evidenciando a importância da combinação entre diferentes soluções (HERNES et al., 2020). Além disso, os estudos de QIU destacam que a eficácia das soluções baseadas na natureza não depende apenas da técnica adotada, mas também da sua distribuição espacial. A variabilidade da precipitação pode influenciar significativamente o pico de vazão, com variações estimadas entre 8% e 18%, indicando que a disposição espacial das infraestruturas verdes deve ser planejada de forma integrada para maximizar sua eficiência (QIU et al., 2021).

PLANEJAMENTO: Outro aspecto relevante abordado no estudo de Su e Duarte refere-se à necessidade de planejamento territorial e adequação das áreas de implantação. A análise de fatores como topografia, densidade de drenagem, características geológicas e capacidade de infiltração do solo é fundamental para o sucesso das intervenções. Em áreas mais adequadas, recomenda-se priorizar soluções que favoreçam a infiltração e o armazenamento subterrâneo, enquanto em áreas menos favoráveis devem ser adotadas medidas complementares, como estruturas artificiais de retenção (SU et al., 2023;

DUARTE et al., 2020). Os resultados também indicam que a elevada impermeabilização do solo urbano é um dos principais fatores responsáveis pelo agravamento das enchentes, especialmente em áreas densamente urbanizadas, reforçando a necessidade de adoção de estratégias como o desenvolvimento de baixo impacto (LID) e sistemas integrados de drenagem e armazenamento (REN et al., 2015).

DIFERENTES ESTRATÉGIAS: Em áreas urbanas consolidadas, os estudos demonstram que a adaptação de espaços existentes, como parques urbanos, áreas verdes e vias de transporte, constitui uma alternativa viável para a implementação dessas soluções. A aplicação de jardins de chuva ao longo de rodovias e vias expressas contribui para a captação e infiltração do escoamento superficial, além de promover benefícios adicionais relacionados à segurança viária, conforto térmico e qualidade ambiental (HLUSHCHENKO et al., 2022; SHREEWATSAV; XERIFE, 2022). Adicionalmente, experiências internacionais evidenciam que a implementação de sistemas de drenagem sustentável reduz o escoamento superficial e melhora a qualidade da água, além de favorecer a aceitação por parte de gestores públicos e tomadores de decisão, contribuindo para a consolidação dessas práticas no planejamento urbano (PERALES-MOMPARLER et al., 2017).

Em complemento aos benefícios hidrológicos anteriormente discutidos, como a redução do escoamento superficial, amortecimento dos picos de vazão e aumento da infiltração, a literatura também evidencia ganhos ambientais, sociais e econômicos associados à implementação de cidades esponja, incluindo qualificação da paisagem urbana, ampliação de áreas verdes, melhoria do conforto térmico, maior eficiência no manejo das águas pluviais e redução gradual da frequência de alagamentos ao longo do tempo (DING et al., 2019). Entretanto, a efetividade dessas soluções depende não apenas da técnica adotada, mas também da manutenção e do monitoramento contínuos, uma vez que a ausência desses procedimentos pode comprometer a permeabilidade, a capacidade de retenção e o desempenho hidrológico das estruturas. Nesse sentido, o acompanhamento sistemático é essencial para avaliar resultados reais, orientar ajustes operacionais e subsidiar a gestão urbana (PERALES-MOMPARLER et al., 2017). Para Uberlândia, isso indica que eventuais parques-esponja, jardins de chuva e áreas de retenção devem ser incorporados como parte de uma estratégia permanente de planejamento urbano e adaptação climática, e não como intervenções isoladas.

No contexto da cidade de Uberlândia, a Avenida Rondon Pacheco destaca-se historicamente como uma das áreas mais suscetíveis a ocorrência de enchentes e alagamentos urbanos durante eventos pluviométricos intensos. Trata-se de um importante eixo viário estruturante do município, implantada sobre o antigo leito canalizado do Córrego São Pedro, em processo típico de urbanização observado em diversas cidades brasileiras nas décadas de 1960 e 1970, quando cursos d'água urbanos foram retificados ou canalizados para ampliação de malha viária e ocupação territorial. A literatura demonstra que tais intervenções tendem a reduzir áreas naturais de armazenamento temporário, suprimir planícies de inundação e acelerar o escoamento superficial, elevando a vulnerabilidade hidrológica de fundos de vale urbanizados (TUCCI, 2005; CANHOLI, 2014; FLETCHER et al., 2015).

Sob a perspectiva geomorfológica, a avenida encontra-se em área de fundo de vale, vinculada à drenagem das bacias dos córregos Lagoinha e Jataí. Em ambientes com essas características, estudos de drenagem urbana indicam maior propensão à concentração rápida de vazões de pico, especialmente quando associadas a elevadas taxas de impermeabilização do solo (TUCCI, 2005). Nesses cenários, a predominância de superfícies asfaltadas, edificações e baixa cobertura vegetal reduz a infiltração hídrica, aumenta o coeficiente de escoamento e encurta o tempo de concentração da bacia, favorecendo episódios recorrentes de sobrecarga das galerias pluviais e extravasamentos superficiais (PORTO; TUCCI, 2009; REN et al., 2015; QIU et al., 2021).

Adicionalmente, a literatura técnica aponta que a obstrução de bocas de lobo e dispositivos de drenagem resíduos sólidos urbanos, constitui fator recorrente de perda de eficiência hidráulica em sistemas convencionais de drenagem. Quando combinada ao adensamento urbano e o aumento da frequência de chuvas intensas associadas à variabilidade climáticas, essa condição tende a aumentar a recorrência e severidade alagamentos (CANHOLI, 2014; IPCC, 2023).

Do ponto de vista conceitual, o caso da Avenida Rondon Pacheco reflete limitações típicas do modelo tradicional de drenagem baseado em canalização e rápido afastamento das águas pluviais. Estudos internacionais sobre cidades esponja, Low Impact Development (LID) e Sustainable Drainage Systems (SuDS) demonstram que sistemas exclusivamente condutivos frequentemente transferem volumes e picos de vazão para jusante, sem atuar nas causas hidrológicas geradoras do problema (PERALES-MOMPARLER et al., 2017; DING et al., 2019; WANG, 2024).

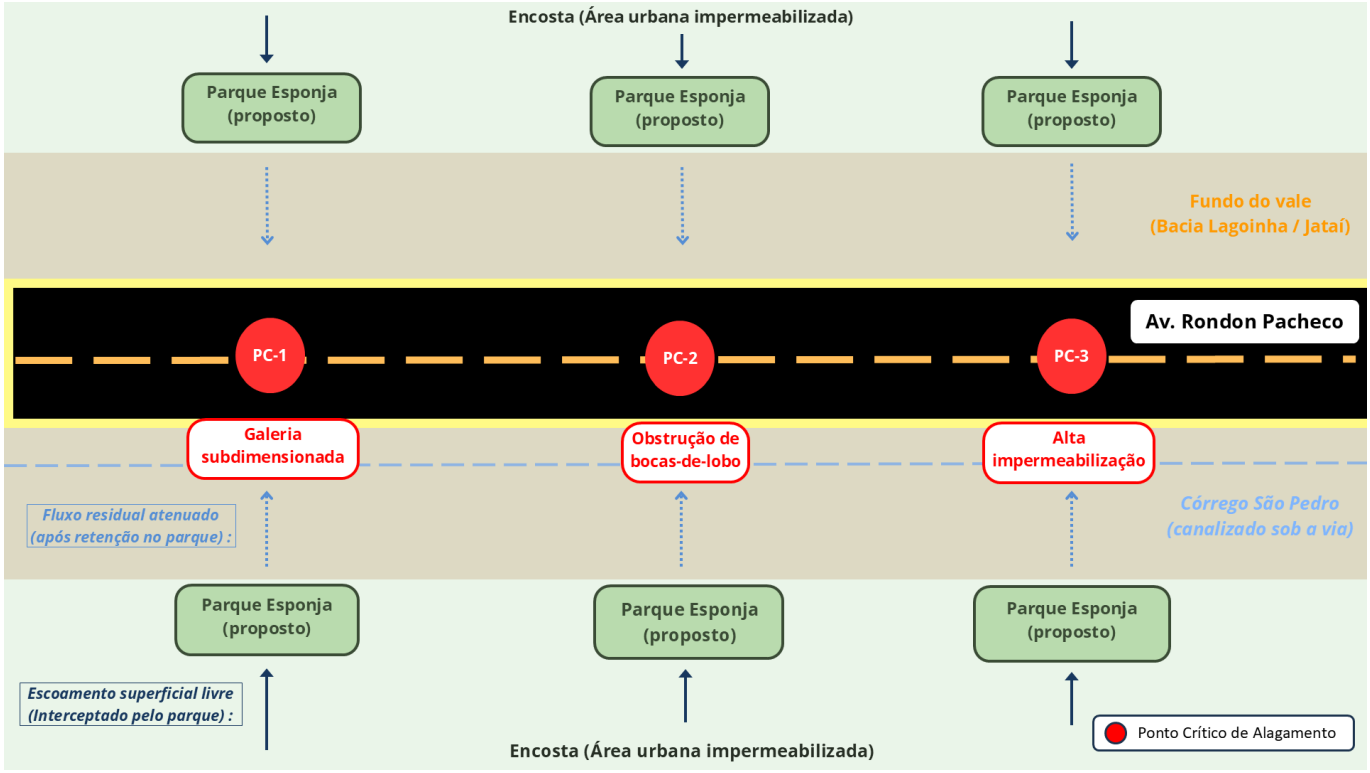


Figura 2: Esquema ilustrativo dos pontos críticos de enchente e locais propostos para implementação de parques esponja na Av. Rondon Pacheco, Uberlândia–MG.
Fonte: Elaborado pelos autores com base na literatura revisada e em informações urbanísticas do município (2026). Esquema ilustrativo; não constitui cartografia de precisão.

Com base nesses achados, infere-se que a implementação de infraestruturas verdes como parques esponja, jardins de chuva, áreas de retenção e dispositivos de infiltração, na bacia de contribuição da avenida, apresenta potencial teórico para reduzir volumes escoados e retardar picos de vazão antes da chegada ao trecho crítico. Essas soluções tendem a restaurar parcialmente funções hidrológicas perdidas pela urbanização, aumentando infiltração, armazenamento transitório e evapotranspiração urbana (HERNES et al., 2020; QIU et al., 2021; SU et al., 2023).

Dessa forma, embora estudos hidrológicos locais detalhados ainda sejam necessários para o dimensionamento preciso, a evidência científica revisada sustenta que estratégias baseadas na natureza constituem alternativa promissora e complementar às obras convencionais para mitigação dos eventos recorrentes de alagamento na Avenida Rondon Pacheco, desde que integradas ao planejamento urbano, manutenção contínua e educação ambiental (FLETCHER et al., 2015; PERALES-MOMPARLER et al., 2017; WANG, 2024).

Comentários finais

A revisão sistemática realizada evidenciou que a aplicação de infraestruturas verdes, no contexto das cidades esponja, constitui estratégia promissora e tecnicamente consistente para a mitigação de alagamentos e enxurradas em áreas urbanas densamente impermeabilizadas. Soluções como jardins de chuva, áreas de retenção, pavimentos permeáveis e sistemas de drenagem sustentável demonstraram potencial para reduzir o escoamento superficial, amortecer picos de vazão e diminuir a sobrecarga dos sistemas convencionais de drenagem.

Os estudos indicam que a eficácia dessas intervenções depende de sua implementação de forma integrada e distribuída no espaço urbano, considerando características locais como relevo, uso do solo, capacidade de infiltração e dinâmica hidrológica da bacia contribuinte. Nesse sentido, para Uberlândia, a adoção de parques esponja apresenta elevado potencial em áreas críticas como a Avenida Rondon Pacheco, onde fatores geomorfológicos e elevada impermeabilização intensificam os eventos de alagamento.

Entretanto, a implementação destas soluções urbanas consolidadas envolve desafios técnicos, institucionais e fundiários, exigindo planejamento intersetorial, disponibilidade de áreas permeáveis adequadas e, a compatibilidade com a infraestrutura existente. Assim, recomenda-se que estudos futuros desenvolvam diagnósticos hidrológicos detalhados da bacia da Avenida Rondon Pacheco, integrando dados topográficos, uso e cobertura do solo e capacidade de infiltração, de modo a subsidiar o dimensionamento e a localização adequada das intervenções propostas.

Conclui-se, portanto, que os parques esponja representam alternativa viável e sustentável para o manejo das águas pluviais, contribuindo simultaneamente para a redução de alagamentos e enxurradas, melhoria da qualidade ambiental e aumento

da resiliência urbana frente aos eventos hidrológicos extremos. O conceito de cidades esponja deixa de ser apenas referência internacional e passa a representar oportunidade concreta de inovação urbana para Uberlândia.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) e a comunidade acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, em especial a professora orientadora Sueli Bertolino, pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DING, K.; XU, Y.; ZHANG, Y.; YANG, C. Application of low impact development concept in the construction of Shouxian County. *E3S Web of Conferences*, v. 136, 03021, 2019. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913603021.
DUARTE, J. V. B. et al. Analysis of potential areas for rain garden implementation in Plano Piloto, Brasília, Brazil. *ISPRS Archives*, v. XLII-3/W12, p. 529–532, 2020. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-529-2020.

HERNES, R. R. et al. Assessing the effects of four SUDS scenarios on combined sewer overflows in Oslo, Norway. *Hydrology Research*, v. 51, n. 6, p. 1437–1454, 2020. DOI: https://doi.org/10.2166/nh.2020.070.

HLUSHCHENKO, R. et al. “Green structures” for effective rainwater management on roads. *Production Engineering Archives*, v. 28, n. 4, p. 295–299, 2022. DOI: https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.37.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2023.

PERALES-MOMPARLER, S. et al. The role of monitoring sustainable drainage systems for promoting transition towards regenerative urban built environments: a case study in the Valencian region, Spain. *Journal of Cleaner Production*, v. 163, p. S113–S124, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.153.

QIU, Y. et al. Spatial variability impacts on hydrological responses of nature-based solutions and resulting uncertainty: a case study of Guyancourt (France). *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, p. 3137–3162, 2021. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-25-3137-2021.

REN, X.; YU, D.; RUAN, Y.; YU, G. Modeling of municipal drainage and urban channel flooding in coastal city in the South of China. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, v. 5, n. 2, p. 74–86, 2015. DOI: https://doi.org/10.2991/jrarc.2015.5.2.1.

SHREEWATSAV, M.; XERIFE, V. A. Expansion of urban green infrastructure using stormwater runoff as a resource on NICE expressway, Karnataka, India. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, v. 30, n. 1, p. 165–178, 2022. DOI: https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.16394.

SU, Y. J. et al. Geological suitability of natural sponge body for the construction of sponge city: a case study of Shuanghe Lake district in Zhengzhou airport zone. *Journal of Underground Water Science and Engineering*, v. 11, n. 2, p. 146–157, 2023. DOI: https://doi.org/10.26599/JGSE.2023.9280013.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades, 2005.

WANG, M.; ZHUANG, J.; SUN, C.; WANG, L.; ZHANG, M.; FAN, C.; LI, J. The application of rain gardens in urban environments: a bibliometric review. *Land*, v. 13, p. 1702, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13101702.

APLICAÇÃO DE PySWMM NA OTIMIZAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA EM SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

1 Camila Caballero Cristaldo, 2 Daniel Allasia Piccilli, 3 Leandro Conceição Pinto, 4 Francisco Paim de Freitas Neto, 5 Ana Carolina dos Santos Reis, 6 Gabriel Sulzbach Pereira, 7 Rodrigo Girardon Della Pace, 8 Aldo Romero Miranda

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: camicaba2601@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: dallasia@gmail.com; 3 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: leandro.pinto@ufsm.br; 4 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: francisco.freitas@acad.ufsm.br; 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: reis.ana@acad.ufsm.br; 6 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: gabrielpereirars@gmail.com; 7 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: rodrigodellapace02@gmail.com; 8 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: alivromi@gmail.com.

Palavras-chave: Drenagem urbana, LID, PySWMM

Resumo

A intensificação da urbanização tem provocado alterações significativas na hidrologia das bacias urbanas, aumentando o escoamento superficial e a ocorrência de sobrecargas em sistemas de drenagem. Nesse contexto, soluções baseadas em infraestrutura verde, como pavimentos permeáveis, têm sido adotadas para mitigar esses impactos, embora a definição da área mínima necessária ainda represente um desafio no planejamento urbano. Este estudo propõe uma metodologia automatizada baseada no uso do PySWMM como ferramenta de apoio à tomada de decisão para a definição da área mínima de soluções LID voltadas ao controle de sobrecargas hidráulicas. Inicialmente, a abordagem foi estruturada em um modelo conceitual baseado no EPA SWMM, permitindo a validação do procedimento em ambiente controlado. Posteriormente, a metodologia foi aplicada a um caso real na bacia do Canal Madame Lynch, em Asunción (Paraguai), caracterizada por elevados níveis de impermeabilização e registros de eventos de transbordamento em condições de chuva intensa.

O método consiste na geração automática de múltiplos cenários com variação progressiva da área de LID e do percentual de impermeabilização, com avaliação do desempenho hidráulico a partir do nível máximo em um nó crítico do sistema. A automatização do processo permite reduzir significativamente o tempo de análise em comparação com abordagens manuais, nas quais a definição de cenários depende de sucessivas alterações individuais dos parâmetros do modelo. Os resultados demonstraram a capacidade da abordagem em identificar, de forma sistemática, configurações que eliminam condições de sobrecarga, evidenciando seu potencial como ferramenta para suporte ao planejamento e à gestão de sistemas de drenagem urbana.

Introdução

O processo acelerado de urbanização tem gerado transformações significativas na hidrologia das bacias, afetando tanto a quantidade quanto a dinâmica da água em sistemas urbanos. De maneira geral, esse processo conduz ao aumento das taxas e volumes de escoamento superficial, à redução da infiltração e do escoamento de base, além da intensificação das vazões de pico, frequentemente associadas à ocorrência de inundações urbanas (Fletcher, Andrieu e Hamel, 2013; Harbor, 1994; Leopold, 1968; Nie *et al.*, 2011; Walsh *et al.*, 2005).

Essas alterações estão diretamente relacionadas à expansão das superfícies impermeáveis, decorrente da substituição da vegetação por pavimentos e edificações, o que consequentemente reduz a permeabilidade do solo e modifica os mecanismos de geração do escoamento superficial (Goonetilleke *et al.*, 2005; Moscrip e Montgomery, 1997; Tang *et al.*, 2005). Além disso, essas alterações promovem a redução da capacidade natural de infiltração dos sistemas fluviais e a alterações no regime hidrológico em diferentes escalas temporais (Gunn *et al.*, 2012; O'Driscoll *et al.*, 2010).

Esse cenário pode ser observado em sistemas reais de drenagem urbana, como na bacia do Canal de Madame Lynch, em Asunción (Paraguai), onde eventos de transbordamento documentados evidenciam a limitação da capacidade hidráulica frente às condições atuais de urbanização (Figura 01).

A mitigação desses impactos é desafiadora, pois a hidrologia urbana é um sistema complexo, que envolve a interação entre processos físicos e sistemas de gestão, incluindo sua relação com sistemas de esgotamento sanitário, sejam eles separados ou combinados (Fletcher, Andrieu e Hamel, 2013). Por isso, sua análise requer abordagens integradas que combinem engenharia hidrológica, planejamento urbano e políticas públicas (Gunn *et al.*, 2012).

Diante das limitações dos sistemas tradicionais de drenagem, têm surgido abordagens alternativas que buscam uma gestão mais sustentável das águas pluviais (Ahiablame, Engel e Chaubey, 2012; Lloyd, 2000; Scholz e Grabowiecki, 2007). Entre essas soluções, destacam-se conceitos como *Best Management Practices* (BMPs), *Low Impact Development* (LID), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) e *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) (Barbosa, Fernandes, David, 2012), os quais buscam reproduzir o comportamento hidrológico em um cenário natural anterior à urbanização, estimando processos como infiltração, retenção e evapotranspiração.

Nesse contexto, os pavimentos permeáveis assumem papel de destaque, pois promovem a infiltração do escoamento superficial e a recarga do lençol freático. Em comparação com sistemas tradicionais, configuram uma solução sustentável e eficiente, contribuindo para a redução do escoamento, atenuação de vazões de pico e prevenção da poluição, além de auxiliar na diminuição de sobrecargas nos sistemas de drenagem (Scholz e Grabowiecki, 2007).



Figura 01: Evento de transbordamento no Canal Madame Lynch durante condições de chuva intensa.
Fonte: Redes sociais (2020)

Devido à complexidade dos processos envolvidos, o dimensionamento e avaliação dessas soluções de drenagem, assim como a análise dos impactos decorrentes da alteração do uso do solo, podem ser aprimorados com o uso de ferramentas de modelagem hidrológica. Modelos numéricos computacionais constituem o principal instrumento para simular processos hidrológicos em bacias urbanas e avaliar a resposta do sistema frente a mudanças nas condições ambientais (Harbor, 1994). Além disso, a crescente complexidade da hidrologia urbana demanda o desenvolvimento de ferramentas que não apenas representem os processos físicos, mas também apoiem a tomada de decisão no planejamento e gestão de sistemas de drenagem urbana (Fletcher, Andrieu e Hamel, 2013).

Nesse contexto, a utilização de ferramentas computacionais integradas, como modelos hidrológicos associados a linguagens de programação, surge como uma alternativa robusta para automatizar a análise de múltiplos cenários, reduzindo o tempo de avaliação e ampliando a capacidade de suporte à tomada de decisão. Entre essas ferramentas, destaca-se o PySWMM, uma interface em Python que permite a automação e o controle dinâmico de simulações no SWMM, facilitando a exploração sistemática de diferentes configurações de intervenção (McDonnell et al., 2020).

Diante disso, o presente estudo tem por objetivo avaliar a aplicação do PySWMM como ferramenta de apoio à tomada de decisão na definição da área mínima de pavimento permeável necessária para o controle de sobrecargas em sistemas de drenagem urbana. Para isso, foi desenvolvido um procedimento baseado na simulação automatizada de múltiplos cenários, com variação progressiva da área de infraestrutura verde, sendo posteriormente aplicado e validado em um modelo real da bacia do Canal Madame Lynch.

Metodologia

Foi utilizado o modelo Storm Water Management Model (SWMM), um modelo dinâmico de simulação chuva-escoamento amplamente empregado na representação de processos hidrológicos e hidráulicos em áreas urbanas. O modelo permite a simulação tanto de eventos isolados quanto de forma contínua, considerando a quantidade e a qualidade do escoamento gerado em sub-bacias urbanas (EPA et al., 2015). No SWMM, o processo de geração de escoamento é representado por sub-bacias que recebem precipitação, enquanto o sistema de drenagem é descrito por uma rede de nós e ligações, incluindo condutos, dispositivos de controle e unidades de armazenamento.

Com o avanço das ferramentas computacionais, a integração de modelos hidrológicos com linguagens de programação tem ampliado significativamente as possibilidades de análise. Nesse contexto, a linguagem Python destaca-se por sua flexibilidade e amplo conjunto de bibliotecas voltadas à simulação numérica, análise de dados e automação de processos (Dysarz, 2018).

Dessa forma, foi utilizada a biblioteca PySWMM, que consiste em uma interface em Python para o motor de cálculo do SWMM, permitindo o acesso e a manipulação do modelo durante o tempo de simulação (McDonnell et al., 2020). Essa integração possibilita a execução automatizada de simulações, bem como a modificação dinâmica de parâmetros hidráulicos e hidrológicos.

Para o desenvolvimento da metodologia, foi inicialmente considerado um modelo conceitual simplificado, baseado no EPA SWMM (2015), composto por um sistema simplificado de drenagem urbana. A escolha desse modelo teve como objetivo focar na avaliação da aplicação do PySWMM, garantindo ao mesmo tempo uma estrutura de simulação validada e reprodutível. Esse modelo é composto por sub-bacias com diferentes percentuais de impermeabilização conectadas a uma rede de drenagem, permitindo a análise controlada do comportamento hidráulico do sistema. A configuração do modelo conceitual, incluindo as sub-bacias, o controle LID e o perfil hidráulico, é apresentada na Figura 02.

A intervenção foi realizada por meio da implementação de práticas de LID, especificamente pavimentos permeáveis, representados no SWMM como estruturas multicamada capazes de simular processos de infiltração, armazenamento e liberação controlada do escoamento (Ahiablame, Engel e Chaubey, 2012). A área ocupada pelo LID foi variada progressivamente, com redução equivalente da fração impermeável das sub-bacias.

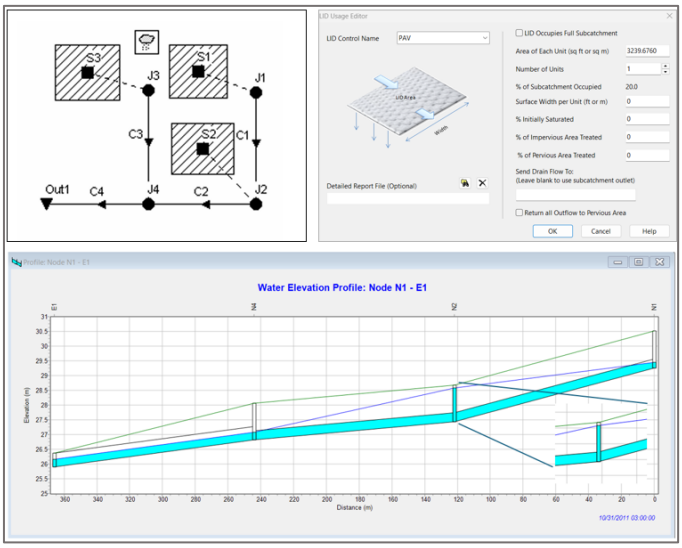


Figura 02: Representação do modelo conceitual no SWMM, incluindo a configuração das sub-bacias, do controle LID e do perfil hidráulico do sistema.
Fonte: Adaptado de EPA SWMM (2015)

Para a definição da área mínima necessária de LID, foi desenvolvido um procedimento automatizado baseado em busca incremental discreta no espaço de soluções, conforme ilustrado na Figura 03. O algoritmo consiste na geração iterativa de cenários, nos quais a área de pavimento permeável é aumentada em incrementos constantes, sendo cada cenário avaliado quanto ao atendimento de um critério hidráulico predefinido.

No presente estudo, o incremento de área (ΔA) foi definido como uma fração da área impermeável inicial das sub-bacias, sendo adotado, inicialmente, um valor correspondente a 10%. Esse incremento controla a resolução do processo iterativo, permitindo uma variação progressiva e sistemática das condições de uso do solo.

As simulações foram executadas de forma automatizada utilizando a biblioteca PySWMM, sendo implementada paralelização computacional para acelerar o processamento dos múltiplos cenários. Essa abordagem permite a execução simultânea de diferentes configurações do modelo, reduzindo significativamente o tempo total de análise.

Após a execução de cada cenário, os resultados foram processados automaticamente a partir dos arquivos de saída do SWMM, sendo extraída a série temporal da altura da lâmina d'água em um nó crítico do sistema. Para cada simulação, foi determinada a altura máxima atingida ao longo do evento.

O critério de avaliação adotado baseou-se na comparação entre a altura máxima simulada e a profundidade máxima admissível do nó (MaxDepth), definida neste estudo como 1,25 m. Considerou-se que o sistema operava sem sobrecarga quando a altura máxima era inferior a esse limite, sendo então identificada a primeira configuração que satisfaz a condição hidráulica estabelecida.

Ressalta-se que o valor de ΔA pode ser ajustado de acordo com o nível de precisão desejado, sendo que incrementos menores tendem a produzir estimativas mais próximas da área mínima teórica, ao custo de maior número de simulações.

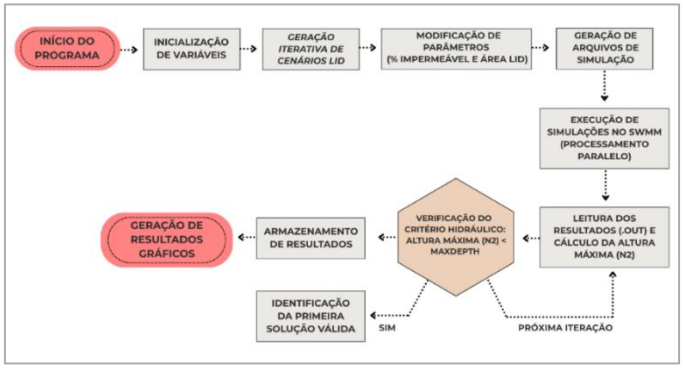


Figura 03: Fluxograma do procedimento automatizado de geração e avaliação Iterativa de cenários LID utilizando PySWMM.
Fonte: Autores (2026)

Para validação da metodologia, o procedimento foi aplicado a um modelo real da bacia do Canal Madame Lynch, localizada em Asunción (Paraguai), caracterizada por elevada impermeabilização e ocorrência de eventos de transbordamento documentados. O modelo representa um sistema urbano complexo, composto por múltiplas sub-bacias e simulado com base em um evento real de precipitação.

Nesse contexto, a biblioteca PySWMM foi utilizada para automatizar a modificação dos parâmetros das sub-bacias, a execução das simulações e a extração dos resultados hidráulicos, permitindo a análise sistemática de múltiplos cenários sem intervenção manual direta no modelo.

Diferentemente da aplicação no modelo conceitual, no caso real da bacia do Canal Madame Lynch a metodologia foi adaptada para refletir a complexidade do sistema, considerando a heterogeneidade das sub-bacias, a identificação de áreas prioritárias de intervenção e o comportamento hidráulico observado no modelo calibrado. A representação do modelo da bacia e a identificação do nó crítico são apresentadas na Figura 04.

Inicialmente, foram identificadas as sub-bacias prioritárias com maior contribuição para a geração de escoamento superficial, sendo selecionadas aquelas com elevados níveis de impermeabilização (≥60%). Posteriormente, essas sub-bacias foram ordenadas segundo um critério de prioridade definido pelo produto entre área e percentual impermeável, priorizando aquelas com maior potencial de geração de escoamento e impacto nos caudais de pico.

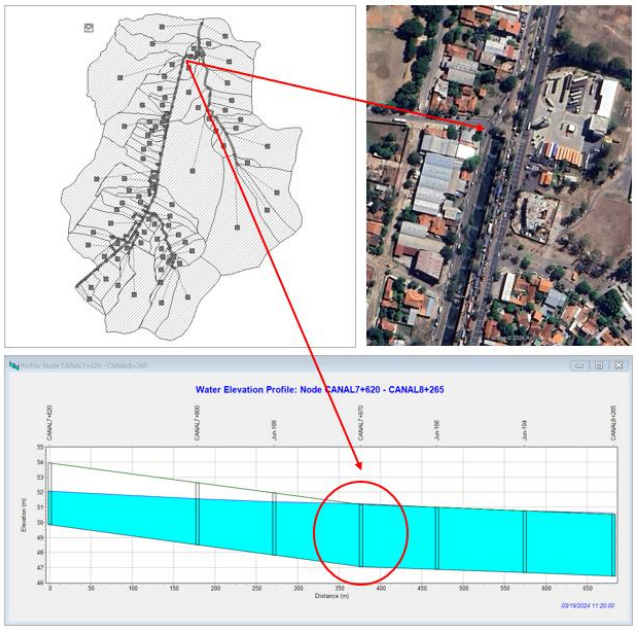


Figura 04 Modelo da bacia do Canal Madame Lynch e identificação do nó crítico no perfil hidráulico.
Fonte: Autores (2026)

A geração dos cenários foi realizada de forma automatizada a partir de um procedimento iterativo que combina expansão espacial (inclusão de novas sub-bacias) e o aumento da intensidade da intervenção (maior área de pavimento permeável em cada sub-bacia). A cada iteração, novas sub-bacias são progressivamente incluídas no processo de intervenção, caracterizando uma expansão espacial da aplicação de infraestrutura verde no sistema. Simultaneamente, foi aplicado um aumento incremental na área de pavimento permeável em cada sub-bacia selecionada, representando o aumento da intensidade da intervenção (Figura 05).

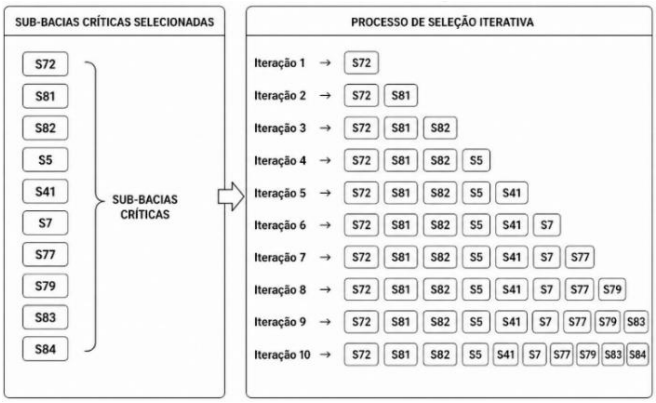


Figura 05: Seleção progressiva de sub-bacias prioritárias ao longo das iterações do procedimento automatizado.
Fonte: Autores (2026)

Para cada cenário, um novo arquivo de entrada do modelo (formato .inp) foi automaticamente gerado, incorporando as modificações na fração impermeável das sub-bacias e a inclusão das unidades de LID correspondentes. Em seguida, as

simulações foram executadas utilizando o motor de cálculo do SWMM, sendo os resultados processados automaticamente para a obtenção da altura máxima da lâmina d'água no nó crítico.

O nó crítico foi identificado com base na análise de eventos históricos de transbordamento registrados na bacia, correspondendo à seção com maiores níveis de sobrecarga durante eventos de chuva intensa. O desempenho de cada cenário foi avaliado com base no comportamento hidráulico nesse ponto de controle. Como critério hidráulico, foi adotado um limite máximo de 4,0 m para a altura da lâmina d'água, correspondente à capacidade da estrutura de saída (galeria), a partir da qual se caracteriza a ocorrência de extravasamento.

A solução ótima foi definida como a primeira configuração capaz de atender ao critério hidráulico estabelecido, caracterizando uma abordagem sistemática baseada na avaliação progressiva de cenários.

Dessa forma, a abordagem proposta permite a identificação de soluções mínimas para o dimensionamento de infraestrutura verde, reduzindo a subjetividade no processo de análise e ampliando a capacidade de suporte à tomada de decisão em sistemas de drenagem urbana.

Resultados e Discussão

Como etapa inicial de validação da metodologia, foi aplicado o procedimento iterativo em um modelo conceitual baseado no EPA SWMM (2015). Os resultados obtidos evidenciam uma redução progressiva da altura máxima no nó de controle à medida que a área de pavimento permeável é incrementada, refletindo a diminuição do escoamento superficial gerado na sub-bacia.

É possível observar que o sistema inicialmente operava em condição de sobrecarga, com altura máxima igual ao limite admissível. A partir do processo iterativo, foi identificada uma configuração que restabelece condições hidráulicas adequadas, correspondente a uma área aproximada de 3239,68 m² de pavimento permeável, resultando em redução da altura máxima para valores inferiores ao limite estabelecido. Os resultados detalhados das simulações são apresentados na Tabela 01.

Nº iteração	Área Bacia (m^2)	Área impermeável (%)	Área do pavimento (m^2)	*Max Depth* (m)
1	16200	33,33	0,00	1,25
2	16200	31,03	539,95	1,25
3	16200	28,57	1079,89	1,25
4	16200	25,92	1619,84	1,25
5	16200	23,07	2159,78	1,25
6	16200	20,00	2699,73	1,25
7	16200	16,66	3239,68	1,15
8	16200	13,04	3779,62	1,05
9	16200	9,09	4319,57	0,94
10	16200	4,76	4859,51	0,84

Tabela 01: Resultados das simulações com variação progressiva da área de LID e do percentual de impermeabilização, destacando a redução da altura máxima no nó de controle.
Fonte: Autores (2026)

Os resultados evidenciam um comportamento com a presença de um limiar hidráulico na resposta do sistema, no qual incrementos iniciais de área de LID produzem reduções menos significativas na altura máxima, enquanto, a partir de um determinado limiar, a eficiência das intervenções torna-se mais expressiva.

Esse comportamento está associado ao aumento da capacidade de infiltração e armazenamento proporcionado pelas práticas de LID, que contribuem para a redução dos volumes escoados e a atenuação das vazões de pico, conforme também observado e discutido na literatura (Ahiablame, Engel e Chaubey, 2012a). Esses resultados também estão em concordância com os efeitos hidrológicos da urbanização descritos por Fletcher, Andrieu e Hamel (2013) e Walsh et al. (2005), nos quais o aumento da impermeabilização intensifica o escoamento superficial e a ocorrência de sobrecargas.

Dessa forma, os resultados demonstram indícios de consistência da metodologia proposta em ambiente controlado, servindo como base potencial para sua aplicação em sistemas reais mais complexos.

A aplicação da metodologia no modelo real da bacia do Canal Madame Lynch permitiu avaliar o desempenho do procedimento em um sistema urbano complexo, caracterizado por elevados níveis de impermeabilização e presença de sobrecargas em pontos críticos.

Os resultados obtidos evidenciam uma redução progressiva da altura máxima no nó crítico ao longo das iterações, passando de aproximadamente 4,18 m na condição inicial para valores inferiores ao limite hidráulico estabelecido de 4,0 m. A primeira configuração capaz de atender ao critério hidráulico foi identificada nas iterações finais, com valores próximos a 3,96 m e 3,83 m, indicando a eliminação das condições de extravasamento no sistema. A evolução das intervenções e seus efeitos no nó crítico são apresentados na Tabela 02.

Iteração	Sub-bacias intervencionadas	% LID	Altura (m)
1	S72	10%	4.184
2	S72, S81	20%	4.184
3	S72, S81, S82	30%	4.156
4	S72, S81, S82, S5	40%	4.141
5	S72, S81, S82, S5, S41	50%	4.120
6	S72, S81, S82, S5, S41, S7	60%	4.106
7	S72, S81, S82, S5, S41, S7, S77	70%	4.084
8	S72, S81, S82, S5, S41, S7, S77, S79	80%	4.063
9	S72, S81, S82, S5, S41, S7, S77, S79, S83	90%	3.964
10	S72, S81, S82, S5, S41, S7, S77, S79, S83, S84	100%	3.826

Tabela 02: Resultados da aplicação da estratégia de intervenção progressiva com LID no caso real, incluindo a expansão das sub-bacias intervencionadas e a variação da altura no nó crítico.
Fonte: Autores (2026)

Ressalta-se que a conversão total da área impermeável em LID representa um cenário teórico limite, utilizado para fins de análise do comportamento do sistema, não sendo necessariamente viável do ponto de vista prático.

A análise da curva de resposta demonstra que, de forma semelhante ao modelo conceitual, o comportamento do sistema é caracterizado pela existência de um limiar de resposta hidráulica, a partir do qual reduções mais significativas da altura passam a ocorrer com o aumento da área de intervenção com LID.

Esse resultado indica que incrementos iniciais produzem efeitos limitados na atenuação dos níveis de água, enquanto, a partir de um determinado nível de intervenção, o sistema passa a responder de forma mais eficiente, permitindo o controle das condições de sobrecarga no nó crítico, conforme evidenciado na Figura 06. Além disso, observou-se que a abordagem automatizada permite a avaliação sistemática de múltiplos cenários, o que seria operacionalmente inviável por meio de simulações manuais, especialmente em modelos de grande escala como o analisado neste estudo.

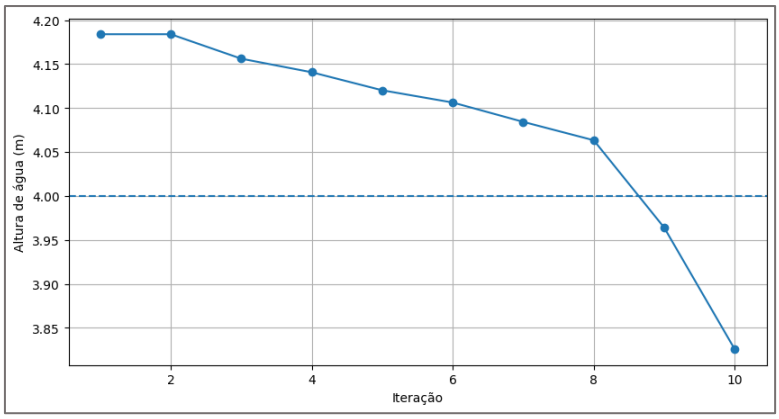


Figura 06: Redução da altura máxima no nó crítico com o aumento progressivo da intervenção com LID no caso real (Canal Madame Lynch).
Fonte: Autores (2026)

Do ponto de vista prático, observou-se que a realização de um número reduzido de iterações (por exemplo, da ordem de 10 simulações) pode ser viável em procedimentos manuais no ambiente do SWMM. No entanto, quando se busca uma estimativa mais precisa da área mínima de LID, seja por critérios econômicos, otimização do dimensionamento ou adequação a restrições de projeto, o número de combinações a serem avaliadas pode aumentar significativamente, frequentemente ultrapassando dezenas ou até centenas de simulações. A influência do incremento ΔA é analisada na Tabela 03.

Nesse contexto, a execução manual torna-se inviável, tanto pelo tempo requerido quanto pela complexidade operacional, evidenciando a vantagem do uso do PySWMM para automatização e exploração sistemática do espaço de soluções. Destaca-se que, uma vez estruturado o procedimento automatizado, a simulação de dezenas ou até centenas de cenários pode ser realizada em poucos minutos, o que representa uma redução significativa do tempo de análise em comparação com abordagens manuais.

Essa abordagem permite não apenas a variação progressiva da área de LID, mas também a análise de diferentes estratégias de intervenção, incluindo distintas combinações de sub-bacias, como aquelas de maior área, maior grau de impermeabilização ou maior proximidade ao ponto de controle, ampliando significativamente as possibilidades de avaliação de cenários.

ΔA	Nº de simulações	Nº da iteração	Altura máxima (m)	Área impermeável (%)	Área de pavimento (m^2)
0,100	10	7	1,146	16,66	3239,68
0,050	20	12	1,202	18,37	2969,70
0,025	40	22	1,225	19,19	2834,72
0,010	100	52	1,244	19,68	2753,73

Tabela 03: Análise de sensibilidade do incremento ΔA na estimativa da área mínima de LID no modelo conceitual baseado no SWMM
Fonte: Autores (2026)

Do ponto de vista metodológico, os resultados evidenciam o potencial da abordagem proposta como ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo a identificação sistemática de soluções viáveis a partir da exploração automatizada de cenários. Diferentemente de abordagens convencionais baseadas em simulações pontuais, o procedimento adotado possibilita a avaliação contínua do efeito das intervenções, reduzindo a subjetividade no processo de dimensionamento.

No modelo conceitual, os resultados permitiram compreender o comportamento do sistema em ambiente controlado. Já na aplicação ao caso real da bacia do Canal Madame Lynch, foi possível verificar a aplicabilidade da metodologia em um sistema urbano complexo, evidenciando sua capacidade de identificar configurações eficientes de intervenção para mitigação de sobrecargas hidráulicas.

Além disso, destaca-se que a metodologia apresenta potencial para aplicação em estudos comparativos entre condições pré e pós-implementação de soluções LID em sistemas reais, permitindo avaliar de forma quantitativa os impactos dessas intervenções no comportamento hidrológico e hidráulico das bacias urbanas.

Entretanto, é importante destacar que, embora o modelo real represente de forma mais fiel as condições do sistema, ainda existem incertezas associadas à variabilidade espacial dos parâmetros, às mudanças no uso do solo e à variabilidade dos dados de precipitação. Dessa forma, a aplicação da metodologia pode ser aprimorada por meio da análise de diferentes cenários hidrológicos e da incorporação de abordagens de análise de incerteza.

Apesar dessas limitações, a abordagem proposta apresenta elevada flexibilidade, podendo ser aplicada a diferentes tipos de práticas de LID, condições de uso do solo e objetivos de projeto. Além disso, o método pode ser interpretado como uma forma simplificada de otimização, abrindo possibilidades para a aplicação futura de técnicas mais avançadas, como algoritmos de busca adaptativa ou otimização multiobjetivo.

Adicionalmente, a metodologia pode ser utilizada como etapa preliminar no processo de análise, permitindo a identificação de um conjunto reduzido de soluções viáveis, as quais podem posteriormente ser avaliadas de forma mais detalhada por meio de simulações específicas ou análises manuais.

Considerações Finais

Os resultados demonstraram que a aplicação de práticas de LID, especificamente pavimentos permeáveis, contribui de forma efetiva para a redução de sobrecargas em sistemas de drenagem urbana. A metodologia proposta permitiu identificar, de forma sistemática, configurações capazes de restabelecer condições hidráulicas adequadas, incluindo a estimativa da área mínima necessária de intervenção.

A validação em modelo conceitual e sua aplicação em um caso real, na bacia do Canal Madame Lynch, evidenciaram a aplicabilidade da abordagem em sistemas urbanos complexos. O uso integrado do SWMM com Python, por meio do PySWMM, mostrou-se uma ferramenta com potencial para automatizar a análise de múltiplos cenários e apoiar a tomada de decisão.

Observou-se a presença de um limiar hidráulico na resposta do sistema, indicando que soluções parciais podem ser altamente uteis para o controle de sobrecargas. Apesar das limitações, a metodologia apresenta potencial como ferramenta de apoio preliminar ao dimensionamento, podendo ser complementada por análises detalhadas e calibração em aplicações reais.

Como perspectivas futuras, destaca-se a aplicação da metodologia em sistemas onde soluções LID já tenham sido implementadas, permitindo a análise comparativa entre cenários pré e pós-intervenção, bem como a incorporação de técnicas de otimização mais avançadas e análises de incerteza.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e ao grupo de pesquisa em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias pelo apoio prestado.

Referências Bibliográficas

BARBOSA, A. E.; FERNANDES, J. N.; DAVID, L. M. Key issues for sustainable urban stormwater management. 2012.

AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. **Water**, Air, and Soil Pollution, v. 223, n. 7, p. 4253–4273, 2012.

DYSARZ, T. Application of python scripting techniques for control and automation of HEC-RAS simulations. **Water**, v. 10, n. 10, 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. 2015.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 261–279, 2013.

GOONETILLEKE, A. et al. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. **Journal of Environmental Management**, v. 74, n. 1, p. 31–42, 2005.

GUNN, R. et al. Development of two indices for determining hydrologic implications of land use changes in urban areas. **Urban Water Journal**, v. 9, n. 4, p. 239–248, 2012.

HARBOR, J. M. A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology. **Journal of the American Planning Association**, v. 60, n. 1, p. 95–108, 1994.

UNITED STATES DEPARTMENT OF HOUSING AND URBAN DEVELOPMENT (HUD). The practice of low impact development. Disponível em: http://www.huduser.org. Acesso em: 8 abr. 2026.

COFFMAN, L. S. et al. **Low-impact development: an innovative alternative approach to stormwater management**. 2004.

LEOPOLD, L. B. **Hydrology for urban land planning: a guidebook on the hydrologic effects of urban land use**. 1968.

LLOYD, S. D. Water sensitive urban design in the Australian context: synthesis of a conference. 2001.

MCDONNELL, B. et al. PySWMM: the Python interface to Stormwater Management Model (SWMM). **Journal of Open Source Software**, v. 5, n. 52, p. 2292, 2020.

MOSCRIP, A. L.; MONTGOMERY, D. R. Urbanization, flood frequency, and salmon abundance in Puget Lowland streams. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, n. 6, 1997.

NIE, W. et al. Assessing impacts of land use and land cover changes on hydrology for the Upper San Pedro watershed. **Journal of Hydrology**, v. 407, n. 1–4, p. 105–114, 2011.

O'DRISCOLL, M. et al. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States. **Water**, v. 2, n. 3, p. 605–648, 2010.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3830–3836, 2007.

TANG, Z. et al. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. **Journal of Environmental Management**, v. 76, n. 1, p. 35–45, 2005.

TRYBY, M. E. et al. Intelligent control of combined sewer systems using PySWMM: a Python wrapper for EPA's Stormwater Management Model. **Environmental Modelling and Software**, v. 179, 2024.

WALSH, C. J. et al. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. **Journal of the North American Benthological Society** , v. 24, n. 3, 2005.

ADENSAMENTO URBANO E DIRETRIZES DO PDDU NA SUSCETIBILIDADE A ALAGAMENTOS: ANÁLISE ESPACIAL DO TRECHO URBANO DO RIO VERRUGA (BA)

1 Fabrissa Cotrim Pires, 2 Davi de Souza Ferreira, 3 Magno Lucas Alcantara Silva, 4 Allandelon Silva Maciel, 5 Antonio Gabriel Rocha Silva, 6 Danyella Santos Silveira, 7 Camila Daniele Willers, 8 Joseane Oliveira da Silva

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista, e-mail: fahcotrim4@gmail.com; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista, e-mail: dsferreira0705@gmail.com; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista, e-mail: lucasalcantara2501@gmail.com; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista, e-mail: allandelonmaciel45@gmail.com; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista, e-mail: gabrielpessoa541@gmail.com; 6 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista, e-mail: danyella2024silveira@gmail.com; 7 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista, e-mail: camila.willers@ifba.edu.br; 8 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista, e-mail: joseaneos@ifba.edu.br

Palavras-chave: Impermeabilização do solo; Coeficiente de aproveitamento; Drenagem urbana.

Resumo

O presente estudo analisa a relação entre o ordenamento territorial, orientado pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU), e os impactos da expansão urbana sobre a dinâmica hidrológica na bacia do Rio Verruga, em Vitória da Conquista (BA). A metodologia baseou-se na análise de dados geoespaciais por meio de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), integrando parâmetros urbanísticos de uso e ocupação do solo e a identificação de áreas suscetíveis a alagamentos. Os resultados indicam que o crescimento urbano esteve associado à canalização do rio e à supressão da vegetação marginal, intensificando processos como erosão, deslizamentos e assoreamento. Observa-se, ainda, que o adensamento urbano, aliado às intervenções no curso natural do rio, contribui para o agravamento dos problemas de drenagem urbana, em função da degradação de um dos principais elementos naturais de escoamento da cidade. Tais evidências reforçam a necessidade de integração entre planejamento urbano e dinâmica hidrológica, especialmente em áreas suscetíveis a alagamentos.

Introdução

Localizada na região sudoeste da Bahia, com 370.879 habitantes, Vitória da Conquista é classificada como a 3 maior cidade do estado segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022). Com tipologia climática caracterizada por um regime de transição entre subúmido e seco, observa-se que as chuvas de maior intensidade concentram-se nos períodos de primavera e verão. Essas condições climáticas são fortemente condicionadas pelas elevadas altitudes regionais, com destaque para a Serra do Periperi, que constitui um dos principais compartimentos topográficos locais, apresentando cotas superiores a 1000 metros. Tal configuração altimétrica atua diretamente no escoamento superficial em direção à porção sul da cidade, a qual apresenta altitudes mais baixas, em torno de 836 metros (Rocha et al.).

Ao longo do desenvolvimento urbano do município, as atividades antrópicas relacionadas ao uso e ocupação do solo promoveram transformações significativas na cobertura e na paisagem local. Tais mudanças refletem-se na atual condição do Rio Verruga, que apresenta parte de sua extensão inserida na malha urbana sob forma canalizada. Sua nascente localiza-se na Reserva Florestal do Poço Escuro, no bairro Guarani, e sua bacia hidrográfica possui aproximadamente 901 km², estendendo-se por cerca de 57,5 km. Ao longo de seu percurso, atravessa o município de Vitória da Conquista por meio de galerias subterrâneas, drenando a porção centro-sul da cidade (Prefeitura Municipal De Vitória Da Conquista, 2025).Nesse contexto, a Figura 1 ilustra as transformações no leito do rio e em sua rede hidrográfica entre 1840 e 2000.

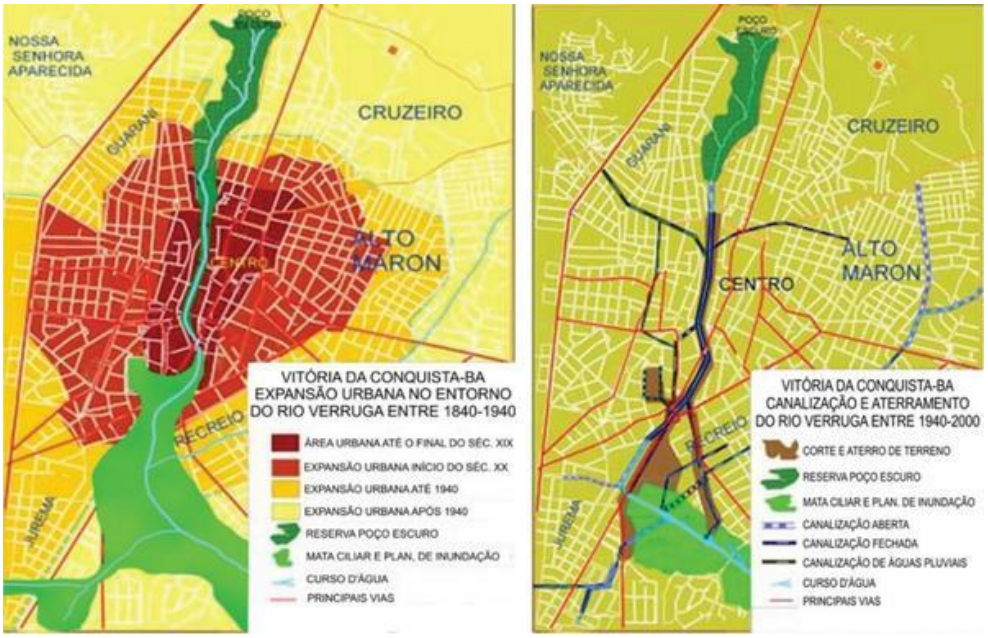


Figura 01- Mapas da Expansão urbana no entorno do leito do Rio Verruga e de sua canalização, ao longo dos anos 1840 a 2000. Fonte: ROCHA (2008 *apud* VASCONCELOS; MARTA, 2021)).

O referido corpo hídrico exerce significativa influência na dinâmica urbana, tendo orientado o processo de ocupação e o adensamento populacional, especialmente ao longo de suas margens (Vasconcelos; Marta, 2021). Ademais, percorre mais de 50% da zona urbana e atua como principal receptor do escoamento pluvial e de efluentes da cidade (Filho *et al*., 2015; Carvalho *et al*., 2023).

Além disso, a recorrência de eventos pluviométricos intensos agrava esse cenário. De acordo com a Defesa Civil, entre os dias 23 e 27 de fevereiro de 2026, foi registrada precipitação média de 52,37 mm no município, sendo também observada a possibilidade de eventos superiores a 60 mm/h ou 100 mm/dia, conforme alertas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Tais ocorrências, comuns em períodos chuvosos na região, elevam o risco de alagamentos, transbordamentos e movimentos de massa e evidenciam a vulnerabilidade do sistema urbano frente às dinâmicas hidrológicas (Prefeitura Municipal De Vitória Da Conquista, 2026).

No âmbito do planejamento urbano, o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) e o Código de Obras estabelecem parâmetros como o Coeficiente de Aproveitamento (CA), o qual restringe a densidade e o potencial construtivo das edificações (Lima, 2022). Esses instrumentos atrelados ao zoneamento urbano, influenciam diretamente o uso e ocupação do solo e, consequentemente, a dinâmica de drenagem urbana.

Nesse contexto, o NDBI (Normalized Difference Built-up Index), proposto por Zha et al. (2003), constitui um importante indicador para a discriminação de áreas edificadas, por meio da combinação das bandas 5 (NIR) e 6 (SWIR), permitindo a análise da expansão das superfícies impermeáveis no espaço urbano (Sakuno et al., 2017). Sua aplicação, associada ao uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilita o processamento e a interpretação de dados espaciais, contribuindo para a representação de diferentes cenários de uso e ocupação do solo urbano e suas implicações hidrológicas.

Diante disso, este estudo tem como objetivo compreender a relação entre o adensamento de áreas construtivas e as diretrizes estabelecidas pelo PDDU com a ocorrência de problemas de alagamento e drenagem, por meio da análise de dados geoespaciais e de parâmetros urbanísticos de uso do solo nos bairros inseridos no trecho urbano da bacia do rio Verruga, em Vitória da Conquista, com o auxílio de ferramentas de SIG.

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido no município de Vitória da Conquista, localizado na região sudoeste do estado da Bahia, tendo como recorte espacial a sub-bacia urbana do Rio Verruga. A área de estudo compreendeu os bairros atravessados pelo curso d'água desde sua nascente, situada no bairro Guarani, até os setores urbanos localizados nos bairros Centro, Jurema, Recreio, Boa Vista, Candeias, Espírito Santo e Universidade. Esse recorte foi definido em função da relevância hidrogeomorfológica do rio no contexto urbano local e de sua recorrente associação a eventos de alagamento.

A delimitação territorial foi realizada a partir dos limites oficiais de bairros disponibilizados pelo IBGE (2022), em formato *shapefile*. A base hidrográfica referente ao Rio Verruga foi obtida junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2017). Todo o processamento espacial foi conduzido em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, utilizando o software QGIS versão 3.44.8.

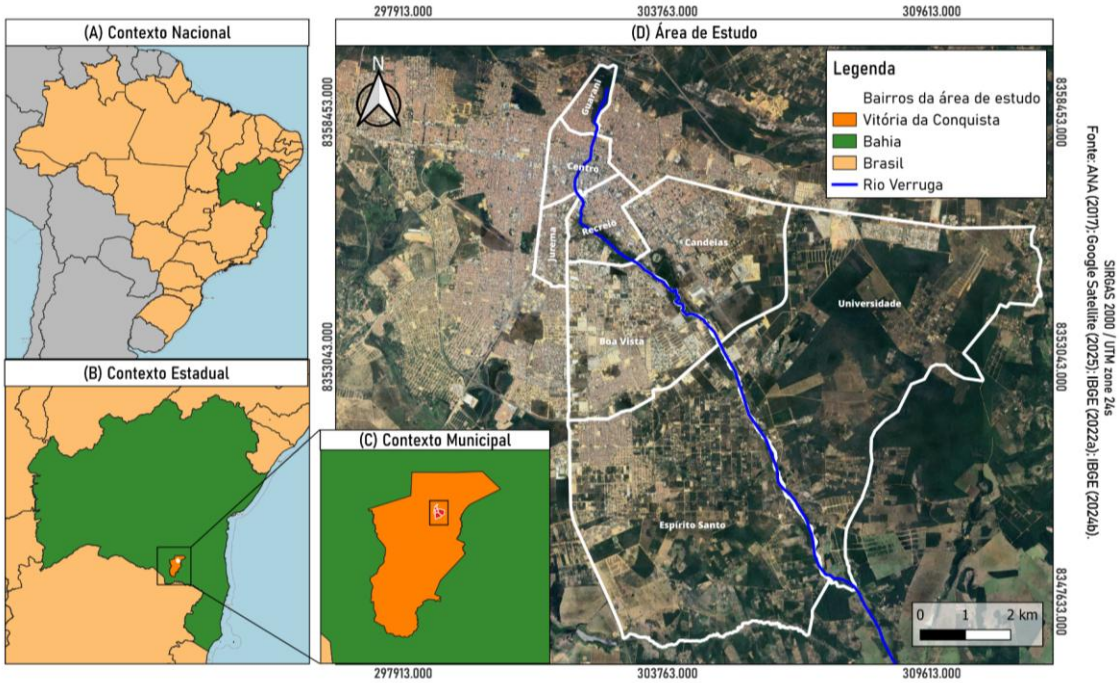


Figura 02 - Mapa de localização do município de Vitória da Conquista com delimitação da área de estudo. Fonte: Autores (2026).

A delimitação das áreas potencialmente suscetíveis a alagamentos foi realizada mediante a integração de dois parâmetros morfométricos derivados do Modelo Digital de Elevação (MDE): altitude e declividade. Considerou-se que áreas situadas em cotas altimétricas mais baixas e com reduzida inclinação topográfica apresentam maior propensão ao acúmulo de água superficial, especialmente em fundos de vale e superfícies de baixa energia de escoamento.

Para a elaboração do mapa de suscetibilidade, utilizou-se um MDE obtido na plataforma TOPODATA, desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Brasil, [n.d]), com resolução espacial de 30 metros. Os valores altimétricos registrados na área de estudo variaram aproximadamente entre 691 m e 1.078 m. A partir desse modelo, foi gerado o raster de declividade por meio das ferramentas de análise de terreno do QGIS.

Em razão da utilização do sistema geográfico SIRGAS 2000 (EPSG:4674), adotou-se fator de conversão igual a 111.120, correspondente à aproximação métrica de um grau na superfície terrestre, com a finalidade de compatibilizar as unidades horizontais e verticais durante o cálculo da declividade. O resultado consistiu em um raster de declividade expresso em graus, permitindo a identificação de superfícies planas ou suavemente onduladas associadas à maior suscetibilidade ao alagamento. A identificação das áreas suscetíveis foi realizada por meio da ferramenta Calculadora Raster, empregando-se a seguinte expressão:

("MDE" < 850) AND ("Declividade" < 5) (01)

O limiar altimétrico de 850 m foi adotado por representar setores relativamente rebaixados do relevo urbano, associados a fundos de vale e zonas potenciais de concentração hídrica. Enquanto o limite de 5° de declividade corresponde a superfícies com baixa capacidade de drenagem gravitacional, favorecendo a retenção e o acúmulo de água superficial. A combinação desses critérios possibilitou a delimitação preliminar das áreas com maior propensão a eventos de alagamento.

Embora a metodologia adotada não incorpore variáveis hidrológicas e hidráulicas mais complexas, tais como intensidade pluviométrica, infiltração do solo, uso e cobertura da terra ou dinâmica detalhada da rede de drenagem, o procedimento permite representar de forma consistente o condicionamento topográfico, reconhecido como um dos principais fatores controladores da distribuição espacial de áreas alagáveis em ambientes urbanos.

Para análise da urbanização e impermeabilização superficial, foi utilizado o Índice de Diferença Normalizada para Áreas Construídas (NDBI – Normalized Difference Built-up Index), amplamente empregado na detecção de superfícies urbanizadas por meio das bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e infravermelho próximo (NIR), conforme a equação (02):

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \qquad (02)$$

Os valores do índice variam entre -1 e +1, sendo que valores mais próximos de +1 indicam maior presença de áreas construídas impermeáveis, com alto índice de ocupação urbana ou solo exposto, enquanto valores próximos de 0 correspondem a áreas de transição, e valores negativos estão associados a superfícies com maior cobertura vegetal ou presença de corpos d'água.

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 9, obtidas no repositório da United States Geological Survey (USGS), integrando dados dos sensores Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS). A cena selecionada foi registrada em 07/03/2026, às 09h49min42s (horário local), equivalente a 12h49min42s UTC, apresentando cobertura de nuvens inferior a 4%, condição considerada adequada para maximizar a confiabilidade analítica. Para a representação cartográfica final, adotou-se o sistema projetado SIRGAS 2000 / UTM Zona 24S, visando maior precisão métrica e melhor interpretação espacial.

Posteriormente, os resultados cartográficos foram correlacionados com as diretrizes urbanísticas estabelecidas pela Lei Complementar nº 2.959/2024, que institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) do município. Essa etapa teve como objetivo comparar os cenários identificados nos mapas temáticos com os parâmetros normativos vigentes, verificando sua compatibilidade com a realidade territorial observada, o histórico de ocupação urbana e a recorrência de eventos de alagamento na área de estudo.

Como principal variável de análise urbanística, adotou-se o Coeficiente de Aproveitamento Máximo (CAM), por representar diretamente o potencial de adensamento construtivo permitido em cada zona urbana. Para zonas em que o CAM não foi explicitamente informado pelo PDDU, utilizaram-se, de forma complementar, o Coeficiente de Aproveitamento Básico (CAB) e a dimensão mínima de lote, quando disponíveis.

A escolha do CAM justifica-se por sua estreita relação com o grau potencial de impermeabilização do solo. Valores mais elevados tendem a permitir maior ocupação edificada dos lotes, favorecendo a ampliação de superfícies impermeáveis, a redução da infiltração natural e o aumento do escoamento superficial, fatores diretamente associados à intensificação de alagamentos urbanos. Dessa forma, a análise integrada entre suscetibilidade topográfica, índice NDBI e parâmetros urbanísticos permitiu interpretar se o direcionamento do PDDU se aproxima de modelos tradicionais de expansão urbana ou de abordagens mais sustentáveis de manejo das águas pluviais.

Resultados e Discussão

Esta seção permite apresentar os resultados da análise de dados geoespaciais e parâmetros urbanísticos de uso do solo referentes aos bairros que compõem o trecho urbano do Rio Verruga no município em questão. De modo a evidenciá-los por meio dos mapas e tabela, permitindo a correlação e identificação das áreas críticas sucetíveis a alagamento, e das áreas impermeabilizadas identificadas pelo mapa de NDBI. O que permitiu verificar se o adensamento urbano incentivado pelo PDDU está coerente com o cenário de drenagem urbana desta região.

O mapa a seguir detecta áreas suscetíveis a alagamento, nos bairros que compõem a bacia de drenagem do Rio Verruga, destacando a Avenida Caracas, localizada no bairro Jurema, que possui um importante canal aberto de drenagem pluvial. O qual sofre transbordamento do leito em episódios recorrentes de alagamento. Tal cenário provoca o arraste hidráulico de veículos e culminou, num intervalo de apenas quatro meses (09/11/2025 a 09/03/2026), no carregamento de duas pessoas, com registro de uma vítima fatal (G1, 2026).

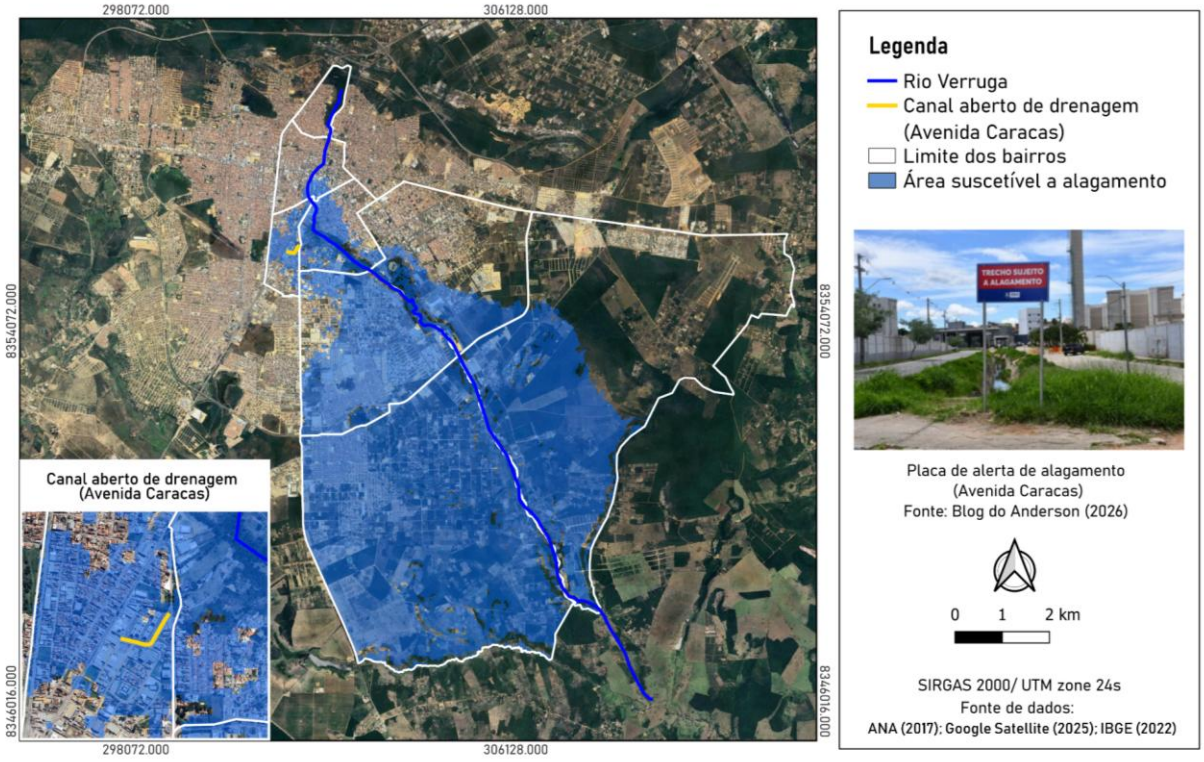


Figura 03 - Mapa de áreas suscetíveis a alagamento no trecho urbano do Rio Verruga no município de Vitória da Conquista. Fonte: Autores (2026)

A partir da análise do mapa, observa-se que todos os bairros da área de estudo, com exceção do bairro Guarani, apresentam trechos com potencial alagável, considerando o comportamento da lâmina d'água em função das inclinações e altitudes calculadas. Nesse contexto, evidencia-se a relevância do Rio Verruga para a drenagem dessa região, uma vez que o escoamento superficial tende a convergir para o seu leito. No entanto, conforme constatado por Carvalho *et al.* (2023, p.339), houve um aumento significativo das áreas construídas na cidade em questão,no ano de 2020, indicando um cenário de intensificação da ocupação do solo, que ainda se verifica atualmente.

Ademais, observou-se, na última década, a redução da densidade da cobertura vegetal no entorno do curso d'água em questão. Nesse contexto, o avanço da urbanização tem contribuído para a intensificar os processos erosivos em suas margens (CARVALHO et al., 2023, p. 339).

Com base no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Vitória da Conquista, aprovado em 2024, foi possível identificar, no zoneamento urbano da sede municipal, as zonas correspondentes à área de estudo, bem como apreender os respectivos coeficientes de aproveitamento de cada zona. Tais valores podem ser visualizados na tabela a seguir:

Bairro	Zonas predominantes	Coeficiente de Aproveitamento Máximo (Cam)/Coeficiente de Aproveitamento Básico (Cab)
Guarani	ZPR-03; ZUC	Cam=1,5 (ZPR-03) Cab= 1 (ZUC)
Centro	ZUM-02; ZIHC-01; ZUM-01	Cam=3 (ZUM-02) Cam=3 (ZIHC-01) Cam=2 (ZUM-01)
Jurema	ZUM-02; ZUM-03; ZEIS-01	Cam=3 (ZUM-02) Cam=3 (ZUM-03) Cab= 1,0; e Lote mín=125,00m² (ZEIS-01)
Recreio	ZPR-02; ZPU	Cam=2,5 (ZPR-02) Cam=2 (ZPU)
Candeias	ZPR-01; ZPR-02	Cam=3 (ZPR-01) Cam=2,5 (ZPR-02)
Boa Vista	ZPR-02; ZPR-01	Cam=2,5 (ZPR-02) Cam=3 (ZPR-01)
Universidade	ZTR-01; ZPR-05	Cam=1 (ZTR-01) Cam=1,5 (ZPR-05)
Espírito Santo	ZTR-01; ZPR-06	Cam=1 (ZTR-01) Cam=1,5 (ZPR-05)

Tabela 01: Coeficientes de aproveitamento das zonas existentes nos bairros da área de estudo.
Fonte: Autores (2026)

À vista dos valores apresentados na Tabela 1, observa-se que o bairro Centro, onde se localiza um trecho canalizado do rio, é predominantemente composto pelas zonas ZUM-02, ZIHC-01 e ZUM-01, caracterizadas por elevados níveis de adensamento conforme as diretrizes do PDDU. Nesse contexto, o plano diretor prevê a adoção de medidas mitigadoras, como o incentivo a soluções alternativas de drenagem urbana, incluindo a manutenção de áreas permeáveis e o reuso de águas pluviais (VITÓRIA DA CONQUISTA, 2024).

A análise também permite evidenciar que na Zona de Parque Urbano (ZPU), situada no bairro Recreio, admite-se uso misto e coeficientes relativamente elevados, com priorização de atividades comerciais e de serviços locais (VITÓRIA DA CONQUISTA, 2024). O que contrasta com sua função ambiental como Parque do Rio Verruga, voltada ao controle do adensamento e à preservação das condições ambientais.

Os maiores valores de coeficiente de aproveitamento máximo estabelecidos pelo zoneamento municipal influenciam diretamente o uso e a ocupação do solo, o que pode ser observado na forte ocupação consolidada e no processo gradual de exposição e impermeabilização do solo nos bairros analisados. Nesse sentido, o mapa a seguir (Figura 4), corrobora com a avaliação do impacto do zoneamento municipal, sobre a configuração da ocupação urbana na cidade.

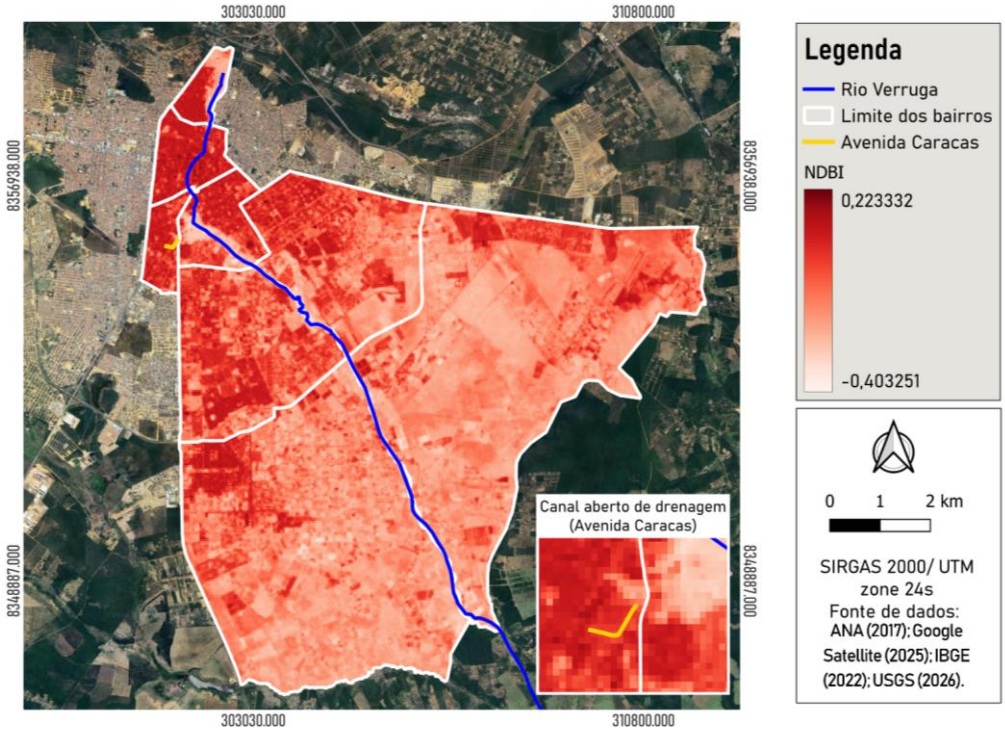


Figura 04- Mapa de NDBI dos bairros que compõem o trecho urbano do Rio Verruga em Vitória da Conquista.
Fonte: Autores (2026)

Através do mapa visualizado na Figura 04, é possível identificar que os bairros Guarani, Centro, Recreio, Jurema, Boa Vista e Candeias, apresentam grande parte de sua superfície impermeabilizada com a coloração de vermelho escuro. Ademais evidencia-se uma considerável proporção de solo impermeabilizado no bairro Guarani, a qual exerce forte pressão sobre a Reserva do Poço Escuro, que abriga a nascente do Rio Verruga.

Assim, a partir da análise da Tabela 1 e do PDDU, verificou-se quais tipos de soluções de drenagem vêm sendo mantidas e incentivadas pelo poder público, sendo o padrão de uso e ocupação do solo inferido com base nos dados apresentados para a área analisada. Esse padrão é corroborado pelo mapa de NDBI (Normalized Difference Built-up Index), que evidencia a predominância de superfícies construídas nas zonas de maior adensamento (maior CAM), reforçando a relação entre a intensificação da ocupação urbana e o aumento da impermeabilização do solo na área de estudo.

Tucci constata que a falta de sustentabilidade do modelo atual de urbanização, caracterizado pela concentração urbana e pela ocupação intensiva dos espaços com superfícies impermeáveis, pode ser observada no aumento da vazão máxima e da frequência das inundações, bem como no aumento da velocidade do escoamento, o que resulta em erosão do solo e na produção de sedimentos para o sistema de drenagem. Portanto, trata-se de um problema cíclico, no qual as principais intervenções de drenagem adotadas, baseadas na canalização e cobertura dos cursos d'água, apenas transferem e, por vezes, intensificam os problemas (Tucci, 2002, P. 29).

Os resultados evidenciam que a relação entre os parâmetros urbanísticos estabelecidos pelo PDDU, especialmente os coeficiente de aproveitamento (CA) e coeficiente de aproveitamento básico (CAB), bem como a dinâmica hidrológica urbana não ocorre de forma homogênea entre os bairros analisados. Áreas de ocupação mais antiga, como Guarani, Jurema, Centro e Recreio, apresentam elevado adensamento consolidado anteriormente à regulamentação urbanística, o que influenciou a posterior definição de coeficientes mais elevados pelo PDDU.

Entretanto, observa-se que bairros mais recentes, como Boa Vista, embora definidos como áreas de expansão urbana, apresentam elevados valores de CAB e CAM, mesmo estando inseridos, em grande parte, em áreas suscetíveis a alagamentos. Tal condição indica uma possível incompatibilidade entre o potencial construtivo permitido e as limitações impostas pela drenagem local, sobretudo quando comparada a bairros como o Jurema, onde eventos recentes evidenciaram a ocorrência de alagamentos severos, inclusive com vítimas.

Por outro lado, o bairro Candeias apresenta comportamento distinto, no qual, apesar dos elevados coeficientes urbanísticos, observa-se menor correspondência entre as áreas de maior adensamento (identificadas por meio do NDBI) e as áreas suscetíveis a alagamento. Esse padrão pode estar associado à maior presença de cobertura vegetal ou a uma distribuição espacial mais heterogênea da impermeabilização, indicando a necessidade de análises mais detalhadas no âmbito do planejamento urbano.

Adicionalmente, verifica-se que bairros como Universidade e Espírito Santo apresentam maior compatibilidade entre os parâmetros urbanísticos e as condições ambientais, ao manterem coeficientes mais baixos em áreas com suscetibilidade a alagamentos, configurando uma abordagem mais conservadora e potencialmente mais adequada à segurança urbana.

Considerações Finais

Por fim, destaca-se a consistência da metodologia adotada, uma vez que possibilitou atingir o objetivo proposto ao evidenciar a relação entre o adensamento urbano consolidado em Vitória da Conquista e as diretrizes estabelecidas pelo PDDU com a ocorrência e o agravamento de problemas de alagamento e drenagem. A aplicação das ferramentas de SIG mostrou-se adequada para a elaboração do mapa de áreas suscetíveis a alagamentos e, mesmo sem incorporar variáveis hidrológicas e hidráulicas mais complexas, apresentou resultados coerentes com os registros empíricos observados no município. Nesse sentido, ressalta-se a Avenida Caracas, que se insere simultaneamente em áreas de elevada impermeabilização e em zonas suscetíveis a alagamento, evidenciando a sobreposição entre maior adensamento urbano e áreas de risco, o que contribui para a intensificação dos impactos hidrológicos e a recorrência de enxurradas.

Nesse contexto, diante da intensificação dos eventos extremos associada às mudanças climáticas, especialmente no que se refere ao aumento da intensidade das precipitações em curtos intervalos de tempo, torna-se pertinente considerar a revisão dos parâmetros urbanísticos, como Coeficiente de Aproveitamento Máximo, em áreas suscetíveis a alagamentos. O controle do adensamento urbano, por meio da adequação desses coeficientes, pode atuar como medida preventiva, complementando as soluções estruturais e não estruturais previstas no PDDU, como a ampliação de áreas permeáveis e o reuso de águas pluviais.

Referências Bibliográficas.

CARVALHO, Lara de Oliveira; SILVA, Joseane Oliveira da; OLIVEIRA, Jacson Tavares de; MEIRA, Manoel Messias Coutinho; DANTAS, Camila Nunes. **Cobertura vegetal e ocupação do solo de Vitória da Conquista-BA: um estudo do crescimento urbano e seus impactos no Rio Verruga**. *Revista de Geografia (Recife)*, Recife, v. 40, n. 3, 2023. DOI: https://doi.org/10.51359/2238-6211.2023.259413. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/2192/da705a7c40a11ea61a37717ddccc2605cf21.pdf. Acesso em: 1 maio 2026.

DINIS, Henrique; BRUNA, Gilda Collet. *A drenagem urbana e o uso e ocupação do solo*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., [ano], [local]. Anais [...]. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/151/7dcae29675397bad44dca0c5bf40d435_2bea728db59c75ce2f0cd552fadf5f1c.pdf. Acesso em: 3 maio 2026.

FIGUEIREDO FILHO, Ueriton da Costa; BRITO, Orleane Souza de; MARTINS, Leonardo Gomes; QUEIROZ, Endel de Jesus; SOUZA, Cristovão Figueiredode. Avaliação de drenagem na bacia do Rio Verruga em Vitória da Conquista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 6., 2015, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2015. Acesso em: 20 abr. 2026.

G1. **Canal onde mulher foi arrastada por enxurrada em Vitória da Conquista é o mesmo onde servidor público caiu**. 2026. Disponível em: https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2026/03/11/canal-onde-mulher-foi-arrastada-por-enxurrada-em-vitoria-da-conquista-e-o-mesmo-onde-servidor-publico-caiu.ghtml. Acesso em: 1 maio 2026.

G1. **Saiba quem era mulher que morreu após ter sido levada por enxurrada na Bahia.** 2026. Disponível em:https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2026/03/12/saiba-quem-era-mulher-que-morreu-apos-ter-sido-levada-por-enxurrada-na-bahia.ghtml. Acesso em: 1 maio 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**: Vitória da Conquista (BA). Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba/vitoria-da-conquista.html. Acesso em: 20 abr. 2026.

LIMA, Ricardo Carvalho de Andrade; ESCOLA NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA (Brasil). ***Avaliação dos custos econômicos do zoneamento nos municípios brasileiros****: evidências para o coeficiente de aproveitamento máximo*. Brasília, DF: ENAP, 2022. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/7409/1/Relat%C3%B3rio%20de%20Pesquisa%20-%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20Custos%20Zoneamento.pdf. Acesso em: 3 maio 2026.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA DA CONQUISTA. **Vitória da Conquista registra precipitação média de 52 mm em quatro dias e segue com ações preventivas.** Vitória da Conquista, 2026. Disponível em: https://www.pmvc.ba.gov.br/vitoria-da-conquista-registra-precipitacao-media-de-52-mm-em-quatro-dias-e-segue-com-acoes-preventivas/. Acesso em: 20 abr. 2026.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA DA CONQUISTA. **Meio ambiente**: ações municipais garantem preservação da Reserva Florestal do Poço Escuro, Rio Verruga e Lagoa das Bateias. Vitória da Conquista, 2025. Disponível em: https://www.pmvc.ba.gov.br/meio-ambiente-acoes-municipais-garantem-preservacao-da-reserva-florestal-do-poco-escuro-rio-verruga-e-lagoa-das-bateias/. Acesso em: 20 abr. 2026.

VASCONCELOS, Luisa Prazeres; MARTA, Felipe Eduardo Ferreira. **Rios urbanos e o poder público: o caso do rio Verruga em Vitória da Conquista, Bahia, Brasil, na segunda metade do século XX**. *Agua y Territorio / Water and Landscape*, [S. l.], n. 19, p. 1–15, 2021. DOI: https://doi.org/10.17561/AT.19.5702. Disponível em: https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/atma/article/view/5702/6048. Acesso em: 28 mar. 2026.

VITÓRIA DA CONQUISTA (BA). **Lei Complementar nº 2.959, de 26 de dezembro de 2024**. Institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Vitória da Conquista – PDDU e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Vitória da Conquista, BA, 26 dez. 2024. Disponível em: https://sapl.vitoriadaconquista.ba.leg.br/media/sapl/public/materialegislativa/2025/19712/a_lei_no_2.959-2024_-_institui_o_pddu.pdf. Acesso em: 1 maio 2026.

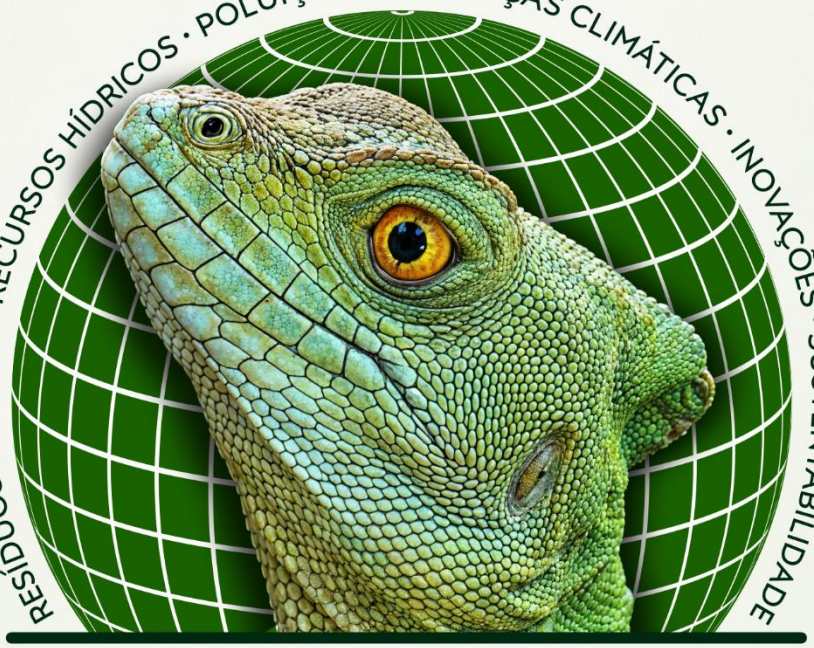
ROCHA, Letícia Vitória Fernandes; OLIVEIRA, Edvaldo; OLIVEIRA, Ísis Sandes de; ARGOLO, Tainá Maria do Nascimento; OLIVEIRA, Victoria Geisa Dantas Guerra Ferraz de; OLIVEIRA, Jacson Tavares de. A problemática das enxurradas recorrentes na vertente sul da cidade de Vitória da Conquista – BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 16., [ano], [local]. **Anais** [...]. Disponível em: https://www.schenautomacao.com.br/cbge/envio/files/trabalho_104.pdf. Acesso em: 3 maio 2026.

SAKUNO, Natanael Rodolfo Ribeiro; KAWAKUBO, Fernando Shinji; SPALEVIC, Velibor; MINCATO, Ronaldo Luiz. Mapeamento de superfícies impermeáveis em áreas urbanas utilizando imagens índices geradas pelo sistema Landsat-5 Thematic Mapper. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17., 2017, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: UNICAMP, 2017. DOI: https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2232

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília, DF: IPEA: CEPAL, 2002. 72 p. (Texto para Discussão, n. 48). Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs_Ipea_Cepal/tdcepal_048.pdf. Acesso em: 20 abr. 2026.

ÁREA TEMÁTICA 36

SUSTENTABILIDADE DO AGRONEGÓCIO



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

DESEMPENHO DA CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (SCBA) NA PROTEÇÃO DE CONCRETOS CONTRA CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS: UMA REVISÃO

1 Pricila Paulina Disner, 2 Marta Siviero Guilherme Pires, 3 Raquel Luisa Pereira Carnin, 4 Gisleiva C. S. Ferreira

1 Universidade Estadual de Campinas, e-mail: p298263@dac.unicamp.br; 2 Universidade Estadual de Campinas, e-mail: marta@ft.unicamp.br; Universidade Estadual de Campinas, e-mail: raquelu@unicamp.br; 4 Universidade Estadual de Campinas, e-mail: gisleiva@unicamp.br

Palavras-chave: Materiais Cimentícios Suplementar; Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar (SCBA); Penetração de Cloretos.

Resumo

A penetração de íons de cloreto nas estruturas de concreto armado é uma das principais causas de corrosão em armaduras, e o uso de materiais pozolânicos tem se destacado por reduzir a permeabilidade do concreto e mitigar esse processo. Entre essas adições minerais, as cinzas de biomassa, como a cinza de bagaço da cana-de-açúcar (SCBA), apresentam resultados promissores, embora a ausência de normas específicas e a variabilidade nos processos de produção ainda representem desafios para sua aplicação consistente. Este estudo, buscou-se avaliar o desempenho de concretos com adição de SCBA, com foco na durabilidade frente a penetração de cloretos. Foram selecionados e analisados cinco estudos relevantes publicados nos últimos cinco anos, considerando a composição química, propriedades físicas, resistência mecânica e resistência a penetração de cloretos dos concretos produzidos. Os resultados indicam que a substituição parcial do cimento Portland por SCBA pode reduzir significativamente a permeabilidade do concreto devido ao refinamento da microestrutura, decorrente da formação adicional de gel C–S–H (Silicato de cálcio hidratado) e da diminuição da conectividade dos poros resultantes das reações pozolânicas secundárias, o que limita o transporte de íons de cloreto. A maioria dos estudos apresentou leve aumento na resistência a compressão com a adição adequada de SCBA. No entanto, foi identificado uma grande variação no processo de produção do SCBA e nas metodologias de ensaio utilizadas, dificultando a comparação direta dos dados. Apesar dessas limitações, a SCBA apresenta um grande potencial na prevenção de patologias associadas a penetração de cloretos, reforçando a necessidade de estudos adicionais com metodologias padronizadas, com o objetivo de consolidar o uso seguro e eficaz deste material.

Introdução

As estruturas de concreto são amplamente utilizadas na construção civil devido ao seu comportamento e durabilidade, conforme afirmam MEHTA e MONTEIRO (2014). Devido a sua ampla utilização, estudar sua microestrutura torna-se estritamente necessário para compreender melhor seu comportamento e suas propriedades.

Antigamente acreditava-se que o concreto era um material eterno, porém, os estudos mais recentes mostram o contrário, em certos momentos, e sob determinadas condições específicas, alguns componentes do concreto podem sofrer deteriorações, resultando na redução total ou parcial das funcionalidades da estrutura de acordo com BOLINA; TUTIKIAN; HELENE (2018).

A corrosão é a causa mais importante de falhas prematuras de estruturas de concreto armado. O concreto que envolve o aço, tem a importante função de proteção da armadura, onde através de sua alcalinidade forma uma película protetora de acordo com ORMELLESE et al. (2009). Porém quando a matriz cimentícias é contaminada por cloretos, inicia o processo de deterioração da estrutura. Essa deterioração não só compromete a segurança e a vida útil das edificações, mas impõe um ônus ambiental e econômico.

Tendo em vista estes pontos abordados, buscar materiais que prolonguem a vida útil do concreto e ao mesmo tempo sejam sustentáveis em sua concepção é uma prioridade na construção civil. DINESHKUMAR e BALAMURUGAN (2021), afirmam que, qualquer material que forneça gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) extra ao reagir com água pode ser considerado aglutinante.

Diversos pesquisadores têm estudados materiais sustentáveis para substituir o uso de forma parcial ou completa do Cimento Portland, seja a casca do arroz que já é comercializada ou casca de amendoim, fibra de coco e o bagaço da cana-de-açúcar que ainda estão em fase de estudo.

No século XX, MARTIRENA HERNÁNDEZ et al. (1998), iniciou os estudos dos resíduos industriais de açucareiras, para a utilização como pozolanas em aglomerantes, onde obteve resultados satisfatórios quanto ao desempenho da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (SCBA) na mistura, sendo comparado por ele com a cinza de casca de arroz (RHA), um material cuja a atividade pozolânica já havia sido exaustivamente avaliada e já é comercialmente utilizado na construção civil.

Desta forma, com a crescente necessidade de alternativas sustentáveis na construção civil e o reconhecimento do potencial pozolânico do SCBA, investigações mais profundas sobre a aplicação deste material tornam-se pertinentes.

Neste estudo, buscou-se avaliar o desempenho de concretos com a adição de SCBA, com foco na durabilidade frente a penetração de cloretos. Embora o uso de SCBA apresente um grande potencial e o número de estudos sobre o tema tenha crescido na última década, é possível observar uma dispersão de informações e uma variabilidade nas metodologias de ensaios, dificultando a compreensão e a consolidação do seu desempenho real a longo prazo contra a corrosão por cloretos. Diante disso,

esta revisão tem como objetivo reunir e analisar criticamente os dados mais recentes disponíveis, identificando as lacunas para futuras pesquisas.

Metodologia da Revisão Bibliográfica Sistemática

Buscando agrupar dados sobre o tema, foram realizadas buscas nos principais portais de periódicos, Scopus, Science Direct e CAPES. Na tabela 1, podemos analisar o script utilizado na pesquisa e os resultados inicias da busca. Foram analisados apenas artigos encontrados nos últimos 5 anos.

Plataforma	Palavra chave	Nº de resultados	filtros utilizados	Brasil	Outros países
Scopus	("concrete" AND with AND "sugarcane" AND "bagasse" AND "ash" AND "chlorides")	16	2021- 2025; Engenharia; Ciência dos materiais; Limitado ao artigo; Durabilidade; Cinza de bagaço de cana	3	13
Scienc direct	("concrete" AND with AND "sugarcane" AND "bagasse" AND "ash" AND "chlorides")	15	2021; 2025; Artigos de pesquisa; ciência dos materiais; engenharia; revistas assinadas	2	13
Portal CAPES	("concrete" AND with AND "sugarcane" AND "bagasse" AND "ash" AND "chlorides")	9	2021-2025; Engenharia	2	7

Tabela 1: Dados obtidos através da busca por artigos relacionados.
Fonte: Autores (2025)

Os artigos encontrados foram submetidos a uma análise inicial de relevância, onde foram removidos os artigos que não estavam diretamente relacionados ao tema da busca. Posteriormente cada artigo restante foi avaliado com base em seu objetivo específico e no tipo de material investigado, (concreto convencional, argamassa, concreto de alta resistência, concreto de ultra alta resistência). Nessa etapa, o foco foi restrito aos estudos que abordavam concretos convencionais e concreto de ultra alta resistência, dessa forma, foram selecionados os 5 artigos que continham dados passíveis de comparação, como podemos ver na tabela 2.

Autores e Ano	Título	Objetivo	Portal de pesquisa	Revista
TIPRAJ; ATHIRA; SHANMUGA PRIYA (2025)	Role of agro waste in geopolymer concrete: strength, durability and microstructural properties	Analise do desempenho de concretos com substituição de 5% e 10% do cimento com o objetivo de encontrar a proporção ideal, avaliando as propriedades mecânicas e a penetração de íons de cloreto.	Scopus	IOP Science
ANDRADE NETO; FRANÇA; AMORIM JÚNIOR; RIBEIRO (2021)	Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete	Analise da vida útil de concreto armado com adição de cinza de bagaço de cana avaliando a migração de cloretos e a carbonatação. Foram investigados os efeitos da adição de 5%, 10% e 15% de SCBA nas propriedades e durabilidade do concreto.	Scopus	Construction and Building Materials
KHAN; SAYYED; ALI (2021)	Examination of cement concrete containing micro silica and sugarcane bagasse ash subjected to sulphate and chloride attack	Estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com a substituição 10% do peso do cimento por cinzas de bagaço de cana de açúcar.	Science Direct	Materials Today: Proceedings
KATARE; MADURWAR (2021)	Process standardization of sugarcane bagasse ash to develop durable high-volume ash concrete	O objetivo da pesquisa é desenvolver o processo termomecânico e estudar seu efeito nas características pozolânicas da SBA. A pozolanicidade foi quantificada usando um índice de atividade de resistência, teste de condutividade elétrica e o teste de atividade de Chapelle. Foram avaliados concretos com substituição de 25%, 45% e 50% do cimento.	Science Direct	Journal of Building Engineering
MAGLAD et al. (2023)	Engineering properties of ultra-high strength concrete containing sugarcane bagasse and corn stalk ashes	Efeito da substituição parcial de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cinza de talos de milho nas propriedades do concreto de ultra alta resistência nas proporções de 10%, 20%, 30%. Analise da resistência a compressão e tração por divisão, resistência a flexão e módulo de elasticidade, também foi analisado a resistência a penetração de íons de cloreto e a permeabilidade a água.	Scopus	Journal of Materials Research and Technology

Tabela 2 – Artigos relacionados.
Fonte: Autores (2025)

Metodologia de análise dos dados

Os dados obtidos foram agrupados quanto a sua composição química, propriedades físicas e mecânicas e durabilidade, buscando avaliar o desempenho de compósitos cimentícios com adições de SCBA, com foco em sua eficácia na proteção contra a corrosão induzida por cloretos, onde a análise foi conduzida de acordo com a figura 1.

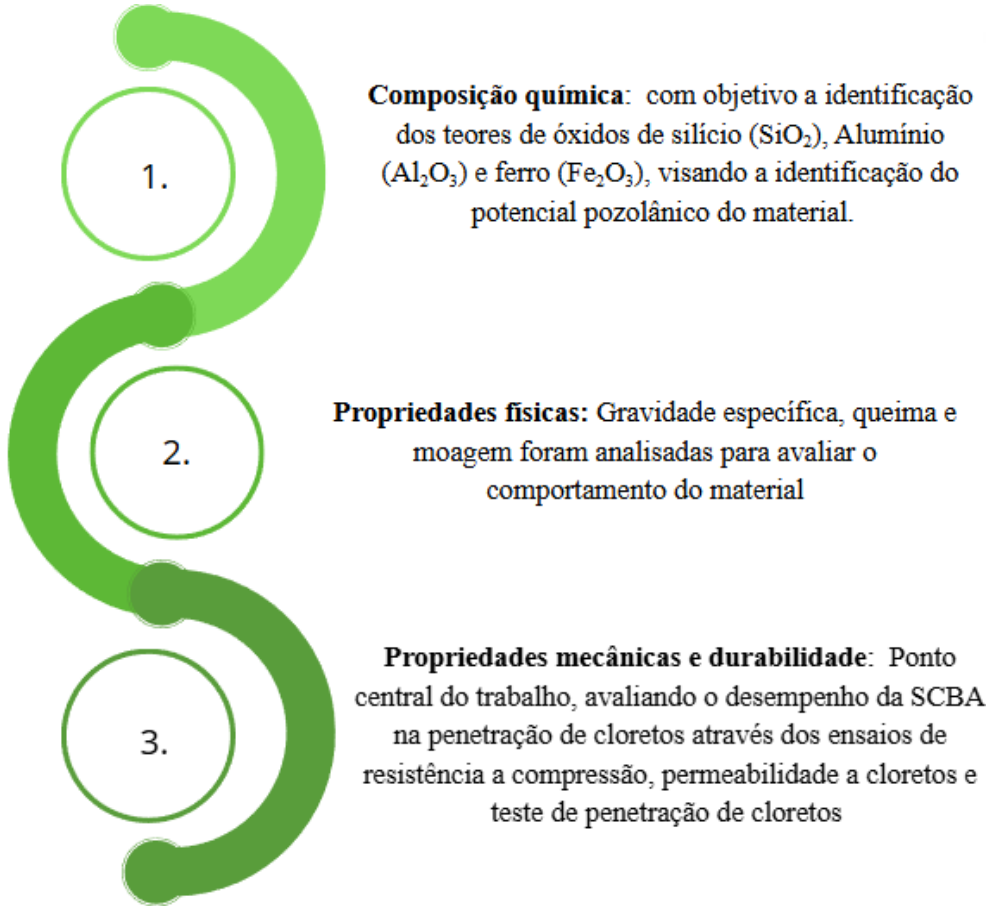


Figura 1: Fluxo da análise dos dados.
Fonte: Autores (2025)

Ensaios realizados pelos autores

Os autores realizaram diversos ensaios para analisar as propriedades e o comportamento das amostras como é apresentado na tabela 3. Neste estudo não foram avaliados todos os métodos abordados nos estudos anteriores, sendo utilizado apenas os ensaios mais relevantes para o tema em que estamos abordando.

Resultados e Discussões

A tabela 4 apresenta a composição química do SCBA utilizado nos diferentes estudos, através dela é possível observar que todos os materiais analisados possuem um alto teor de sílica (SiO2), variando entre 63,1% e 80,39%, indicando alto potencial pozolânico.

Os óxidos como Al2O3. Fe2O3 e CaO também estão presentes em concentrações variáveis entre os estudos analisados. Essa variabilidade na composição química do SCBA pode ser atribuída as diferenças nas condições de queima aditadas durante o processamento da biomassa, como a temperatura de calcinação, tempo de exposição ao calor e método de resfriamento, no entanto as características da própria matéria prima vegetal também podem influenciar. Esses óxidos desempenham papel essencial na formação dos produtos de hidratação, especialmente o gel de C-S-H, que é responsável pela resistência mecânica, compacidade e consequentemente pela durabilidade.

Além disso, elementos como K2O, Na2O e SO3 influenciam na alcalinidade e no comportamento das reações de deterioração, também foram encontrados do SBCA onde os autores KATARE e MADURWAR (2021) apresentaram valores relativamente elevados de álcalis, quando comparado com os demais artigos analisados.

Os estudos analisados apresentaram grande variação no processo de produção da SCBA, tanto no processo de queima quanto no processo de moagem, como apresentado na tabela 5. As temperaturas variaram de 600°C a 800°C, com tempos de exposição térmica entre 2 e 8 horas, como apresentado na tabela 5. Os autores KATARE e MADURWAR (2021) fizeram um tratamento térmico controlado a 800°C por 2 horas, seguido de moagem em moinho vibratório, produzindo uma cinza mais densa e com maior atividade pozolânica.

Por outro lado, alguns estudos não contêm informações detalhadas sobre o processo de produção da SCBA, o que representa uma limitação para a comparação direta entre os resultados. Essas diferenças no processo de produção explicam, em grande parte, a variabilidade encontrada nas propriedades físicas da SCBA.

AUTORES E ANO	ENSAIOS	MÉTODO UTILIZADO
TIPRAJ; ATHIRA; SHANMUGA PRIYA (2025)	Resistência a compressão	IS 516:1959
	Resistência a Flexão	IS 516:1959
	Absorção de água	ASTM C642-13
	Sorptividade	ASTM C642-13
	Penetração rápida de cloretos (RCPT)	Não informado (ASTM C1202 citada apenas como referência teórica)
	Carbonatação	RILEM TC 56-CPC-18
ANDRADE NETO; FRANÇA; AMORIM JÚNIOR; RIBEIRO (2021)	Resistência a Compressão	NBR 5739:2018
	Reação Álcali-Sílica (ASR)	NBR 15577:2018 (similar ao ASTM C1260)
	Difusão de cloretos	Método baseado em coeficiente de difusão (método por migração elétrica, sem norma específica citada)
	Carbonatação	ISO 1920-12: 2015
	Sorptividade	NBR 9779:2012
KHAN; SAYYED; ALI (2021)	Resistência a compressão	IS 516:1959
	Resistência a Flexão	IS 516:2002
	Perda de massa após ataque químico	Sem norma específica
KATARE; MADURWAR (2021)	Resistência a Compressão	IS 516:1959
	Resistência a Tração por compressão diametral	IS 5816:1999
	Resistência a flexão	IS 516:1959
	Absorção de água	ASTM C642-13
	RCPT	ASTM C1202-19
	Atividade pozolânica (Índice de atividade)	NBR 5752:1992
	Atividade pozolânica (Chapelle)	Chapelle
MAGLAD et al. (2023)	Slump Flow	ASTM C1437: 2007
	Resistência a compressão	BS EN 12390-3
	Resistência a Tração por compressão diametral	ASTM C496
	Resistência a Flexão	ASTM C78M
	Módulo de Elasticidade	ASTM C469M
	RCPT	ASTM C1202
	Sorptividade	ASTM C1585
	Permeabilidade à água	BS EN 12390-6

Tabela 3: Ensaios de caracterização e durabilidade realizados nos estudos analisados.
Fonte: Autores (2025)

Os estudos analisados apresentaram grande variação no processo de produção da SCBA, tanto no processo de queima quanto no processo de moagem, como apresentado na tabela 5. As temperaturas variaram de 600°C a 800°C, com tempos de exposição térmica entre 2 e 8 horas, como apresentado na tabela 5. Os autores KATARE e MADURWAR (2021) fizeram um tratamento térmico controlado a 800°C por 2 horas, seguido de moagem em moinho vibratório, produzindo uma cinza mais densa e com maior atividade pozolânica.

Por outro lado, alguns estudos não contêm informações detalhadas sobre o processo de produção da SCBA, o que representa uma limitação para a comparação direta entre os resultados. Essas diferenças no processo de produção explicam, em grande parte, a variabilidade encontrada nas propriedades físicas da SCBA.

Autores e Ano	CaO (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)
TIPRAJ; ATHIRA; SHANMUGA PRIYA (2025)	4,09	78,28	5,78	4,21	2,69	–	–
ANDRADE NETO et al. (2021)	2,14	78,40	8,40	3,62	–	3,42	0,13
KHAN; SAYYED; ALI (2021)	2,91	80,39	1,20	1,23	2,39	–	0,16
KATARE; MADURWAR (2021)	8,28	63,10	7,56	4,59	4,54	5,43	1,24
MAGLAD et al. (2023)	7,50	75,00	3,90	2,00	2,60	3,10	0,40

Tabela 4: Composição química.
Fonte: Autores (2025)

Os resultados da gravidade específica tiveram uma variação considerável entre os estudos analisados, com resultados variando entre 2,0 e 3,8 g/cm³, como podemos ver na tabela 6. Os autores KATARE e MADURWAR (2021) apresentaram o maior valor (3,8 g/cm³), indicando uma SCBA com maior densidade e maior proporção de fases cristalinas. Essa característica pode ser atribuída ao processamento térmico controlado que a cinza foi submetida, (800ºC por 2h) e ao processo de moagem aplicado, esses dois processos alteram a estrutura mineralógica do material.

Autor e Ano	Processo de Queima / Temperatura	Tempo de Queima	Moagem / Tratamento Adicional
TIPRAJ; ATHIRA; SHANMUGA PRIYA (2025)	Queima a 600°C por 3 horas	3 horas	Moída em moinho de bolas por 30 minutos
ANDRADE NETO; FRANÇA; AMORIM JÚNIOR; RIBEIRO (2021)	600°C por 8 horas	8 horas	-
KHAN; SAYYED; ALI (2021)	-	-	Apenas peneirada (sem moagem adicional descrita)
KATARE; MADURWAR (2021)	800°C por 2 horas	2 horas	Moída por 15 minutos em moinho vibratório (vibrating cup mill)
MAGLAD et al. (2023)	Queima entre 600–800°C (faixa de temperatura)	-	Moída em moinho de bolas até alcançar 20.835 cm²/g de área específica (superfície BET elevada)

Tabela 5: Processo de produção da SCBA.
Fonte: Autores (2025)

Nos demais estudos, os valores da gravidade específica tiveram uma variação menor, ficando na faixa de 2,0 a 2,2 g/cm³. Esse resultado é muito comum em cinzas com maior porosidade e predominância de sílica amorfa, comumente encontradas em processos de queima a temperaturas mais baixas e/ou com pouco controle sobre o tempo de exposição térmica.

Além disso, é importante destacar que os autores ANDRADE NETO; FRANÇA; AMORIM JÚNIOR; RIBEIRO (2021), não apresentaram dados sobre a gravidade específica, evidenciando uma lacuna de informação técnica. Esse parâmetro físico é fundamento pois influencia diretamente na dosagem dos materiais da mistura, na demanda de água de amassamento, no comportamento do concreto no estado fresco, bem como na sua trabalhabilidade e a densidade final.

Propriedades físicas dos materiais	TIPRAJ; ATHIRA; SHANMUGA PRIYA (2025)	ANDRADE NETO; FRANÇA; AMORIM JÚNIOR; RIBEIRO (2021)	KHAN; SAYYED; ALI (2021)	KATARE; MADURWAR (2021)	MAGLAD et al. (2023)
Gravidade específica	2,1	-	2,0	3,8	2,2

Tabela 6: Propriedades físicas
Fonte: Autores (2025)

A análise das propriedades mecânicas e da durabilidade dos concretos com adição de SCBA foi estruturada em três tópicos principais: resistência a compressão, absorção de água e sorptividade, por fim, a penetração de cloretos.

A Tabela 7 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos nos estudos analisados, sendo levado em conta as diferentes dosagens de SCBA. Cada uma dessas propriedades será discutida de forma individual com foco na relação entre os teores de SCBA e o desempenho observado.

	SCBA	Resistência a compressão (Mpa)	Redução de massa devido a cura ácida (%)	Absorção de água (%)	Sorptividade	Teste de penetração de Cloretos
TIPRAJ; ATHIRA; SHANMUGA PRIYA (2025) (28 dias)	5%	36,5	10	5,6	0,18 mm/min^0,5	1989 Coulombs
	10%	38,23	9	5,4	0,16 mm/min^0,5	2339 Coulombs
	15%	34,8	7	5,8	0,18 mm/min^0,5	2787 Coulombs
	Ref.	43,21	12	5,8	0,19 mm/min^0,5	1762 Coulombs
ANDRADE NETO; FRANÇA; AMORIM JÚNIOR; RIBEIRO (2021) (28 dias)	5%	31,76	-	7,96	0,07 mm/min^0,5	Ds: 1,0 x 10^{-8} cm²/s Dns: 4,13 x 10^{-8} cm²/s
	10%	34,16	-	7,45	0,05 mm/min^0,5	Ds: 0,79 x 10^{-8} cm²/s Dns: 3,60 x 10^{-8} cm²/s
	15%	36,99	-	5,89	0,04 mm/min^0,5	Ds: 0,57 x 10^{-8} cm²/s Dns: 2,77 x 10^{-8} cm²/s
	Ref.	30,62	-	9,27	0,21 mm/min^0,5	Ds: 1,18 x 10^{-8} cm²/s Dns: 4,42 x 10^{-8} cm²/s
KHAN; SAYYED; ALI (2021) (28 dias)	5%	51,10	7,66	-	-	-
	10%	53,80	7,2	-	-	-
	15%	48,40	7,9	-	-	-
	20%	43,36	10,65	-	-	-
	Ref.	50,16	7,5	-	-	-
KATARE; MADURWAR (2021) (28 dias)	25%	29,70	-	3,87	-	-
	30%	27,70	-	5,10	-	-
	35%	24,10	-	5,67	-	-
	Ref.	25,60	-	4,34	-	2494 Coulombs
MAGLAD et al. (2023) (28 dias)	10%	165,4	-	-	2,6 x 10^{-4} (0,5mm/s)	210 Coulombs
	20%	171,5	-	-	2,2 x 10^{-4} (0,5mm/s)	180 Coulombs
	30%	163,9	-	-	2,0 x 10^{-4} (0,5mm/s)	160 Coulombs
	Ref.	150,3	-	-	1,96 x 10^{-4} (0,5mm/s)	350 Coulombs

Tabela 7: Propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com diferentes teores de SCBA.
Fonte: Autores (2025)

Analisando os dados agrupados na tabela 7 é possível observar que a adição de SCBA pode manter ou melhorar a resistência dos concretos, dependendo da dosagem aplicada e das características físicas e químicas da cinza utilizada. Essa avaliação tem relevância, pois embora a resistência a compressão não seja um indicador direto da durabilidade frente a penetração de cloretos, ela é amplamente reconhecida como um parâmetro de controle de qualidade, influenciando diretamente na porosidade e na permeabilidade, consequentemente na capacidade de resistir o ingresso de agentes agressivos.

Dos cinco estudos analisados, apenas 2 apresentaram quedas na resistência a compressão em relação ao concreto de referência, e essa redução foi observada em apenas três dosagens (KHAN; SAYYED; ALI, 2021; KATARE; MADURWAR, 2021). De forma geral, os concretos com adições de SCBA apresentaram desempenho igual ou superior ao concreto convencional, demonstrando o potencial da SCBA como adição pozolânica eficaz, contribuindo não apenas para a resistência mecânica, mas também para melhorar a durabilidade do concreto.

Os resultados apresentam uma tendência de redução, tanto para absorção de água quanto para a sorptividade com o aumento do percentual de SCBA na mistura. A sorptividade corresponde à taxa de absorção capilar do concreto, sendo um parâmetro que quantifica a capacidade do material de transportar água através dos poros por ação capilar; portanto, valores

menores indicam uma matriz mais densa e com menor conectividade porosa (ASTM 1585, 2020). Essa redução pode ser atribuída ao refinamento da matriz e dos poros decorrente da reação pozolânica, que promovem a formação adicional de gel de C-S-H e o preenchimento dos vazios.

Entretanto, é importante destacar que nem todos os estudos continham as informações sobre a absorção de água e a sorptividade, o que representa uma limitação para a comparação direta dos resultados. Dos cinco artigos, apenas dois apresentaram informações quantitativas de forma clara. Essa ausência de dados evidencia novamente a lacuna importante na literatura, especialmente considerando a relação direta entre essas propriedades e a permeabilidade do concreto, que é um fator crítico na resistência a penetração de cloretos.

Foi observado uma grande variação nos métodos de avaliação adotado nos estudos analisados, o que impôs limitações para uma comparação direta entre os resultados. Dos cinco estudos analisados, quatro realizaram ensaios relacionados a penetração de cloretos, porém com metodologias distintas. O ensaio mais utilizado pelos autores foi o RCPT (ASTM C1202, 2019), que determina a resistência do concreto ao transporte de íons por meio da carga elétrica acumulada (em Coulombs), sendo que valores menores indicam menor condutividade iônica da solução de poros e maior resistência a penetração de cloretos.

Os autores TIPRAJ; ATHIRA; SHANMUGA PRIYA (2025) obtiveram os valores de carga elétrica significativamente mais elevados em comparação aos demais estudos analisados, resultado atribuído ao uso de concreto geopolimero, que por sua vez apresenta maior condutibilidade iônica da solução de poros, afetando diretamente os resultados de corrente elétrica no teste, sem necessariamente refletir a real permeabilidade da matriz sólida.

ANDRADE NETO; FRANÇA; AMORIM JÚNIOR; RIBEIRO (2021) adotaram um método diferente, baseado na determinação do coeficiente de difusão de cloretos (Ds), obtido por meio de ensaios de migração acelerada de íons. Nesse ensaio, a profundidade de penetração dos íons é quantificada após a aplicação de um campo elétrico, permitindo o cálculo de Ds, sendo valores menores indicativos de menor mobilidade iônica. Esse método segue princípios semelhantes aos estabelecidos na norma NT Build 492 (1999).

KHAN; SAYYED; ALI (2021) avaliaram a durabilidade frente a cloretos de forma indireta, avaliando os efeitos da exposição a soluções de ácido clorídrico, com a análise da perda de massa. Embora esse procedimento não seja padronizado por normas amplamente reconhecidas, a perda de massa é utilizada como indicador de degradação química, uma vez que concretos mais porosos tendem a apresentar maior deterioração ao longo do ataque ácido.

KATARE; MADURWAR (2021), também aplicaram o método RCPT, porém os resultados não foram claramente apresentados, dificultando a comparação.

Por fim, MAGLAD, et al. (2023), obtiveram o menor valor de carga elétrica, reduzindo de 350 coulumbs, no concreto de referência, para 160 coulombs nos concretos com 30% de SCBA, classificando-os como de muito baixa permeabilidade segundo a ASTM C1202 (2019). Esses resultados são coerentes com a redução da absorção de água e a sorptividade observadas em outros estudos, visto que o refinamento microestrutural promovido pela SCBA reduz a conectividade dos poros e dificulta tanto o fluxo capilar quanto o transporte de íons de cloreto.

Apesar da variabilidade metodológica, a comparação entre os diferentes ensaios (RCPT, coeficiente de difusão e perda de massa) demonstra tendências convergentes quanto ao efeito benéfico da SCBA na resistência ao ataque por cloretos. Considerando simultaneamente a resistência a mecânica e durabilidade, os resultados indicam que teores entre 10% e 30% mantiveram ou aumentaram a resistência a compressão, enquanto reduziram a permeabilidade, já no concreto com elevada resistência a compressão avaliado por MAGLAD, et al. (2023), teores de 20 a 30% proporcionaram as maiores reduções de carga elétrica. Assim, a faixa de 10-30% apresenta o melhor equilíbrio entre manutenção da resistência mecânica e incremento da resistência à penetração de cloretos quanto comparada ao concreto de referência.

Considerações finais

Através desta revisão bibliográfica, foi possível avaliar o desempenho de concretos com adições de SCBA, com foco na resistência a penetração de cloretos, um dos principais agentes causadores de patologias por corrosão de armaduras em concretos.

Os resultados mostram que a substituição parcial do cimento por SCBA pode sim, contribuir de forma positiva para a durabilidade do concreto, pois reduz a permeabilidade da matriz cimentícias. Esse efeito é atribuído ao refinamento da microestrutura decorrente da reação pozolânica, que promove a formação adicional de produtos de hidratação (como o gel de C-S-H) e o preenchimento dos poros, consequentemente, dificultando a passagem dos íons de cloreto.

Na grande maioria dos estudos analisados, a SCBA não comprometeu a resistência a compressão, desde que utilizada de forma adequada e com teores controlados. Entretanto, ficou evidente neste estudo a falta de padronização nos processos de produção da SCBA, com grande variação nas condições de queima, no tempo de exposição térmica e no processo de moagem, resultando em uma grande variação nas características físicas e químicas do material entre os estudos.

Além disso, foi encontrado uma grande diversidade nos métodos experimentais para a avaliação da durabilidade, com a utilização de diferentes ensaios, limitando a comparação direta dos resultados.

Desta forma, podemos concluir que a utilização de SCBA apresenta um potencial promissor na prevenção de patologias associadas a penetração de cloretos, desde que sejam adotados cuidados específicos no seu processamento e na dosagem em projeto. O avanço das pesquisas nessa área, pode contribuir significativamente para a produção de concretos duráveis e ambientalmente sustentáveis.

Agradecimentos
Os Autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa, por meio da concessão de bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia (PPGT) pelo suporte institucional.

Referências Bibliográficas

ASTM INTERNATIONAL**.** *ASTM C1202-19: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C1585-20: Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ANDRADE NETO, J.S.; FRANÇA, M.J.S.; AMORIM JÚNIOR, N.S.; RIBEIRO, D.V. Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. Construction and Building Materials, v.266, p.120959, 2021.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Patologia de estruturas. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

DINESHKUMAR, R.; BALAMURUGAN, P. Behavior of high-strength concrete with sugarcane bagasse ash as replacement for cement. Innovative Infrastructure Solutions, v.6, n.63, 2021.

KATARE, V.D.; MADURWAR, M.V. Process standardization of sugarcane bagasse ash to develop durable high-volume ash concrete. Journal of Building Engineering, v.39, p.102151, 2021.

KHAN, M.I.K.; SAYYED, M.A.A.; ALI, M.N.A. Examination of cement concrete containing micro silica and sugarcane bagasse ash subjected to sulphate and chloride attack. Materials Today: Proceedings, v. 39, p.558-566, 2021

MAGLAD, A.M.; AMIN, M.; ZEYAD, A.M.; TAYEH, B.A.; AGWA, I.S. Engineering properties of ultra-high strength concrete containing sugarcane bagasse and corn stalk ashes. Journal of Materials Research and Technology, v.23, p.3196-3218, 2023.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. Cement and Concrete Research, v.28, n.11, p.1525–1536, 1998.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NORDTEST. NT Build 492: Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials — Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments. Espoo, Finland: Nordtest, 1999.

ORMELLESE, M.; LAZZARI, L.; GOIDANICH, S.; FUMAGALLI, G.; BRENNA, A. A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete. Corrosion Science, v.51, p.2959-2968, 2009.

TIPRAJ, B.; ATHIRA, K.; SHANMUGA PRIYA, T. Role of agro waste in geopolymer concrete: strength, durability and microstructural properties. Engineering Research Express, v.7, 015107, 2025.

BALANÇO HÍDRICO HISTÓRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR COM USO DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS CLIMÁTICOS

1 Antônio Heriberto de Castro Teixeira, 2 Inajá Francisco de Sousa, 3 Janice Freitas Leivas, 4 Celina Maki Takemura

1 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: heribertoteixeira11@gmail.com; 2 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: inajafrancisco@gmail.com; 3 Embrapa Territorial, e-mail: janice.leivas@embrapa.br; 4 Embrapa Territorial, e-mail: celina.takemura@embrapa.br

Palavras-chave: Precipitação; Evapotranspiração; Indicadores de umidade

Resumo

Imagens MODIS foram usadas em conjunto com grades de dados climáticos para análises do balanço hídrico em larga escala na cultura da cana-de-açúcar, cobrindo a série histórica de 2007 a 2024. Considerou-se um ciclo anual generalizado de 12 meses dentro de um shape da cultura para cada ano dentro do SEALBA, região de crescimento agrícola limitadas pelos estados de Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia (BA) no Nordeste do Brasil. A evapotranspiração atual (ET) foi quantificada aplicando-se o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) e os dados de precipitação (P) usando-se o método de interpolação "krigagem ordinária". Os maiores valores para P ocorrem de abril a julho, enquanto os menores, são de setembro a janeiro. As maiores taxas da ET acontecem no final do período mais chuvoso, de junho a outubro, portanto sob condições de bons níveis de umidade na zona das raízes, resultantes das elevadas quantidade de chuvas prévias. Considerando as áreas de cultivo para cada ano, os valores anuais médios de P variaram de 3.172 milhões de m^3 em 2021 a 8.555 milhões de m^3 em 2009, enquanto para a ET esta faixa foi 3.375 milhões de m^3 em 2017 a 5.869 milhões de m^3 em 2007. Considerando-se as diferenças entre P e ET, as deficiências hídricas mais elevadas ocorreram em 2007 e as maiores disponibilidades de água foram em 2009. Entretanto, as análises evidenciaram uma defasagem entre o suprimento e água pelas chuvas e os bons níveis de umidade na zona das raízes das plantas, destacando a fração evaporativa, ou seja a razão da ET para a evapotranspiração de referência (ET_0), como a melhor opção de água disponível para as plantas, o qual mostrou benefícios de irrigação suplementar durante a transição das fases de grande crescimento para maturação, embora a quantidade de chuvas seja geralmente adequada para um bom desenvolvimento da cultura. Foi demonstrado que as análise de séries históricas dos componentes do balanço hídrico em larga escala na cana-de-açúcar têm potencial para subsídios às políticas públicas que visem o manejo sustentável da cultura nas condições dos cultivos atuais e de sua expansão racional em áreas com aptidão agrícola nos cenários de escassez hídricas.

Introdução

O Brasil se destaca no cenário global como produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), que vem se expandindo, tanto para produção de açúcar como de etanol, mas também na perspectiva de geração de energia renovável (GODOI NETO et al., 2020; GOLDEMBERG et al., 2014). A busca por manejos sustentáveis que melhorem a produção de biomassa é crucial para essas finalidades de exploração da cultura, principalmente diante dos cenários de mudanças climáticas e de uso da terra, que afetam a produtividade (MELLO e ESPERANCINI, 2012; OLIVEIRA et al., 2023; RUDORF et al., 2010).

Por um lado, a cana-de-açúcar satisfaz o requerimento de ter desenvolvimento rápido e elevada produção de biomassa na produção de bioenergia (WACLAWOVSKY et al., 2010). Por outro lado, seu cultivo aumenta a demanda hídrica regional, devido ao seu elevado requerimento de água (CHOOYOK et al., 2013; ZHANG et al., 2015), além dos impactos nos balanços de energia, de água e de carbono em larga escala (BERINGER et al., 2011; CERRI et al., 2011). Elevações das taxas evapotranspiratórias impactando o balanço hídrico em larga escala, devido à expansão do cultivo da cana de açúcar, têm sido reportado (ANDERSON-TEIXEIRA et al., 2012; LOARIE et al., 2011) e além dos efeito quantitativos essa expansão também pode também afetar a qualidade da água (GUNKEL et al, 2007).

Na região de crescimento agrícola chamada SEALBA, limitada pelos estados Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia (BA) no Nordeste do Brasil, a vegetação natural está sendo substituída por culturas agrícolas, sendo em grande parte pela cana-de-açúcar, afetando o balanço hídrico em larga escala (PROCÓPIO et al., 2019). As dificuldades de medições e análises dos componentes desse balanço com apenas medições pontuais, destacam o uso conjunto de parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e dados climáticos espacializados, tendo sido essas ferramentas aplicadas com sucesso em diferentes agroecossistemas e condições ambientais brasileiras (TEIXEIRA et al., 2024).

No estudo corrente, o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi aplicado para estimativa da evapotranspiração atual (ET) enquanto para a precipitação (P) dados espacializados de pluviômetros foram interpolados. O SAFER foi desenvolvido e validado com dados avançados de balanços de energia e de água sob diferentes condições termais e hídricas no Nordeste do Brasil (TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA et al., 2024). Dispondo-se de shapes do MapBiomas delimitando a cultura no SEALBA no período de 2007 a 2024 e informações de municípios produtores provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), imagens MODIS de reflectância e dados climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram usadas nas análises históricas dos componentes do balanço hídrico, visando-se suporte para um manejo sustentável dos cultivos existentes e geração de critérios racionais para expansão da cultura, importante nos atuais cenários de aumento da competição por água com outros setores, como consequências das mudanças climáticas e de uso da terra.

Material e Métodos

Área de estudo, estações climáticas e área cultivada

A Figura 01 apresenta a localização da região SEALBA no Nordeste do Brasil (a), com destaques para os municípios produtores de cana-de-açúcar e estacoes climáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (b) e a extensão dos canaviais no ano de 2024 dentro dos municípios obtida cruzando-se o shape do MapBiomas e informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (c)

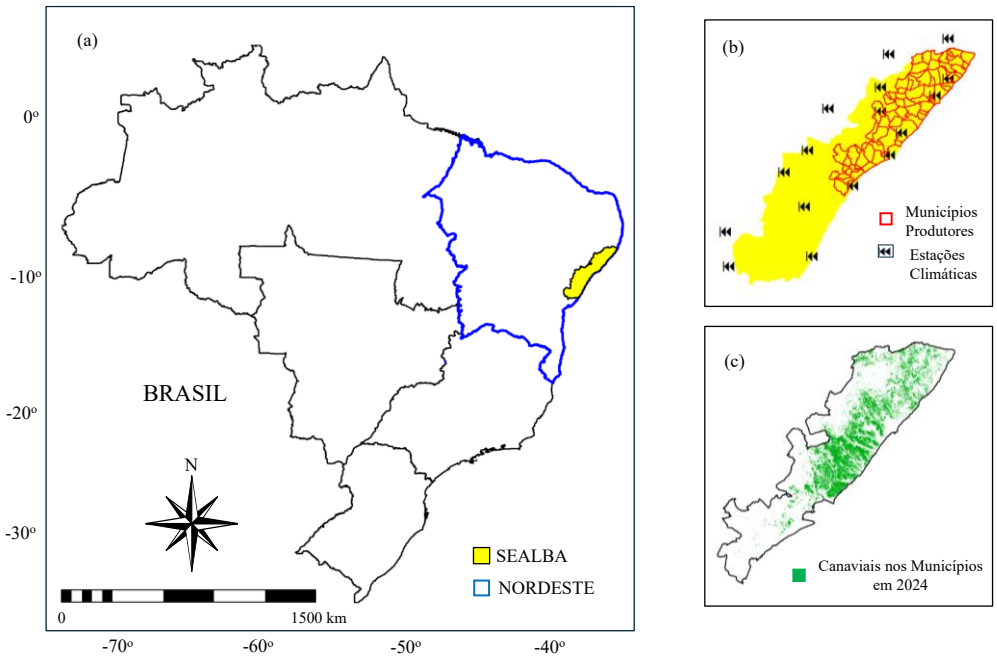


Figura 01: Localização da região do SEALBA no Nordeste de Brasil (a); destaque para os municípios produtores de cana-de-açúcar juntamente com as estações climáticas utilizadas; e a área cultivada em 2024 dentro desses municípios.

Para um ciclo de 12 meses generalizado, de acordo com Silva et al. (2011), as fases da cultura no Nordeste do Brasil podem ser divididas em quatro: Fase 1: Brotação; Fase 2 – Perfilhamento, com duração de até 120 dias, começando com 40 dias após o início do ciclo produtivo; Fase 3 – Crescimento Máximo, começando após 120 dias do início do ciclo produtivo e indo até 270 dias após; e Fase 4 – Maturação, indo dos 270 dias após o início do ciclo produtivo até 360 dias após.

A Fase 1 é influenciada pela umidade, temperatura e aeração do solo; na Fase 2 os fatores mais importantes são a variedade, radiação solar, temperatura do ar, umidade do solo e adubação; a Fase 3 exige elevados valores de radiação solar e umidade do solo para favorecimento do alongamento dos colmos; e na Fase 4 elevados valores de radiação solar, mas baixos níveis de umidade do solo são condições favoráveis, sendo esta fase caracterizada por baixa atividade vegetativa (TEJERA et al., 2007).

Modelagem dos componentes do balanço hídrico

Os dados climáticos do INMET foram interpolados pelo método krigagem ordinária envolvendo shapes de uso da terra do MapBiomas cruzando-os com dados de produção do IBGE, na modelagem dos componentes do balanço hídrico para o período de 2007 a 2024. Para a evapotranspiração de referência (ET_0) foram usados os valores diários da radiação solar global (R_G); da temperatura do ar (T_a), da umidade relativa média do ar (UR); e da velocidade do vento (u) (ALLEN et al., 1998). Em conjunto com os valores de reflectância das bandas 1 e 2 do produto MOD13Q1, estes dados entraram também na modelagem da ET; e com dados de P interpolados obtiveram-se os componentes do balanço hídrico em larga escala na resolução espacial de 250 m e resolução temporal de 16 dias das imagens MODIS, extrapolando-se também para a escala anual (TEIXEIRA et al., 2024).

As equações da modelagem estão descritas em detalhes em Teixeira (2010) e Teixeira et al. (2024), sendo aqui portanto resumidas aqui apenas as equações principais.

Com a utilização do SAFER, os valores diários da fração evaporativa ($ET_f = ET/ET_0$) foram modelados:

$$ET_f = exp\left[a_{sf} + b_{sf}\left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI}\right)\right] \quad (1)$$

onde, a_{sf} e b_{sf} são os coeficientes de regressão, T_0 é a temperatura da superfície, α_0 é o albedo da superfície e NDVI é o Índice da Diferença de Vegetação Normalizado.

Os valores diários de ET foram obtidos por:

$$ET = ET_f ET_0 \quad (2)$$

Para quantificação do grau de umidade nas vizinhanças da cultura, foram usados os indicadores diferença (BH_d) e razão (BH_r) do balanço hídrico (BH):

$$BH_d = P - ET \quad (3)$$

$$BH_r = \frac{P}{ET} \quad (4)$$

Resultados e Discussão

Condições Térmicas

A Figura 02 apresenta os valores, na escala de 16 dias e anuais das imagens MODIS, das médias diárias para a radiação solar global - R_G e temperatura do ar - T_a (a) e evapotranspiração de referência (ET_0) (b), nas áreas com a cultura da cana-de-açúcar dentro dos municípios produtores do SEALBA, para o período de 2007 a 2024, em termos de dia juliano (DJ).

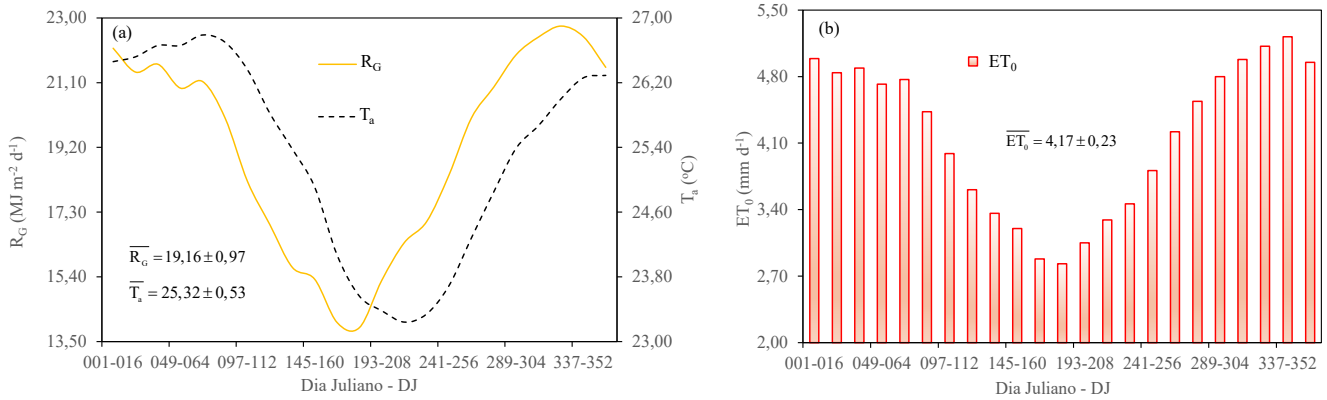


Figura 02: Valores médios diários, na escala temporal de 16 dias das imagens MODIS e anuais, para o período de 2007 a 2024, da radiação solar global - R_G e da temperatura do ar - T_a (a) e da evapotranspiração de referência - ET_0 (b), nos municípios produtores de cana-de-açúcar dentro do SEALBA, em termos de dia juliano (DJ).

Considerando-se que a dinâmica das condições térmicas apresentadas na Figura 02 representam valores médios interpolados espacialmente de 18 anos de dados (2007 a 2024), o período mais quente e com mais energia solar nas vizinhanças dos canaviais ocorre de setembro a abril (DJ 257 a 096), quando os respectivos valores médios para R_G e T_a ficam acima de 20 MJ m^{-2} d^{-1} e de 24 °C, período de culminação do sol na região de estudo e fora da estação chuvosa. Os limites inferiores de ambos os parâmetros climáticos acontecem no meio do ano, chegando a taxas de R_G em torno de 14,0 MJ m^{-2} d^{-1} de junho a julho (DJ 161-192), enquanto para T_a os valores inferiores, em torno de 23,0 °C, são de julho a agosto, períodos envolvendo o solstício de inverno no hemisfério sul. A defasagem de entre as magnitudes dos valores de R_G e T_a, em torno de um mês, mostra a diferença no tempo para aquecimento e resfriamento da superfície cultivada com a intensidade dos níveis de radiação solar incidente.

Com relação à demanda atmosférica, os valores da ET_0 seguiram as tendências térmicas e energéticas, porém como o elemento climático que mais atua na magnitude dessa demanda é a R_G, as maiores e menores taxas de ET_0, acima de 4,0 mm d^{-1}e abaixo de 3,0 mm d^{-1} são nos mesmos períodos daqueles para R_G, respectivamente de setembro a março e de junho a julho.

As mais elevadas condições térmicas afetando a demanda atmosférica ocorrem no início e no final do ano, envolvendo as Fases 1 e 4 da cultura da cana-de-açúcar, entretanto, pelo fato da região estar próxima ao equador (Figura 01), as amplitudes nos valores da ET_0 não são tão grandes, reduzindo seus efeitos no balanço hídrico com relação a fase da cultura mesmo com boas condições pluviométricas.

Condições hídricas

A Figura 03 mostra a dinâmica da distribuição espacial dos valores da precipitação (P), médias dos pixels e desvios padrões, na escala anual, para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar nos municípios produtores da região do SEALBA, para o período de 2007 a 2024.

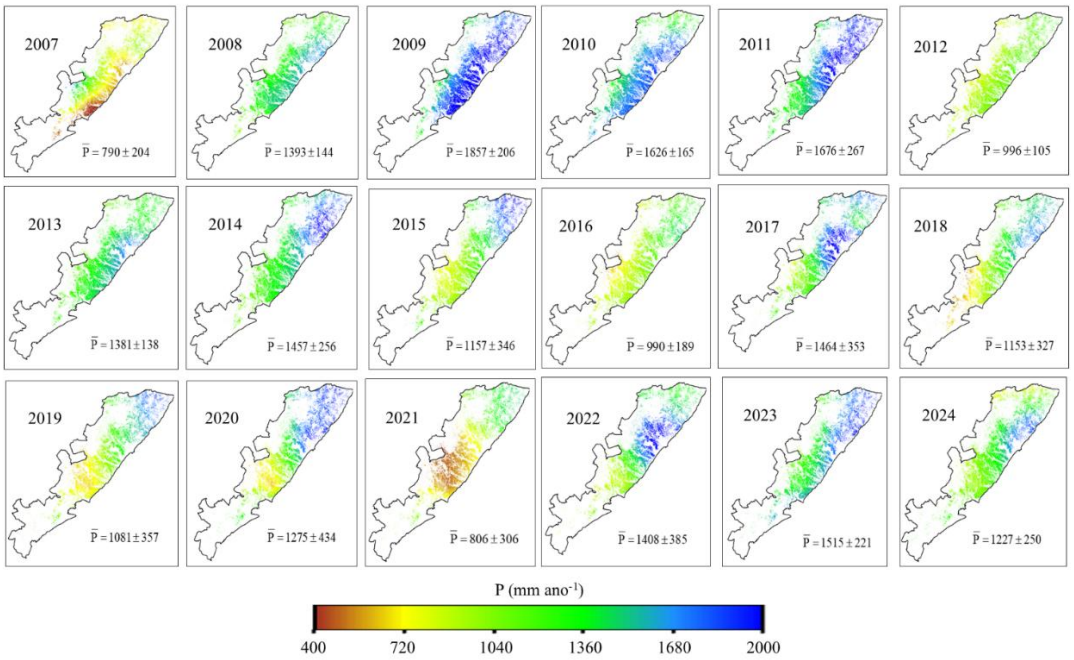


Figura 03: Dinâmica da distribuição espacial dos valores da precipitação (P), médias dos pixels e desvios padrões, na escala anual, para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar nos municípios produtores da região do SEALBA, para o período de 2007 a 2024.

Variações espaciais e temporais são perceptíveis de P dentro das áreas com cana-de-açúcar ao longo dos anos de 2007 a 2024. O contraste temporal mais forte é observado comparando-se os valores para 2007, com média abaixo de 800 mm ano^{-1}, e para 2009 com média acima de 1.850 mm ano^{-1}. Considerando as faixas compreendidas entre os valores médios e os desvios padrões, as taxas de P estiveram entre 500 mm ano^{-1} no ano de 2021 e 2.063 mm ano^{-1} no ano de 2009. Com relação às variações espaciais, as maiores ocorreram no ano de 2021, quando o desvio padrão (DP) representou 38% do valor médio enquanto as menores, com este percentual de 10% ocorreram em 2008, 2010 e 2013

A Figura 04 apresenta a dinâmica da distribuição espacial dos valores da evapotranspiração atual (ET), médias dos pixels e desvios padrões, na escala anual, para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar nos municípios produtores da região do SEALBA, para o período de 2007 a 2024.

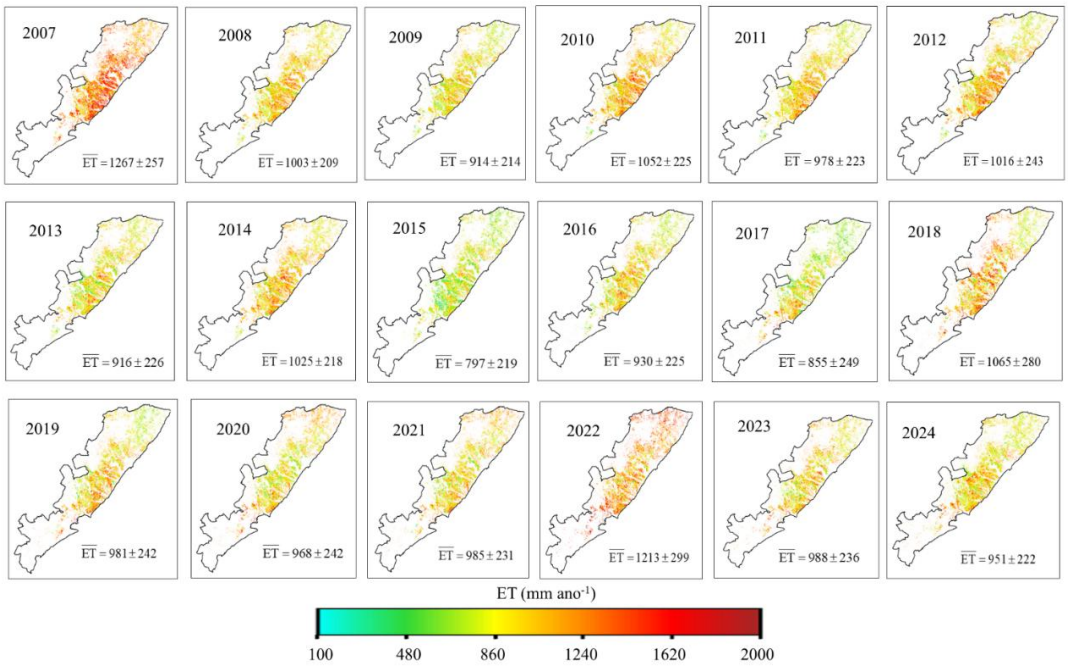


Figura 04: Dinâmica da distribuição espacial dos valores da evapotranspiração atual (ET), médias dos pixels e desvios padrões, na escala anual, para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar nos municípios produtores da região do SEALBA, para o período de 2007 a 2024.

Como para P, também ocorreram grandes variações espaciais e temporais nas taxas da ET ao longo dos anos de 2007 a 2024 nas áreas ocupadas com a cultura da cana-de-açúcar dentro dos municípios produtores do SEALBA. Entretanto, apesar de existir uma relação da ET com P, os valores maiores e menores desses parâmetros entre os anos não coincidem. Para ET, as taxas máximas ocorreram em 2007, acima de 1.260 mm ano^{-1}, mesmo com o menor valor de P nesse ano, enquanto as taxas mais baixas, com média inferiores de 900 mm ano^{-1}, foram em 2017. Estas diferenças entre ocorrências de máximos e mínimos nos valores de P e ET se devem ao fato que o solo permanece ainda úmido após as chuvas mais fortes, mesmo sob ainda significativos níveis de R_G e T_a (TEIXEIRA et al., 2024).

Com relação às variações espaciais da ET, considerando-se os valores médios dos pixels e de DP, estas foram menores que no caso de P, com DP representando 20% do valor médio dos pixels em 2007 a 29% em 2017. Considerando as faixas de valores médios e DP na mistura de plantas de cana com diferentes idades e fases no shape de uso da terra analisado, a ET anual ficou entre 606 mm ano^{-1} em 2017 a 1.524 mm ano^{-1} em 2007. Para o ciclo generalizado da cultura a ET representou em média de 29% a 160% de P, nos anos 2009 e 2007, respectivamente.

Estudos prévios com medições de campo na cultura da cana-de-açúcar irrigada na Flórida (USA), conduzidos por Omary e Izuno (1995) apresentaram um valor total para ET de 1.060 mm para o ciclo produtivo, dentro das faixas para um ciclo produtivo generalizado de 12 meses representadas na Figura 04 para a região do SEALBA, entretanto, Oliveira et al. (2018) encontraram totais inferiores de 690 e 829 com medições por sensoriamento remoto para dois ciclos produtivos com a cultura em condições de sequeiro na região Sudeste do Brasil.

Balanço hídrico

Para as análises da dinâmica dos componentes do balanço hídrico, as taxas P e ET no período de 2007 a 2024, na escala dos 16 dias (16d) das imagens MODIS, foram confrontadas. A Figura 05 mostra as variações dos valores médios dos pixels com DP nessa escala temporal ao longo do ano, nas áreas com cana-de-açúcar nos municípios produtores d SEALBA, em termos de dias julianos (DJ).

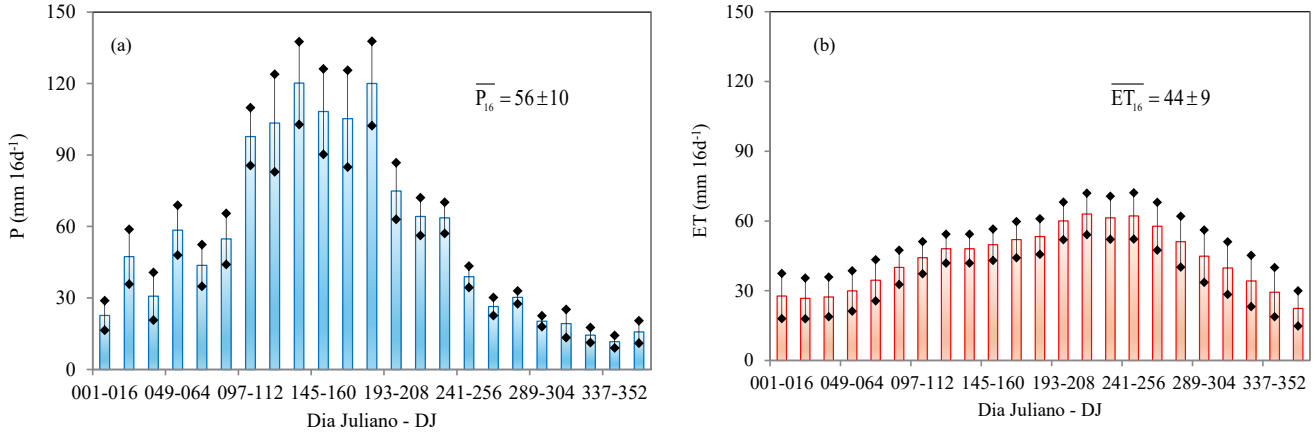


Figura 05: Médias e desvios padrões (DP) para a precipitação - P (a) e evapotranspiração atual – ET (b) na escala temporal de 16 dias (16d) das imagens MODIS, para as áreas com cana-de-açúcar nos municípios produtores da região do SEALBA, em termos de dias julianos (DJ)

Com relação a entrada de água no balanço hídrico histórico, os maiores valores para P (Figura 05a), acima de 100 mm 16d^{-1}, ocorrem de abril a julho (DJ 097 a 192). Os menores, abaixo de 30 mm 16d^{-1} são de setembro a janeiro (DJ 257 a 016). Considerando a saída de água da cultura da cana-de-açúcar, os maiores valores da ET (Figura 05b), acima de 50 mm 16d^{-1}, acontecem no final do período mais chuvoso, de junho a outubro (DJ 161 a 288), portanto sob condições de bons níveis de umidade na zona das raízes, resultantes das elevadas quantidade de chuvas prévias.

Cruzando-se os valores de P com ET para a contabilidade de BH_r e BH_d (Eq. 3 e 4), tem-se que os períodos com maior deficiência hídrica climática são de agosto para novembro (DJ 241 a 320), quando o valor de BH_d fica abaixo de -20 mm 16d^{-1}. Entretanto considerando o indicador BH_r, estes só caem além de 0,50, ou seja, P atendendo menos da metade da ET, no período de outubro ao início de dezembro (DJ 289 a 336), mostrando que mesmo com a redução das chuvas após o final de agosto, a zona das raízes das plantas de cana ainda tem bom nível de umidade disponível até o final de setembro.

Na região do SEALBA, considerando o ciclo generalizado da cana-de-açúcar de 12 meses, como os produtores em geral fazem o plantio no início do período chuvoso, percebe-se pelos valores da ET na Figura 05b, indicativos dos inícios dos ciclos produtivos no período de fevereiro a março (DJ 049-064). Com essa consideração, percebe-se que eles estrategicamente ajustam os ciclos produtivos com as exigências hídricas da cultura. Os valores de BH_d variam de – 31 mm 16d^{-1} em setembro (DJ 257-272) a 72 mm 16d^{-1} em maio (DJ 129-144), enquanto os limites para BH_r são de 0,39 em dezembro (DJ 353-365) a 2,50 em maio (DJ 129-144). Este último mês caracteriza uma quantidade de chuvas de quase o triplo da água consumida pelas plantas, o que indica possibilidade de efeitos negativos do excesso de água nas plantas e oportunidade para técnicas de armazenamento nas posteriores de escassez, como por exemplo o emprego de cobertura morta (TEIXEIRA et al., 2024).

Com o plantio de fevereiro a março, o período de maior disponibilidade hídrica coincide com aquele entre as Fases 2 (perfilhamento) e 3 (crescimento rápido) enquanto o período com maior escassez de água no balanço hídrico ocorre na Fase 4 (maturação). Durante as fases de crescimento ativo, o déficit hídrico reduz a área foliar, afetando o número de perfilhos e folhas por colmo (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005), entretanto, na Fase 4, chuvas não são desejáveis por proporcionarem produções de baixa qualidade (TEJERA et al., 2007).

Portanto a quantidade de chuvas nas áreas produtoras do SEALBA em geral atende bem os requerimentos hídricos da cana-de-açúcar para uma boa produção, sendo, entretanto, recomendável irrigação suplementar em alguns períodos com deficiência hídrica, havendo disponibilidade de água para essa prática.

Os valores diários da ET são entre 1,1 mm d^{-1} no período climaticamente mais seco a 4,5 mm d^{-1} no período mais chuvoso. Estas taxas são um pouco superiores que as reportadas por Eksteen et al. (2014), que encontraram médias de 1,6 a 2,9 mm d^{-1}, envolvendo diferentes variedades e condições de umidade na zona das raízes. Entretanto, sob condições de irrigação na Flórida (USA), estudos prévios de Omary e Izuno (1995) reportaram taxas mínimas de 0,7 a 1,5 mm d^{-1} e máximas de 4,5 a 4,6 mm d^{-1}, com um total para o ciclo produtivo de 1.060 mm. Nassif et al. (2014), usando sistema da razão de Bowen em cultura da cana irrigada na região sudeste do Brasil encontraram picos da ET variando de 3,7 mm d^{-1} a 4,4 mm d^{-1}. Mas também na região Sudeste do Brasil, OLIVEIRA et al. (2018) com medições por sensoriamento remoto encontraram faixas entre 0,3 mm d^{-1} a 5,8 mm d^{-1} nos períodos secos e chuvosos, respectivamente, sob condições de sequeiro.

A similaridade dos valores encontrados no estudo corrente com boa parte da literatura fornece confiança na aplicação do algoritmo SAFER com imagens MODIS e dados climáticos para estimativa do consumo hídrico da cultura da cana-de-açúcar em escala regional.

Considerando-se a variação das áreas cultivadas com cana-de-açúcar ao longo dos anos de 2007 a 2024 nos municípios produtores dentro do SEALBA, a Tabela 01 apresenta um histórico dos componentes do balanço hídrico em metros cúbicos de água, com a extensão das áreas de acordo com os shapes do MapBiomas.

Tabela 1. Histórico dos componentes do balanço hídrico na cultura da cana-de-açúcar, considerando as áreas totais nos municípios produtores dos canaviais na região do SEALBA durante os anos de 2007 a 2024, de acordo com os shapes do MapBiomas.

Ano	A_{cana} (ha)	P (m^3 10^6)	ET (m^3 10^6)	ET_0 (m^3 10^6)	BH_d (m^3 10^6)	BH_r (-)	ET_f (-)
2007	463.125	3.660	5.869	7.336	-2.208	0,62	0,80
2008	462.925	6.451	4.645	7.099	1.806	1,39	0,65
2009	460.650	8.555	4.208	7.045	4.347	2,03	0,60
2010	461.463	7.502	4.853	6.906	2.648	1,55	0,70
2011	464.225	7.782	4.540	6.829	3.242	1,71	0,66
2012	464.075	4.623	4.717	7.151	-94	0,98	0,66
2013	451.406	6.236	4.135	6.887	2.101	1,51	0,60
2014	447.713	6.524	4.591	6.586	1.933	1,42	0,70
2015	440.225	5.093	3.510	7.134	1.583	1,45	0,49
2016	428.381	4.240	3.985	6.758	255	1,06	0,59
2017	394.650	5.777	3.375	5.992	2.402	1,71	0,56
2018	392.119	4.522	4.177	5.911	345	1,08	0,71
2019	392.950	4.249	3.853	6.024	396	1,10	0,64
2020	392.775	5.008	3.802	5.980	1.206	1,32	0,64
2021	393.731	3.172	3.877	5.978	-705	0,82	0,65
2022	369.681	5.204	4.482	5.694	722	1,16	0,79
2023	385.938	5.847	3.811	5.536	2.036	1,53	0,69
2024	493.375	6.055	4.691	7.313	1.364	1,29	0,64
Média	431.078	5.583	4.284	6.564	1.299	1,32	0,65

A_{cana} – Área cultivada com a cana de açúcar no ano; P – Precipitação; ET – Evapotranspiração atual; BH_d – Indicador diferença no balanço hídrico; BH_r – Indicador razão no balanço hídrico; ET_f – Fração evaporativa

Através do histórico da Tabela 1, percebem-se flutuações no tamanho áreas cultivadas com cana-de açúcar ao longo dos anos no SEALBA. De 2007 a 2012 os valores são estáveis, em torno de 462.744 ha, caindo a seguir até 2017, com um percentual de queda de 15%, daí estabilizando novamente até 2021, com valores em torno de 393.245 ha, tornando novamente a reduzir em 2022 em um percentual de 7%. A partir desse ano apresenta crescimento até 2024 quando chega a maior área cultivada acima de 493.000 ha para todo o período analisado, 7% da extensão da cana cultivada em 2007. Estas mudanças de área cultivada, somadas as diferenças entre as quantidades de precipitações e de demandas atmosféricas, interferem no consumo hídrico total da cana-de-açúcar em escala regional. Com essa consideração de áreas cultivadas pôde-se passar as análises dos componentes do balanço hídrico de mm de água para metros cúbicos de água inserindo a expansão do cultivo ao longo do tempo.

Com relação às precipitações, a maior entrada no balanço hídrico foi em 2009, com P maior que 8.500 milhões de m^3 e área cultivada acima de 460.000 ha, correspondendo aos maiores valores de BH_d e BH_r, acima de 4300 milhões de m^3 e de 2,00, respectivamente, mas com ET_f de 0,60, sendo que o maior valor deste último indicador foi de 0,80 em 2007. Os valores inferiores

de P foram em 2021, com área cultivada abaixo de 400.000 ha, apresentando um total médio inferior a 3.200 milhões de m^3, com valores de BH_d abaixo de -700 milhões de m^3, mas BH_r acima de 0,80 e ET_f ainda maior que 0,65, indicando que mesmo com essas condições de baixas precipitações, a umidade na zona das raízes das plantas ainda apresentavam bons níveis para o desenvolvimento das plantas.

Considerando a ET, a maior saída de água no balanço hídrico foi acima de 5.800 milhões de m^3 em 2007, com área cultivada superior a 463.000 ha, mas com a maior déficit hídrico, com BH_d abaixo de -2.200 milhões de m^3, embora com BH_r maior que 0,60. Nesse caso a maior taxa de ET, mesmo com grande déficit hídrico, se justifica pelo maior valor da ET_f de 0,80, indicando que o solo nesse ano ainda estava com umidade suficiente para provocar grandes fluxos hídricos devido às chuvas prévias do ano anterior. O menor consumo de água pela cultura da cana-de-açúcar, abaixo de 3.400 milhões de m^3 foi em 2017, com área cultivada inferior a 395.000 ha, mesmo com elevados valores de BH_d acima de 2.400 milhões de m^3 e BH_r maior que 1,70, mas com ET_f abaixo de 0,60 evidenciando níveis de umidade na zona das raízes mais baixos, além de uma área cultivada menor com relação aos anos prévios.

Pelos valores dos componentes do balanço hídrico, percebe-se que o atraso entre o suprimento e água pelas chuvas e os bons níveis de umidade na zona das raízes das plantas fazem com que os maiores consumos hídricos também apresentem essa defasagem com relação às chuvas. Os valores de ET_f caracterizam o status de umidade na zona das raízes das plantas (LU et al., 2011) e sob ótimas condições de umidade, este indicador é considerado como o coeficiente de cultura (K_c), podendo ser usado no manejo de irrigação (INMAN-BAMBER, N.G. e MCGLINCHEY, 2003; NASSIF et al. 2014; ZHANG et al., 2015). |

Comentários finais

O uso conjunto de parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e dados climáticos, aplicando-se o algoritmo SAFER, permitiram análises dos componentes do balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar em uma série histórica de dados, nas áreas dos municípios produtores da região do SEALBA, Nordeste do Brasil. Apesar das chuvas em geral atenderem as demandas hídricas da cultura, mesmo com defasagem entre as precipitações e as taxas de evapotranspiração, devido às boas condições de umidade na zona das raízes após o período chuvoso, foram evidenciados benefícios de irrigação suplementar para certos períodos do ciclo produtivo, principalmente na transição das fases generalizadas da cultura de crescimento máximo para a maturação, nas condições ambientais da região de estudo. A modelagem em larga escala pode ser implementada para o manejo dos canaviais existentes e para o monitoramento dos efeitos da expansão da cultura da cana-de-açúcar sob as condições ambientais nos cenários atuais de mudanças climáticas.

Agradecimentos

Ao CNPq pelo suporte ao projeto de aplicação de geotecnologias na região do SEALBA (Processo 311532/2021-7) e à FAPITEC pela disponibilidade de recursos através do projeto no edital FAPITEC/SE/FUNTEC N° 01/2024, Processo nº 019203.01252/2024-0.

Referências Bibliográficas

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Rome, Italy, 300 pp., 1998

ANDERSON-TEIXEIRA, K.J.; SNYDER, P.K.; TWINE., T.E.; CUADRA, S.V.; COSTA, M.H.; DeLucia, E.H. Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the Americas. **Nature Climate Change**, v. 2, p. 177–181, 2012.

BERINGER, T.; LUCHT, W.; SCHAPHOFF, S. Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. **GCB Bioenergy**, v. 3, p. 299–312, 2011.

CERRI, C.C.; GALDOS, M.V.; MAIA, S.M.F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; POWLSON, D.; CERRI, C.E.P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 23–28, 2011.

CHOOYOK, P.; PUMIJUMNOG, N.; USSAWARUJIKULCHAI, A.T. The water footprint assessment of ethanol production from molasses in Kanchanaburi and Supanburi province of Thailand. **Procedia APCBEE** v. 5, 283–287, 2013.

EKSTEEN, A.; SINGELS, A.; NGXALIWE, S. Water relations of two contrasting sugarcane genotypes. **Field Crops Research**, v. 168, p. 86–100, 2014.

GODOI NETO, A. H.; SILVA, E.F. de F., MORAIS, J.E.F de; ANDRADE, L.G.L. de, CUTRIM, W. de O.; LACERDA, C. F. de. Water potential, biochemical indicators and yield of sugarcane irrigated with brackish water and leaching. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 312-318, 2020.

GOLDEMBERG, J.; MELLO, F.; CERRI, C.P.; DAVIES, C.; CERRI, C.C. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, v. 69, p. 14–18, 2014.

GUNKEL, G.; KOSMOL, J.; SOBRAL, M.; ROHN, H.; MONTENEGRO, S.; AURELIANO, J. Sugar cane industry as a source of water pollution-case study on the situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 180, p. 261-269, 2007.

INMAN-BAMBER, N.G., MCGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v. 83, p. 125–38, 2003.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, p. 185–202, 2005.

LOARIE, S.; LOBELL, D.; ASNER, G.; MU, Q.; FIELD, C. Direct impacts on local climate of sugarcane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 2, p. 105–109, 2011.

MELLO, C.O.; ESPERANCINI M.S.T. Análise econômica da eficiência da produção de cana-de-açúcar de fornecedores do Estado do Paraná. **Revista Energia na Agricultura**, v. 27, p. 48–60, 2012.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; COSTA, L.G. Evapotranspiration and transpiration coupling to the atmosphere of sugarcane in Southern Brazil: Scaling up from leaf to field. **Sugar Tech**, v. 16, p. 250–254, 2014.

OLIVEIRA, B.; MORAES E.; BENAVIDES, M.C.; MATAVELI, G. Improved Albedo estimates implemented in the METRIC model for modeling energy balance fluxes and evapotranspiration over agricultural and natural areas in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing**, v. 10: 1181, 2018.

OLIVEIRA, M. R.; PASQUALETTO, A.; VIEIRA, J. de C.; de CASTRO, S.D. Os Impactos ambientais do setor sucroenergético e uso de indicadores de sustentabilidade. **RDE-Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 2, p. 315 – 341, 2023.

OMARY, M.; IZUNO, F.T. Evaluation of sugar-cane evapotranspiration from water table data in the everglades agricultural area. **Agricultural Water Management**, v. 27, p. 309–319, 1995.

PROCOPIO, S. de O.; CRUZ, M.A.S.; de ALMEIDA, M.R.M.; de JESUS JUNIOR, L.A.; NOGUEIRA JUNIOR, L.R.; de CARVALHO, H.W.L. SEALBA região de alto potencial agrícola no Nordeste brasileiro. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. (Embrapa Tabuleiros Costeiros, Documentos, 221), p. 62.

RUDORF, B.F.T.; AGUIAR, D.A. de; SILVA, W.F. da; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2: 1057–1076, 2010.

SILVA, T.G.F. da; MOURA, M.S.B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J. de S.; JUNIOR, W.F.G. Demanda hídrica e eficiência do uso da água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 1257–1265, 2011.

TEJERA, N.A.; RODES, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v. 102, 64–72, 2007.

TEIXEIRA, A.H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco River basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A.H. de C.; LEIVAS, J.F.; TAKEMURA, C.M.; PACHECO, E.P.; GARÇON, E.A.M.; SOUSA, I.F.; ALMEIDA, A.Q.; THENKABAIL, P. S.; AZEVEDO, A.F.M. S., 2024. Modeling and Monitoring Water Productivity by Using Geotechnologies In: Thenkabail, P. S. (Ed.), **Remote Sensing Handbook**, v. V, ed. 2: CRC Press, pp. 383 - 421.

WACLAWOVSKY, A.J.; SATO, P.M.; LEMBKE, C.G.; MOORE, P.H.; SOUZA, G.M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, v. 8, p. 1–14, 2010.

ZHANG, H.; ANDERSON, R.; WANG, D. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. **Remote Sensing of Environmental**, v. 122, p. 50–65, 2015.

INTERAÇÃO ENTRE MICROPLÁSTICOS VIRGENS E GLIFOSATO: AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO, DESSORÇÃO E FITOTOXICIDADE EM *Lactuca sativa*

1 Thalita Chelly de Araujo Maranha, 2 Herlane Teixeira Andrade Silva, 3 Renata Medici Frayne Cuba, 4 Francisco Javier Cuba Teran

1 Universidade Federal de Goiás (UFG), e-mail: thalitachelly@discente.ufg.br; 2 Universidade Federal de Goiás (UFG), e-mail: herlane.silva@discente.ufg.br; 3 Universidade Federal de Goiás (UFG), e-mail: renatafrayne@ufg.br; 3 Universidade Federal de Goiás (UFG), e-mail: paco@ufg.br.

Palavras-chave: Microplásticos; Glifosato; Fitotoxicidade.

Resumo

A ocorrência simultânea de microplásticos e agrotóxicos em ambientes agrícolas desperta preocupação quanto aos efeitos dessas interações no destino ambiental e na toxicidade de contaminantes. O presente estudo avaliou a interação entre microplásticos de politereftalato de etileno (PET) e o herbicida glifosato (N-(fosfonometil)glicina) por meio de ensaios de adsorção e dessorção em sistema de batelada, associados a bioensaios de fitotoxicidade com sementes de *Lactuca sativa*. Os experimentos utilizaram glifosato na forma de sal diamônio, avaliando-se os índices de germinação (IG e IGN) e crescimento radicular (ICR e IER) em diferentes frações: glifosato adsorvido aos microplásticos, fase aquosa remanescente (filtrado), microplásticos isolados e soluções regenerantes da dessorção. Os resultados indicaram que a germinação das sementes foi o parâmetro de resposta mais sensível. Observou-se que o glifosato adsorvido aos microplásticos apresentou biodisponibilidade reduzida, enquanto as fases líquidas (solução remanescente e solução regenerante) concentraram a fração mais biodisponível do contaminante, resultando em maior supressão da germinação. Quanto aos efeitos das partículas, os resultados evidenciaram a toxicidade intrínseca do PET, uma vez que tanto os microplásticos puros quanto aqueles com herbicida adsorvido comprometeram o desenvolvimento inicial das plantas. Adicionalmente, verificou-se que o microplástico atua como um reservatório ambiental, capaz de reter e liberar gradualmente o contaminante. Conclui-se que a presença de microplásticos modifica a biodisponibilidade do glifosato e introduz riscos fitotóxicos próprios, destacando a necessidade de considerar essas interações em avaliações de risco ambiental.

Keywords: Microplastics; Glyphosate; Phytotoxicity

Abstract

The simultaneous occurrence of microplastics and pesticides in agricultural environments raises concerns regarding the effects of these interactions on the environmental fate and toxicity of contaminants. This study evaluated the interaction between polyethylene terephthalate (PET) microplastics and the herbicide glyphosate (N-(phosphonomethyl)glycine) through batch adsorption and desorption experiments combined with phytotoxicity bioassays using *Lactuca sativa* seeds. The experiments employed glyphosate in the diammonium salt form, and the germination indices (GI and NGI) and root growth indices (RGI and RER) were evaluated in different fractions: glyphosate adsorbed onto microplastics, the remaining aqueous phase (filtrate), isolated microplastics, and regenerant solutions obtained after desorption. The results indicated that seed germination was the most sensitive response parameter. Glyphosate adsorbed onto microplastics showed reduced bioavailability, whereas the liquid phases (remaining solution and regenerant solution) concentrated the most bioavailable fraction of the contaminant, resulting in greater suppression of germination. Regarding particle effects, the results revealed the intrinsic toxicity of PET, as both pure microplastics and those with adsorbed herbicide impaired the early development of the plants. Additionally, microplastics acted as an environmental reservoir capable of retaining and gradually releasing the contaminant. It can be concluded that the presence of microplastics alters the bioavailability of glyphosate and introduces additional phytotoxic risks, highlighting the importance of considering these interactions in environmental risk assessments.

Introdução

A contaminação ambiental por plásticos tornou-se um dos principais desafios da ciência ambiental nas últimas décadas. Entre as diferentes formas de poluição associadas a esses materiais, os microplásticos (MP's), definidos como partículas plásticas com tamanho inferior a 5 mm, têm recebido atenção crescente devido à sua ampla distribuição em ambientes aquáticos, terrestres e atmosféricos. Esses fragmentos podem originar-se tanto da fragmentação de plásticos maiores quanto da liberação direta de partículas produzidas industrialmente, sendo atualmente detectados em solos agrícolas, sedimentos e diversos organismos vivos (BINDA *et al*., 2024).

Além de sua persistência no ambiente, os microplásticos apresentam elevada área superficial e propriedades físico-químicas capazes de favorecer interações com diferentes contaminantes ambientais. Essas partículas podem atuar como superfícies sorventes para compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo pesticidas, hidrocarbonetos e metais, alterando o transporte, a mobilidade e a biodisponibilidade desses contaminantes no ambiente (CHEN *et al*., 2024). Em sistemas agrícolas, essa interação

torna-se particularmente relevante, uma vez que solos cultivados recebem simultaneamente resíduos plásticos e aplicações frequentes de agrotóxicos.

Entre os herbicidas amplamente utilizados na agricultura, o glifosato (N-(fosfonometil)glicina) destaca-se pelo seu amplo espectro de ação e elevada aplicação em diferentes culturas agrícolas. O composto atua inibindo a enzima 5-enolpiruvil-shiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), etapa essencial da via metabólica do ácido chiquímico responsável pela biossíntese dos aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina e triptofano. A interrupção dessa via metabólica compromete processos fisiológicos fundamentais nas plantas, incluindo síntese proteica, crescimento celular e desenvolvimento radicular (DUKE; POWLES, 2008).

Nos ambientes naturais, o destino ambiental do glifosato (GLF) pode ser influenciado por diferentes fatores físico-químicos, incluindo pH, composição do solo e presença de partículas sólidas capazes de interagir com o composto. Nesse contexto, a presença de MP's no ambiente pode modificar a dinâmica de adsorção e dessorção do herbicida, influenciando sua disponibilidade no meio e seus potenciais efeitos biológicos sobre organismos expostos (BINDA *et al*., 2024; CHEN *et al*., 2024).

Apesar do crescente número de estudos sobre MP's e pesticidas, ainda existem lacunas importantes relacionadas à compreensão de como essas partículas podem influenciar os efeitos ecotoxicológicos de herbicidas em organismos vegetais. Bioensaios com plantas têm sido amplamente utilizados como ferramentas sensíveis para avaliar a toxicidade de contaminantes ambientais, sendo *Lactuca sativa* uma espécie frequentemente empregada devido à elevada sensibilidade de suas sementes e raízes a alterações químicas no meio (BAGUR-GONZÁLEZ *et al*., 2011).

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a interação entre MP's de politereftalato de etileno (PET) e o herbicida GLF por meio de ensaios de adsorção e dessorção em sistema de batelada, associados a bioensaios de fitotoxicidade utilizando sementes de *Lactuca sativa*. Buscou-se investigar como a presença de MP's pode influenciar a biodisponibilidade do herbicida e seus efeitos no processo de germinação e no desenvolvimento inicial das plântulas.

Material e Métodos

Os MP's de politereftalato de etileno (PET) foram obtidos por meio da trituração de garrafas PET após consumo e previamente lavadas com água potável e secos, para a trituração com o auxílio de uma serra policorte. Em seguida, foi moído e peneirado até a obtenção de partículas com diâmetro entre 0,1 e 5,0 mm, faixa correspondente à definição de MP's. Todas as partículas utilizadas neste estudo foram consideradas virgens, não sendo submetidas a processos de envelhecimento artificial.

Os ensaios de adsorção do GLF foram realizados em sistema de batelada, utilizando mesa agitadora orbital, sendo a massa de 0,1 g de MP's de PET e 50 mL de solução aquosa do herbicida em diferentes concentrações iniciais (2,5 a 50 mg L^{-1}). As suspensões foram mantidas sob agitação orbital constante (100 rpm), à temperatura controlada (15°C), por um período de 24 h, previamente determinado como suficiente para o estabelecimento do equilíbrio. No término do ensaio a concentração de GLF foi quantificada por método colorimétrico (TZASKOS *et al*, 2012), e determinados os valores de capacidade de adsorção (q_e) calculados pela seguinte equação (Equação 01).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} xV \qquad (01)$$

Sendo q_e (mg/g) - quantidade de GLF adsorvido no equilíbrio por massa de partículas de MP's, C_0 - concentração inicial de GLF (mg/L), C_e - concentração de GLF no equilíbrio (mg/L), V - volume da solução (L) e m a massa de partículas de MP (g).

Após o equilíbrio de adsorção, as partículas de PET saturadas com GLF foram separadas da solução, secas a temperatura de 105 ºC durante 15 minutos, e transferidas para frascos contendo 50 mL de solução regenerante (água destilada, pH de aproximadamente 6). O sistema foi novamente submetido à agitação orbital, por 30 minutos. A concentração de GLF na solução regenerante foi determinada para estimar a quantidade dessorvida (q_d) (eq. 02).

$$q_d = \frac{C_r xV}{m} \qquad (02)$$

$$q_{rs} = q_e - q_d \qquad (03)$$

Em que, q_d - quantidade de GLF dessorvido das partículas de MPs (mg/g); q_{rs} - quantidade de GLF retido nas partículas de MPs após a dessorção (mg/g), q_e - quantidade de GLF adsorvido (no equilíbrio) obtido no ensaio de adsorção (mg/g), V - volume de solução regenerante (L) e m é a massa de partículas de MPs (g).

Ensaio de Fitotoxidade

Após o processo de adsorção e dessorção, realizaram-se procedimentos de separação das fases líquida e particulada com o objetivo de avaliar individualmente seus efeitos em bioensaios de fitotoxicidade (germinação e raízes) em sementes de alface (*Lactuca sativa*). No total, avaliaram-se quatro condições de exposição: (i) MP virgem; (ii) MP com GLF adsorvido; (iii) solução remanescente de GLF; e (iv) líquido regenerante. Para cada tratamento, foram utilizadas 10 sementes, às quais se adicionaram 4,0 mL da solução correspondente. As amostras foram incubadas a 24 °C por 5 dias, conforme Priac (2017). Nos ensaios com MPs, as sementes foram colocadas sobre a membrana de filtração (0,45 µm) em placas de Petri. Nos ensaios com o filtrado, utilizou-se o líquido obtido na adsorção/dessorção em substituição à água destilada. Analisou-se o índice e a porcentagem de germinação e o desenvolvimento radicular, sendo consideradas germinadas as sementes com radículas maiores que 20 mm (Jiang et al., 2019).

As amostras avaliadas continham a concentração de MP's que apresentou maior capacidade de adsorção do GLF nos ensaios anteriores. Assim, o bioensaio foi conduzido com partículas de microplástico contendo GLF adsorvido em equilíbrio. Após o período de incubação, as sementes germinadas de cada tratamento foram lavadas com água destilada, secas com papel absorvente e as raízes separadas, medidas e pesadas.

O controle positivo foi composto por uma solução de sulfato de zinco ($ZnSO_4$) a 0,05 $mol \cdot L^{-1}$, enquanto o controle negativo foi composto por água destilada. A avaliação da germinação e do crescimento radicular foi realizada utilizando as seguintes fórmulas:

$$\text{ICR} = \frac{\text{CRA}}{\text{CRC}} \qquad (04)$$

Onde: ICR representa o Índice de Crescimento Radicular, CRA o Comprimento Radicular da Amostra e CRC o Comprimento Radicular no controle negativo.

O ICR foi classificado em três categorias, de acordo com os efeitos tóxicos apresentados: Inibição do alongamento da raiz quando $0 < ICR < 0{,}8$; não houve efeito significativo (NES) quando $0{,}8 \leq ICR \leq 1{,}2$; estímulo do alongamento da raiz (E) quando $ICR > 1{,}2$ (Viana *et al*., 2018).

$$IG = ICR * \left(\frac{SGA}{SGC}\right) * 100 \qquad (05)$$

Onde: IG representa o Índice de germinação, ICR o Índice de crescimento radicular, SGA o número de sementes germinadas na amostra e SGC o número de sementes germinadas no controle negativo.

Para validação do teste e aceitação do experimento com resultados satisfatórios, foram adotados os critérios de Viana *et al*. (2018), que prevê para tanto, germinação mínima de 90% das sementes das placas de controle negativo e o coeficiente de variação do alongamento da raiz (Equação 06) não ultrapassar 30%. Caso estes critérios não tivessem sido atendidos, o teste deveria ser repetido utilizando-se outro lote de sementes.

$$CV = \left(\frac{S}{X}\right) * 100 \qquad (06)$$

Onde: CV o coeficiente de variação, S o desvio padrão e X a média.

A classificação de toxicidade será executada em conformidade com a metodologia de González *et al*. (2011), onde os índices IGN e IER apontam para o nível de toxicidade do efluente de acordo com a Tabela 1.

IGN (%) e IER (%)	Toxicidade
0 a -0,25	Baixa toxicidade
-0,25 a -0,5	Toxicidade moderada
-0,5 a -0,75	Toxicidade alta
-0,75 a -1,0	Toxicidade muito alta

Tabela 04 - Classificação da toxicidade com base nos valores de IGN (%) e IER (%)
Fonte: Adaptado de GONZÁLEZ, 2011; ALVES (2023)

Em que IER (Equação 7), representa o Índice de Porcentagem de Crescimento Radicular Normalizado e IGN (Equação 18) o Índice de Porcentagem de Germinação Residual Normalizado.

$$\text{IER}(\%) = \frac{\text{CMRCA} - \text{CMRCN}}{\text{CMRCN}} \qquad (07)$$

Onde: CMRCA representa o Comprimento Médio das Radículas em cada amostra e CMRCN representa o Comprimento Médio das Radículas Germinadas no Controle Negativo.

$$IGN(\%) = \frac{\text{GERMamostra} - \text{GERMcont.negativo}}{\text{GERMcont.negativo}} \qquad (08)$$

Onde GERMamostra corresponde a porcentagem média de sementes germinadas em cada amostra e GERMcont.negativo corresponde a porcentagem de sementes germinadas no controle negativo.

Resultados e discussões

A Figura 1 apresenta uma visão qualitativa dos efeitos dos diferentes tratamentos sobre a germinação e o desenvolvimento radicular de Lactuca sativa. As imagens permitem observar diferenças visuais entre os tratamentos, evidenciando variações no número de sementes germinadas e no crescimento das radículas, bem como contrastes entre a fração filtrada, o GLF adsorvido aos

MPs e a exposição aos MPs isoladamente. Os painéis (A–D) ilustram o comportamento do controle negativo (água destilada), da fração filtrada, do GLF adsorvido aos microplásticos e dos microplásticos isolados. As imagens são representativas dos ensaios realizados e incluem raízes provenientes de duplicatas experimentais (duas placas por tratamento), motivo pelo qual o número de plântulas visíveis não corresponde exatamente ao número de sementes por placa utilizado nas análises quantitativas.

Em seguida, a Tabela 2 apresenta os resultados quantitativos obtidos nos bioensaios de fitotoxicidade, incluindo os índices de germinação e crescimento radicular calculados para cada tratamento.

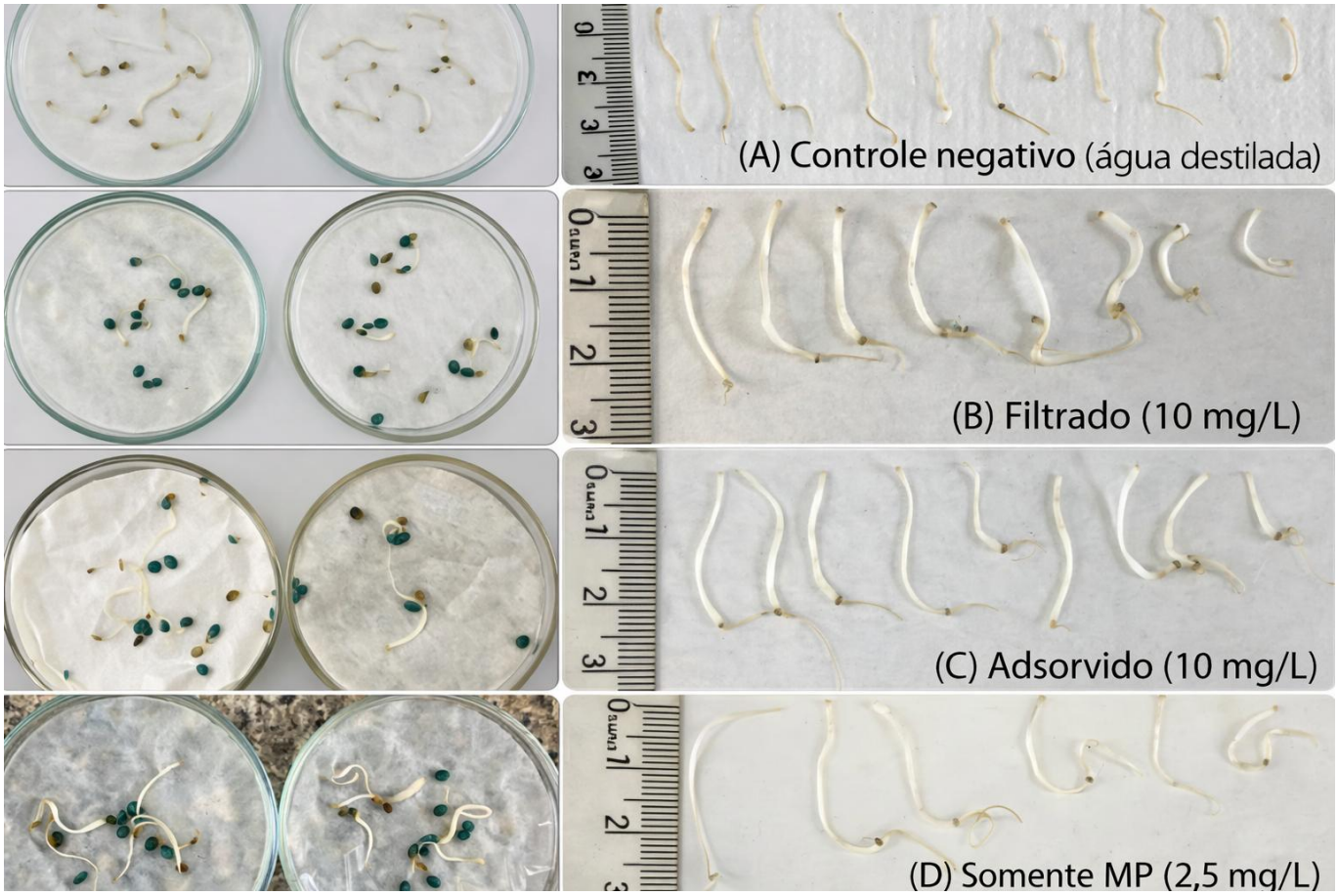


Figura 01: Placas de Petri com sementes de *Lactuca sativa* após 120 horas de incubação dos diferentes tratamentos: (A) controle negativo (água destilada); (B) fração filtrada (10 mg L^{-1}); (C) microplásticos com GLF adsorvido (10 mg L^{-1}); e (D) microplásticos isolados (2,5 mg L^{-1}).
Fonte: Autores (2026)

	Conc. (mg/L)	ICR	IG	IER	IGN
Adsorvidos	B1	0,870	28,986	-0,130	-0,667
	2,5	0,870	48,309	-0,130	-0,444
	10	1,087	60,386	0,087	-0,444
	50	1,073	71,507	0,073	-0,333
Filtrados	B1	0,870	19,324	-0,130	-0,778
	2,5	-	-	-	-
	10	0,870	48,309	-0,130	-0,444
	50	-	-	-	-
Somente MP	B1	1,304	14,493	0,304	-0,889
	2,5	0,000	0,000	-1,000	-0,889
	10	1,652	55,072	0,652	-0,667
	50	0,935	20,773	-0,065	-0,778
	B1	1,413	94,203	0,413	-0,333

Somente MP (dessorção)	2,5	1,304	72,464	0,304	-0,444
	10	-	-	-	-
	50	1,087	12,077	0,087	-0,889
Dessorção	B1	0,957	53,140	-0,043	-0,444
	2,5	1,304	43,478	0,304	-0,667
	10	1,087	60,386	0,087	-0,444
	50	0,870	67,633	-0,130	-0,222

Tabela 5 - Parâmetros ecotoxicológicos obtidos no bioensaio de fitotoxicidade com *Lactuca sativa* exposta a diferentes tratamentos contendo MP's e GLF.
Fonte: Autores (2026)

Conforme resultados apresentados na Tabela 2, os bioensaios com *Lactuca sativa* indicaram que a resposta fitotóxica foram predominantemente controladas pela germinação das sementes (IGN), enquanto o crescimento radicular (ICR/IER) apresentou variações entre leve inibição e estímulo, dependendo do tratamento. Esse comportamento pode indicar que a interação entre MP's e GLF influencia diretamente a biodisponibilidade do contaminante, resultando em respostas biológicas não lineares durante as fases iniciais do desenvolvimento vegetal. Esse padrão também é consistente com estudos que apontam que a toxicidade pode ser mais sensível na etapa de germinação do que no crescimento radicular (BAGUR-GONZÁLEZ *et al*., 2011).

Essa maior sensibilidade da germinação em relação ao crescimento radicular, observada inicialmente em nossos ensaios, pode ser explicada pelo mecanismo de ação do herbicida. O GLF (N-(fosfonometil) glicina) exerce seu efeito herbicida por meio da inibição da enzima 5-enolpiruvil-shiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), bloqueando a via do ácido chiquímico e a produção de aminoácidos aromáticos essenciais (fenilalanina, tirosina e triptofano). A interrupção dessa rota compromete processos fundamentais como a divisão e o alongamento celular (DUKE; POWLES, 2008). No presente estudo, observou-se que esse comprometimento metabólico se manifestou de forma crítica logo no início do processo germinativo, confirmando que a interrupção dessa via impacta o vigor inicial da plântula antes mesmo do pleno desenvolvimento das raízes.

No tratamento onde houve exposição das sementes ao MP adsorvido com GLF, o Índice de Crescimento Radicular (ICR) manteve-se entre 0,87 e 1,09, indicando ausência de efeito significativo no alongamento das raízes na maior parte das condições avaliadas ($0,8 \leq ICR \leq 1,2$). Observou-se leve inibição do crescimento radicular nas condições B1 e 2,3 ($\approx -13\%$) e discreto estímulo quando expostas às partículas em contato com concentrações de soluções de 10 e 50 mg/L ($\approx +7\%$ a $+9\%$). Entretanto, o IGN indicou redução de germinação entre 33% e 67% em relação ao controle negativo (composto apenas por água destilada, onde se espera o desenvolvimento ideal das sementes), resultando em classes de toxicidade moderada a alta, apesar do crescimento radicular relativamente preservado. Essa dissociação entre germinação reduzida e manutenção do crescimento radicular sugere que o GLF associado às partículas de PET apresenta biodisponibilidade limitada, afetando preferencialmente os eventos iniciais do processo germinativo, mais sensíveis, como embebição, ativação metabólica e divisão celular inicial, sem promover toxicidade sistêmica contínua durante o alongamento radicular. Estudos têm demonstrado que a adsorção do GLF em superfícies sólidas pode reduzir sua mobilidade e retardar sua liberação, uma vez que o herbicida interage por meio de pontes de hidrogênio e interações eletrostáticas, resultando em exposição atenuada e não proporcional à carga inicial aplicada (GUO *et al*., 2021; CHEN *et al*., 2024).

Em termos integrados, o Índice de Germinação (IG) aumentou de 28,99 (B1) para 71,51 (50 mg/L), indicando melhora do desempenho global das sementes com o aumento da concentração nominal utilizada no preparo do adsorvido. Essa tendência contrasta com a expectativa clássica de relação direta entre concentração e toxicidade, e reforça a hipótese de que o microplástico atua como um modulador da exposição química, funcionando como um reservatório que reduz picos de concentração na fase aquosa e promove uma liberação lenta do contaminante (GUO *et al*., 2021; BINDA *et al*., 2024).

Além disso, a toxicidade observada pode ser influenciada pela natureza da formulação do GLF utilizada. Evidências indicam que coformulantes presentes em formulações comerciais, especialmente surfactantes, contribuem significativamente para os efeitos tóxicos, sendo diferencialmente adsorvidos em superfícies particuladas quando comparados ao ingrediente ativo isolado (GUO *et al*., 2021). Dessa forma, a adsorção seletiva desses componentes ao PET pode ter resultado na atenuação do efeito fitotóxico global nos tratamentos adsorvidos, afastando uma interpretação simplista de que maiores concentrações aplicadas resultariam necessariamente em maior toxicidade observada.

No tratamento filtrado, que corresponde à solução remanescente da etapa de adsorção (após a remoção dos MP's), observou-se forte supressão da germinação no ponto B1, com IGN igual a −0,778 (muito alta toxicidade por germinação). Nessa condição, ICR permaneceu constante em 0,87 (inibição leve do crescimento radicular), resultando em um Índice de Germinação (IG) reduzido (19,32). Já na concentração de 10 mg/L do mesmo tratamento (filtrado da adsorção), ocorreu melhora parcial da germinação, com IGN classificado como toxicidade moderada (−0,444), sem alteração relevante no ICR, elevando o IG para 48,31. Esses resultados indicam que, para a fração filtrada, a germinação foi o principal parâmetro de resposta afetado, enquanto o alongamento radicular mostrou menor sensibilidade às concentrações testadas. Tal padrão sugere que a fase líquida concentra a fração mais biologicamente ativa do sistema, composta pelo GLF dissolvido e, possivelmente, por coformulantes presentes na formulação do herbicida, os quais são reconhecidos como importantes determinantes da toxicidade observada em ensaios ecotoxicológicos com plantas (MESNAGE *et al*., 2017).

Estudos demonstram que formulações comerciais à base de GLF frequentemente apresentam maior toxicidade do que o ingrediente ativo isolado, uma vez que surfactantes e outros aditivos podem aumentar a permeabilidade das membranas celulares e a absorção do composto pelas sementes, intensificando os efeitos fitotóxicos, sobretudo durante as fases iniciais da germinação (MESNAGE *et al*., 2017). Dessa forma, a elevada toxicidade observada na condição B pode refletir uma combinação de exposição direta ao GLF dissolvido e à ação sinérgica de coformulantes presentes na fase aquosa.

A melhora relativa do desempenho germinativo observada na concentração de 10 mg L^{-1}, embora não caracterize ausência de toxicidade, indica que a resposta não segue uma relação dose–resposta estritamente linear. Essa não monotonicidade pode estar associada a mecanismos de adaptação fisiológica, variações na absorção efetiva do contaminante ou efeitos horméticos em baixas doses, conforme descrito para herbicidas à base de GLF em bioensaios com *Lactuca sativa* e outras espécies vegetais (MESNAGE *et al*., 2017).

De forma geral, os resultados do tratamento filtrado reforçam que a fase aquosa representa o cenário de maior risco fitotóxico imediato, uma vez que concentra os componentes mais prontamente disponíveis para absorção pelas sementes, contrastando com os tratamentos envolvendo MP's, nos quais a biodisponibilidade do GLF é modulada por processos de adsorção e liberação gradual. Sendo assim, a fração filtrada representa uma exposição mais próxima de um cenário aquático/agudo, enquanto as frações com MPs simulam interações sólido–organismo mais complexas.

O grupo composto apenas por MP apresentou os efeitos mais severos entre todos os conjuntos avaliados. Especificamente, na condição 2,3, observou-se IG = 0 e IER = −1, valores que indicam fitotoxicidade máxima para o desenvolvimento radicular na escala normalizada. Além disso, o IGN de −0,889 sinalizou uma toxicidade muito alta para o processo de germinação. Esses resultados evidenciam que, mesmo na ausência de GLF dissolvido, os MP's de PET foram capazes de provocar efeitos severos nos estágios iniciais do desenvolvimento de *Lactuca sativa*.

Em outras condições (B e 10), ocorreu um padrão aparentemente paradoxal: germinação muito baixa (IGN muito negativo) coexistindo com IER positivo (hormese), isto é, raízes mais longas nos poucos indivíduos que germinaram. Esse tipo de dissociação entre germinação e crescimento pode ser explicado por mecanismos como a seleção de indivíduos mais vigorosos, a redução da competição intra-placa ou respostas horméticas em baixas doses, sendo um comportamento já descrito em bioensaios vegetais expostos a estressores físicos e químicos (BAGUR-GONZÁLEZ *et al*., 2011).

Esses resultados reforçam a necessidade de interpretar com cautela os índices de crescimento isoladamente, priorizando métricas integradoras como IG e IGN, que refletem diretamente o sucesso do evento germinativo. Além disso, a avaliação do número absoluto de sementes germinadas e do número de réplicas experimentais é essencial para assegurar a robustez estatística e biológica desses efeitos, especialmente em cenários de elevada mortalidade inicial.

Há ampla evidência na literatura de que MP's podem exercer efeitos próprios sobre plantas, independentemente da presença de contaminantes adsorvidos. Esses efeitos incluem indução de estresse oxidativo, alterações na absorção e translocação de nutrientes, interferência física no contato semente–substrato e respostas fisiológicas dependentes do tipo de polímero, do tamanho das partículas e do cenário de exposição (JIANG *et al*., 2023). Assim, os resultados obtidos no presente estudo indicam que os MP's de PET não atuam apenas como vetores passivos de contaminantes, mas como agentes ecotóxicos ativos, capazes de comprometer a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas mesmo quando avaliados isoladamente.

No tratamento composto apenas por MP (pós-dessorção), os resultados sugerem a atuação de um mecanismo de reservatório. Nas condições B e 2,3, o IG apresentou valores elevados (94,20 e 72,46, respectivamente), indicando baixa toxicidade global e refletindo a preservação da germinação e do desenvolvimento inicial. Em contraste, na condição 50, observou-se uma queda drástica do IG para 12,08, associada a uma forte supressão da germinação (IGN = −0,889), o que caracteriza toxicidade muito alta para este indicador biológico.

Essa resposta diferenciada entre as concentrações é coerente com a hipótese de que, em carregamentos mais elevados, os MP's de PET podem reter contaminantes em sítios heterogêneos ou aprisioná-los em poros e irregularidades da superfície, preservando sua capacidade de causar efeitos biológicos mesmo após o processo de dessorção. Dessa forma, embora a fase aquosa apresente menor toxicidade imediata, o contato direto entre semente e partícula pode promover uma liberação localizada do contaminante no microambiente semente–microplástico, intensificando os efeitos fitotóxicos observados.

A literatura descreve amplamente os MP's como vetores ambientais capazes de modular a biodisponibilidade de contaminantes, atuando tanto como sorventes temporários quanto como fontes secundárias de liberação, com implicações diretas para o destino ambiental dos poluentes e para a resposta biológica dos organismos expostos (TAN *et al*., 2021; NKIN, 2025). Esses efeitos são fortemente dependentes da carga do contaminante, do tipo de polímero e das condições de interação físico-química, o que explica a ausência de uma relação dose–resposta linear nos tratamentos avaliados.

Assim, os resultados do tratamento "somente MP (dessorção)" reforçam que os MP's não apenas influenciam a toxicidade por meio da fase líquida, mas também atuam como reservatórios ativos, capazes de prolongar ou redistribuir a exposição das sementes ao contaminante, mesmo após etapas destinadas à sua remoção. Esse comportamento tem implicações relevantes para a avaliação de risco ambiental, uma vez que pode resultar em efeitos fitotóxicos persistentes em cenários nos quais a concentração aparente do contaminante na fase aquosa é reduzida.

Por fim, em dessorção, a condição 50 apresentou baixa toxicidade, conforme indicado pelos valores de IGN (−0,222) e IER (−0,130), refletindo germinação relativa mais elevada quando comparada às demais condições, apesar de leve inibição do crescimento radicular. Esses resultados indicam que, embora parte do GLF tenha sido liberada para a fase aquosa durante o processo de dessorção, a fração biologicamente ativa disponível às sementes foi insuficiente para provocar efeitos fitotóxicos severos.

A ausência de uma relação dose–resposta monotônica entre as concentrações avaliadas é compatível com a cinética e a heterogeneidade do processo de dessorção, no qual a liberação do contaminante pode ocorrer de forma não uniforme, dependendo da força de ligação aos sítios de adsorção e da acessibilidade do contaminante aprisionado em irregularidades ou poros da superfície do microplástico. Dessa forma, concentrações nominais mais elevadas não implicam necessariamente maior biodisponibilidade imediata do herbicida na solução dessorvida.

Adicionalmente, as variações observadas podem refletir diferenças associadas à composição da formulação de GLF, uma vez que há evidências consolidadas de que surfactantes e outros coformulantes, como aminas graxas polietoxiladas (POEA), contribuem substancialmente para a toxicidade de herbicidas à base de GLF. Esses compostos podem apresentar comportamento distinto durante os processos de adsorção e dessorção, influenciando de maneira decisiva a toxicidade observada nos bioensaios, especialmente durante a germinação (ATSDR, 2020).

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro concedido por meio do edital CHAMADA PÚBLICA ou CONVÊNIO: 21/2024 – Programa de Auxílio à Pesquisa Científica e Tecnológica – Edição 2024 à Universidade Federal de Goiás (UFG) pelo suporte institucional, e ao Laboratório de Saneamento (LASAN/UFG), onde foram desenvolvidos os experimentos deste estudo, pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização das análises.

Referências Bibliográficas

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Glyphosate. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2020. Disponível em: https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp214.pdf.

BAGUR-GONZÁLEZ, M. G.; MOLINA, C. E.; PEINADO, F. M.; RUANO, S. M. Toxicity assessment using *Lactuca sativa* L. bioassay of the metal(loid)s As, Cu, Mn, Pb and Zn in soluble-in-water saturated soil extracts from an abandoned mining site. Journal of Soils and Sediments, v. 11, n. 2, p. 281-289, 2011. https://doi.org/10.1007/s11368-010-0285-4.

BINDA, G.; KALČÍKOVÁ, G.; ALLAN, I. J.; HURLEY, R.; RØDLAND, E.; SPANU, D.; NIZZETTO, L. Microplastic aging processes: environmental relevance and analytical implications. TrAC – Trends in Analytical Chemistry, 2024. https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117566.

CHEN, X.; YU, X.; ZHANG, L.; ZHAO, W.; SUI, Q. Organic pollutants adsorbed on microplastics: potential indicators for source appointment of microplastics. Journal of Hazardous Materials, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133225.

DUKE, Stephen O.; POWLES, Stephen B. Glifosato: um herbicida que surge uma vez a cada século. **Pest Management Science: anteriormente Pesticide Science** , v. 64, n. 4, p. 319-325, 2008. https://doi.org/10.1002/ps.1518.

GUO, X.; WANG, J.; ZHANG, Z.; ZHOU, Y.; CHEN, X. Adsorption behavior and toxicity modulation of glyphosate in the presence of solid surfaces. Journal of Hazardous Materials, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126872.

JIANG, X.; CHEN, H.; LIAO, Y.; YE, Z.; LI, M.; KLOAS, W. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant Vicia faba. Environmental Pollution, v. 250, p. 831-838, 2019. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055.

JIANG, X.; LI, J.; ZHANG, Y.; CHEN, H. Effects of microplastics on plant growth and physiology: a review. Environmental Pollution, 2023. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121899.

LI, X.; MEI, Q.; CHEN, L.; ZHANG, H.; DONG, B.; DAI, X.; HE, C.; ZHOU, J. Enhancement in adsorption potential of microplastics in sewage sludge for metal pollutants after the wastewater treatment process. Water Research, 2019. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.069.

LOURENÇO, F. M. de O. Influência nos processos de retenção e transporte de pesticidas e ecotoxicidade de microplásticos em solo tropical. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências – Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

MARTINHO, S. D.; FERNANDES, V. C.; FIGUEIREDO, S. A.; VILARINHO, R.; MOREIRA, J. A.; DELERUE-MATOS, C. Laboratory studies about microplastic aging and its effects on the adsorption of chlorpyrifos. Polymers, 2023. https://doi.org/10.3390/polym15163468.

MESNAGE, R.; DEFARGE, N.; ROUGERIE, K.; SERALINI, G. E. Toxicity of formulated glyphosate products compared to glyphosate alone. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.016.

MORAES, P. V. D.; ROSSI, P. Comportamento ambiental do glifosato. Scientia Agraria Paranaensis, 2010. https://doi.org/10.18188/sap.v9i3.5258.

NKIN, G. K. Microplastics as silent invaders: a multiscale review of their toxicological effects and contaminant interactions. Magna Scientia Advanced Research and Reviews, 2025. https://doi.org/10.30574/msarr.2025.14.2.0088.

TAN, S. M. A.; KHALIK, W. M. A.; ONG, M. C.; SHAO, Y. T.; PAN, H. J.; BHUBALAN, K. Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and their hazards to the marine ecosystem and humans. Progress in Earth and Planetary Science, v. 8, 2021. https://doi.org/10.1186/s40645-020-00405-4.

VIANA, L. O.; MARTINS, K. G.; SOUZA, K. V. D.; STROPARO, E. C. Fitotoxicidade de efluente da indústria cervejeira em sementes de *Lactuca sativa* L. Revista Internacional de Ciências, v. 7, n. 2, p. 265-275, 2018. https://doi.org/10.12957/ric.2017.30072.

VIEIRA, C.; MARCON, C.; DROSTE, A. Phytotoxic and cytogenotoxic assessment of glyphosate on *Lactuca sativa* L. Brazilian Journal of Biology, 2024. https://doi.org/10.1590/1519-6984.257039.

TZASKOS, D.F.; MARCOVICZ, C.; DIAS, N.M.P.; ROSSO, N.D. Development of sampling for quantification of glyphosate in natural waters. Agricultural Sciences, v. 36, n. 4, p. 399-405, 2012. https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000400003.

INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DO SOLO NA PRODUÇÃO PECUÁRIA: EFICÁCIA DE SISTEMAS SILVIPASTORIS

1 Gabriel da Costa Morais, 2 Mariah França Pereira
1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: gabrielc.morais@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: mariah.franca@ufu.br.

Palavras-chave: Impactos edáficos; pastagens agroecológicas; forragem.

Resumo

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica sistematizada, de natureza descritiva e abordagem qualitativa e quantitativa, fundamentada no protocolo PRISMA 2020 simplificado. O estudo investiga a influência da qualidade edáfica na implementação de sistemas silvipastoris (SSPs) na produção pecuária, visando identificar indicadores que demonstrem a efetividade dessa integração em comparação ao manejo convencional de pastagens. Para a formulação da pergunta de pesquisa e busca de evidências, utilizou-se a estratégia PICO (População, Intervenção, Comparação e Desfecho), resultando na seguinte questão: de que maneira os sistemas silvipastoris influenciam a qualidade do solo e quais indicadores evidenciam sua efetividade frente à pastagem convencional? A problemática central refere-se à degradação físico-química e biológica dos solos brasileiros decorrente da pecuária extensiva, que provoca compactação, erosão e perda de micro biodiversidade. Os estudos foram obtidos no Portal de Periódicos CAPES, abrangendo publicações entre 2003 e 2025. A amostra inicial contou com 33 trabalhos, sendo reduzida a 19 artigos após critérios de elegibilidade e triagem. Os resultados indicam que os SSPs mitigam a compactação do solo, mantêm a densidade em níveis adequados e aumentam a estabilidade de agregados por meio do aporte de matéria orgânica. Observou-se também elevação nos teores de nitrogênio e potássio, além da regulação do microclima e da umidade, favorecendo a capacidade de suporte das pastagens. Conclui-se que o sistema silvipastoril constitui alternativa tecnicamente viável para a restauração das funções ecossistêmicas e a sustentabilidade produtiva, sendo necessários estudos adicionais com indicadores biológicos mais robustos.

Keywords: Edaphic impacts; agroecological pastures; forage.

Abstract

This research is characterized as a systematized bibliographic review, descriptive in nature and employing both qualitative and quantitative approaches, based on the PRISMA 2020 protocol. The study investigates the influence of edaphic quality on the implementation of silvopastoral systems (SPS) in livestock production, aiming to identify indicators that demonstrate the effectiveness of this integration compared to conventional pasture management. To formulate the research question and search for evidence, the PICO strategy (Population, Intervention, Comparison, and Outcome) was utilized, resulting in the following question: in what way do silvopastoral systems influence soil quality and which indicators evidence their effectiveness compared to conventional pasture? The central problem refers to the physical, chemical, and biological degradation of Brazilian soils resulting from extensive livestock farming, which causes compaction, erosion, and loss of micro-biodiversity. The studies were obtained from the CAPES Periodicals Portal, covering publications between 2003 and 2025. The initial sample consisted of 33 works, which was reduced to 19 articles after applying eligibility criteria and screening. Results indicate that SPS mitigate soil compaction, maintain density at appropriate levels, and increase aggregate stability through organic matter input. An increase in nitrogen and potassium levels was also observed, in addition to microclimate and moisture regulation, favoring the carrying capacity of the pastures. It is concluded that the silvopastoral system constitutes a technically viable alternative for the restoration of ecosystem functions and productive sustainability, although further studies with more robust biological indicators are necessary.

Introdução

A criação em larga escala de bovinos, que compõem um dos maiores rebanhos nacionais, com cerca de 238,2 milhões de cabeças (IBGE, 2024), tem contribuído consideravelmente para a deterioração da qualidade química, física e biológica do solo, sobretudo devido ao desflorestamento e ao constante pisoteio em áreas de manejo não sustentável (DALPOSSO et al., 2020). Assim, o impacto sistêmico oriundo da interação dessa prática é amplamente discutido na atualidade por ambientalistas, dado que se observam alterações com relação à simbiose mútua entre as raízes das plantas e a terra. Essa interferência, que ocorre através da introdução em quantidade massiva de espécies de animais não nativos, desequilibra ecossistemas, provoca erosão do solo como consequência da morte microbiana no solo e contribui para a infertilidade dos terrenos próximos às grandes fazendas de criação, comprometendo o crescimento vegetativo (PRIMAVESI, 2020).

Diante da dependência da agropecuária em relação à qualidade do solo, intensificam-se estudos técnicos e científicos voltados à investigação de seus atributos físicos, como densidade, porosidade e resistência à penetração, com o objetivo de avaliar suas condições estruturais. Essa abordagem permite compreender os efeitos do manejo sobre o solo, consolidando-se como estratégia fundamental para sua conservação, recuperação e melhoria (DALPOSSO et al., 2020). Como consequência, modelos de integração simultânea entre a criação de gado e o reflorestamento (árvores e forragem) começaram a ser incorporados

na agropecuária moderna, sendo um dos mais evidentes, o sistema silvipastoril, que favorece a recuperação de pastagens degradadas (FRANKE & FURTADO, 2001 apud RADOMSKI et al., 2012).

Nesse contexto, sistemas silvipastoris e agrossilvipastoris se apresentam como uma alternativa economicamente viável aos produtores, pois a arborização das pastagens promove um sombreamento que repercute no aumento de teor proteico do forrageamento, e com isso as novilhas engordam de forma mais acelerada e com maior qualidade, também devido à melhoria da climatização e bem-estar animal (PIRES et al., 2009, apud PETROSINO, 2025). Ao mesmo tempo, os sistemas silvipastoris mitigam os impactos ambientais da produção pecuária, melhoram condições do microclima, da atividade da microbiota, aproveitam nutrientes de camadas mais profunda do solo, e são alternativas sustentáveis, promissoras ao desenvolvimento de técnicas de fitorremediação, por exemplo. (LUKE, et al., 2022).

Acerca disso, este artigo busca apresentar uma revisão bibliográfica sobre a influência da qualidade do solo na produção por sistemas de integração de culturas silvipastoris, de maneira a compilar informações científicas sobre considerações finais de experimentos que se voltaram ao estudo das interações e influências do solo no contexto de sistema silvipastoril de manejo. Dito isso, reconhecendo que a base da produtividade pecuária reside na qualidade do solo, torna-se essencial compreender como as práticas silvipastoris influenciam a conservação ambiental do solo.

Materiais e Métodos

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica sistematizada, de natureza descritiva e abordagem qualitativa e quantitativa. A estruturação do estudo seguiu as diretrizes do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) 2020 simplificado, garantindo o rigor metodológico e a lisura na seleção das evidências científicas disponíveis no acervo científico. Nessa busca, a estratégia PICO representa o norte, com o propósito de atender à seguinte questão: "De que maneira os sistemas silvipastoris influenciam a qualidade do solo e quais indicadores demonstram a efetividade desse sistema frente à pastagem convencional?".

Essa estratégia é aplicada na estruturação de pesquisas, a fim de orientar a busca por evidências científicas, sendo composta por quatro dimensões: P (População/Problema), I (Intervenção), C (Comparação) e O (*Outcome*/Desfecho). No presente estudo, definiu-se P como áreas de ocupação pecuária com a utilização do solo em sistemas de pastagem; I como a implementação de sistemas silvipastoris; C como áreas de pastagem convencional, sem integração conjunta entre os componentes arbóreo, animal e forragem; e O como indicadores da qualidade do solo, incluindo atributos químicos, físicos e biológicos. Essa estrutura auxiliou na definição das palavras-chave e na seleção dos estudos mais relevantes para a análise.

A identificação de estudos correlatos foi realizada por meio de buscas eletrônicas na base de dados do Portal de Periódicos CAPES, em português, com os termos: "solo" e "silvipastoril". Na aplicação de filtros de pesquisa, com vistas ao refinamento, foram selecionados trabalhos publicados entre os anos de 2003 e 2025, que tivessem sido submetidos ao processo de revisão por pares (*peer-reviewed*), garantindo a qualidade acadêmica do material selecionado, resultando em 33 trabalhos na amostra inicial. Destes, 1 foi identificado como duplicado e excluído em sequência, totalizando 32 artigos na amostra final.

Na segunda etapa de seleção, conforme a metodologia PRISMA, houve a leitura e análise criteriosa dos títulos e resumos resultantes da busca inicial, de forma independente, por dois revisores, para verificar a aderência inicial ao tema. Para operacionalizar a triagem e garantir a isenção na efetividade na seleção, aplicou-se o sistema de semáforo para codificação das evidências em plataforma de processamento de texto digital e online (*Google Docs*). Nessa técnica, foram marcados em verde os estudos com alta convergência temática, focados diretamente nos indicadores do solo; em amarelo aqueles com discussões correlatas, mas foco secundário na qualidade edáfica; e em vermelho os registros que priorizavam os atributos animais, vegetais ou zootécnicos.

Os critérios de elegibilidade basearam-se na inclusão de materiais que apresentassem dados experimentais ou revisões robustas sobre indicadores de saúde do solo em área sob manejo silvipastoril. Ademais, foram excluídos estudos que não estabeleciam a influência da qualidade do solo nesse sistema, bem como aqueles cujo foco principal estava relacionado ao crescimento de espécies arbóreas, desempenho de forrageiras, manejo de plantas daninhas, adubação específica, conforto térmico animal ou produção zootécnica, além de pesquisas que abordavam o solo apenas de forma superficial, sem avaliação de seus atributos químicos, físicos ou biológicos.

Por fim, após o refinamento por meio da reavaliação dos artigos classificados como "amarelos" e a exclusão dos "vermelhos", o processo resultou em uma coletânea final de 19 artigos elegíveis para a síntese qualitativa. Esses estudos foram então analisados comparativamente, na busca em identificar padrões, convergências e potenciais divergências nos resultados apresentados. Assim, foi possível, a partir dessa etapa, organizar os principais indicadores de qualidade do solo avaliados, bem como compreender o modo que o manejo silvipastoril influencia esses atributos ao longo do tempo. Essa investigação, além do supracitado, permitiu ainda destacar lacunas na literatura, evidenciando aspectos que ainda necessitam de maiores ensaios, contribuindo assim para o direcionamento de futuras pesquisas na área. Conforme exposto anteriormente, o fluxograma metodológico é representado pela figura a seguir:

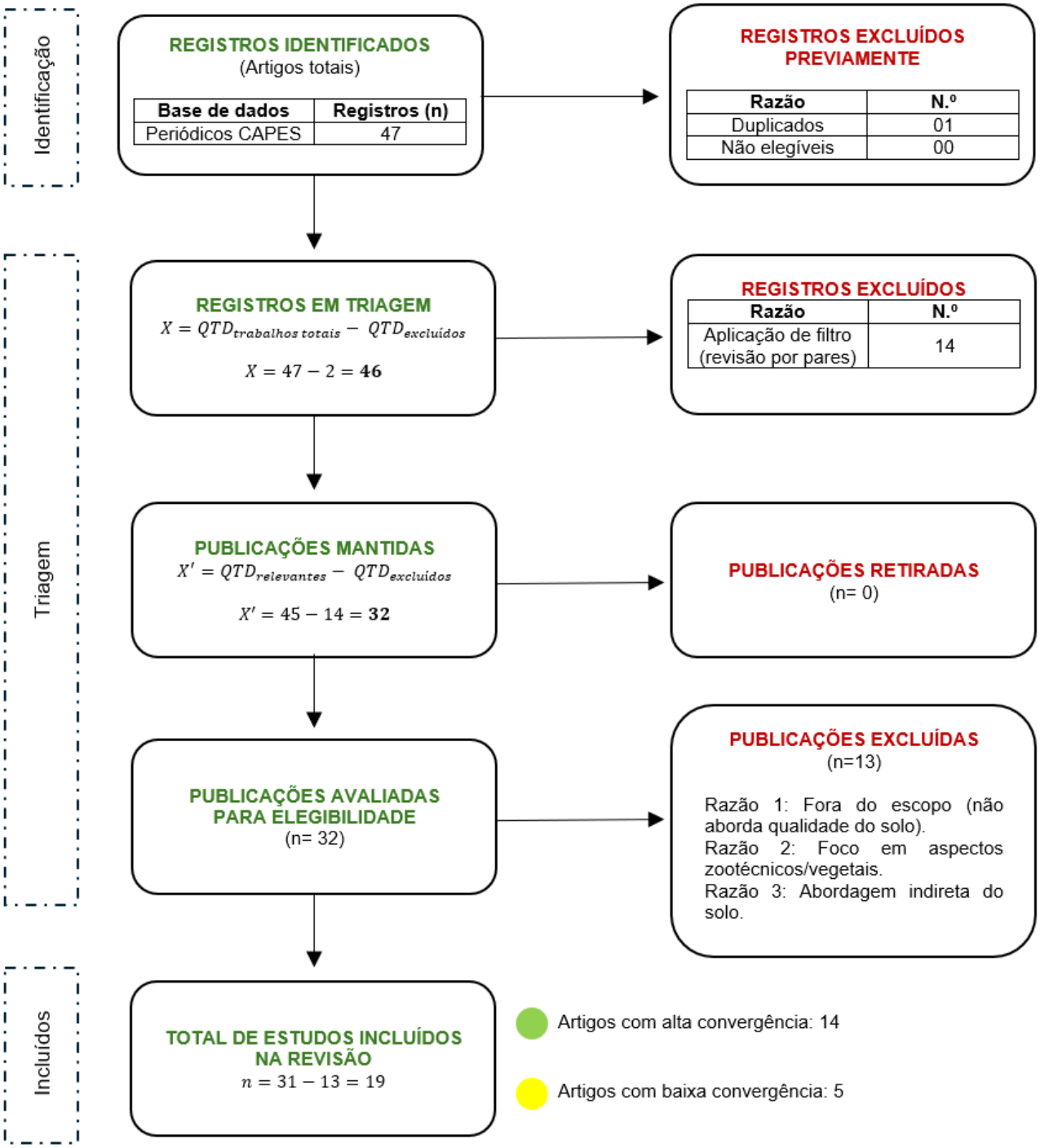


Figura 01: Fluxograma do processo de seleção dos estudos conforme protocolo PRISMA 2020 simplificado.
Fonte: Adaptado de PRISMA Statement (2026).

Resultados e Discussões

A análise técnica das propriedades do solo sob sistemas de integração lavoura-floresta-pecuária revela-se indispensável para consolidar estratégias que harmonizem a conservação dos ecossistemas com a viabilidade econômica do setor agropecuário. A partir da análise dos 19 artigos selecionados, foi possível identificar a frequência com que os estudos relatam melhorias nos principais indicadores de qualidade do solo em sistemas silvipastoris, em comparação aos sistemas convencionais. Conforme apresentado no Gráfico 1, observa-se predominância de resultados positivos, especialmente para matéria orgânica/carbono (15 estudos) e agregação/porosidade (14 estudos), indicando forte consenso científico quanto aos benefícios estruturais do sistema silvipastoril. Em contrapartida, indicadores como controle de erosão e retenção de umidade apresentam maior variabilidade entre os estudos, evidenciando que os efeitos do sistema podem depender de fatores como tempo de implantação, manejo e condições edafoclimáticas.

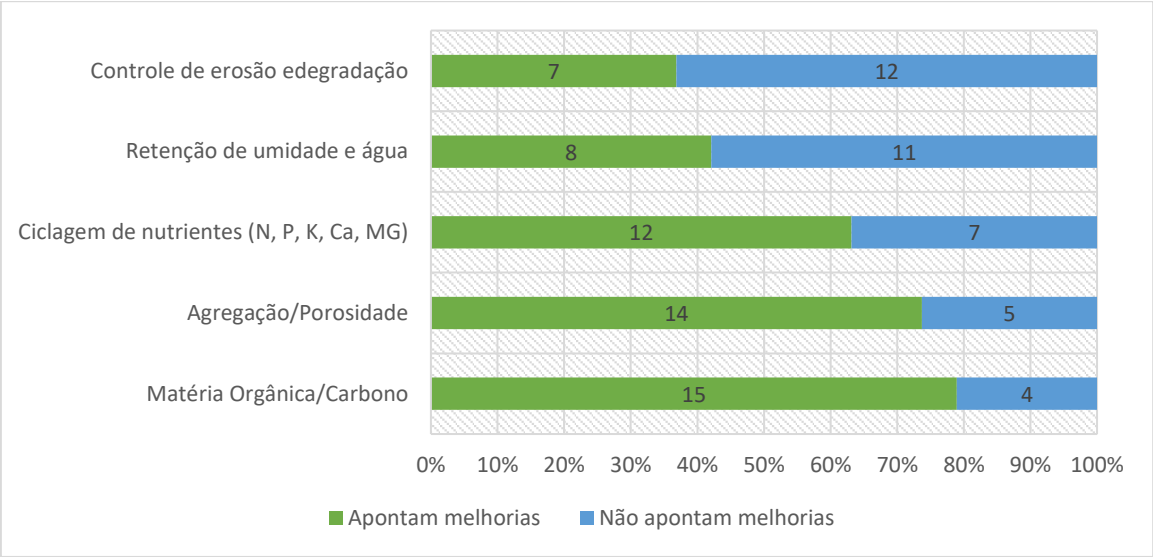


Gráfico 1: Consenso Científico sobre os Benefícios do SSP na Qualidade do Solo (n=19).
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A integração de núcleos de diversidade arbórea em pastagens ocasiona um sombreamento maior da forragem e uma maior concentração do rebanho nas áreas adjacentes aos núcleos (BATTISTI et. al., 2020). Com isso, para avaliar as consequências dessas implicações em Santa Catarina, Battisti et. al (2020) avaliou as alterações na estrutura do solo da implementação de núcleos de diversidade arbórea em pastagens (40 núcleos de 25 m2 por hectare) em comparação a pastagens convencionais. Através desse estudo, foi verificado: quanto à densidade edáfica, não houve aumento na densidade em relação ao pasto sem árvores, portanto, o comportamento do rebanho em torno do sombreamento não influenciou no aumento da densidade do solo.

A densidade do solo nos sistemas silvipastoris apresentou valores inferiores ao valor crítico de 1,55 mg/m3, variando de 0,84 a 1,46 mg/m3. Por consequência, não houve impedimento ao desenvolvimento normal das raízes. Acerca disso, atestou-se que a disposição equidistante dos núcleos arbóreos por piquetes promoveu uma distribuição da concentração do rebanho, evitando uma possível compactação por pisoteio do animal.

Nesse enlace, o estudo ressalta que a ausência de diferenças significativas entre o sistema silvipastoril (SSP) e a pastagem aberta pode ser reflexo da pouca idade do sistema analisado (quatro anos) e projeta-se que com o amadurecimento das árvores e aumento do carbono orgânico os núcleos arbóreos podem apresentam uma redução futura nos valores de densidade. Em suma, comprovou-se que a introdução de sombra nos pastos não causa compactação edáfica por pisoteio animal (BATTISTI et. al., 2020). Por outro lado, a inserção de árvores nas áreas de produção pecuária, por ocasionar sombreamento, é apontada como importante fator para a termorregulação dos bovinos em climas tropicais, e a um só tempo, um fator de melhoria das condições microclimática. O sombreamento arbóreo protege os animais da radiação solar direta e ameniza condições de estresse térmico, defende Sousa et. al (2022).

Quanto à agregação do solo, Battisti et. al (2020) conclui que, o valor de Diâmetro Médio Geométrico (DMG) nos tratamentos integrados são maiores do que nas pastagens convencionais, de forma que o sistema silvipastoril garante a formação de agregados maiores e mais estáveis, pois as raízes fasciculadas das gramíneas (densas e bem distribuídas no modelo SSP) favorecem esse processo de agregação (BATTISTI et. al, 2020). Nesse sentido, há um consenso entre os artigos analisados em torno da presença arbórea em pastagens, em geral, agregar benefícios físicos e estruturais ao solo, aproximando o ambiente edáfico de estados naturais. Silva, Silva, Almeida (2023), acerca disso evidenciam:

> Características físicas de solo em sistema silvipastoril, como densidade, resistência à penetração e porosidade total podem tornar-se similares à floresta natural, possibilitando melhorias em importantes parâmetros produtivos, como armazenamento de água e desenvolvimento de raízes. Logo, a arborização das pastagens, além de beneficiar o sistema de forma direta através da deposição de serapilheira, proporcionam mudanças nas características edafoclimáticas e ambientais que, juntamente com o uso racional, podem resultar em sustentabilidade na produção. (SILVA; SILVA; ALMEIDA, 2023, p. 17)

Embora a química do solo seja corroborada por índices de produtividade e a física por métricas de resistência e porosidade, a biologia do solo em sistemas silvipastoris é, ainda, frequentemente debatida de forma qualitativa, carecendo de uma base científica e numérica igualmente robusta nos estudos atuais. Enquanto autores como Iori et al. (2012) e Limberger et al. (2020) discorrem com precisão os dados sobre mecânica e hidrodinâmica edáfica, a dimensão biológica é usualmente resumida à "atividade microbiana" genérica. Dessa forma, a ausência de indicadores quantitativos como a respiração basal do solo (RBS), o quociente metabólico (qCO2) ou a contagem de unidades formadoras de colônias (UFC), cria uma lacuna na modelagem da capacidade de autodepuração do sistema para a Engenharia Ambiental. Logo, é imprescindível que a pesquisa avance na mensuração da biomassa microbiana e da mesofauna, equiparando os indícios de vida em um dado de projeto tão rigoroso quanto os demais fatores que apontam a qualidade do solo.

Essa predominância de qualidades físico-químicas favoráveis permite inferir, tecnicamente, que a qualidade estrutural, hídrica e composicional, atua como um catalisador para a restauração biológica, ainda que a quantificação direta desses microrganismos permaneça oculta. Essa configuração atesta que a integridade dos demais fatores funcione como um indicador de suporte de alta confiabilidade, pois assegura-se a viabilidade do habitat para que a microbiota desempenhe suas funções de ciclagem, uma vez garantida a infraestrutura e o aporte de carbono orgânico necessários (BRASIL NETO et al., 2008). Tal visão conecta a recuperação das funções ecossistêmicas à tomada de decisão cautelosa quanto à exploração sustentável, pois utiliza o reestabelecimento das características gerais do solo, como uma garantia de que a manutenção e regeneração biológica é possível. Da maneira que evidencia Castro et al. (2008) em estudos de microbacia, é pela restauração estrutural que se permite equilibrar a atividade de microrganismos e reverter estados de degradação. Assim, a recomendação do SSP deixa de ser uma aposta em dados ocultos para se tornar uma estratégia fundamentada na criação de um ambiente edáfico estruturado, capaz de sustentar a segurança ambiental e a estabilidade sistêmica de longo prazo.

Outra questão relevante quando se pensa nos impactos da qualidade do solo nos sistemas de integração pasto-lavoura é esta: de que forma é afetado o pasto? A fim de responder essa pergunta, Sousa et. al. (2022) destaca “como uma estratégia o capim-braquiária (Brachiaria decumbens), sombreado pelos componentes arbóreos, alonga colmo e folhas (estiolamento), a fim de aumentar a exposição à radiação solar” (SOUSA et. al, 2022), bem como outras espécies de componentes forrageiros em condições de restrição luminosa também desenvolvem mecanismos de adaptação.

Em convergência com esses resultados, Favare et al. (2018), concluiu que o sombreamento em sistema silvipastoril condicionado por pequizeiros (*Caryocar brasiliense*) com mais de trinta anos de idade aumentou a fertilidade do solo e a produtividade da matéria seca em Cáceres (MT). No final da estação seca, as gramíneas da forragem apresentaram um crescimento significativamente superior na sombra do que em pleno sol, devido à sua resposta adaptativa. Além disso, houve um aumento na proporção de lâmina foliar. Favare et. al (2018) apresenta que o sombreamento reduziu o material morto no solo, atribuindo longevidade ao pasto e aumentou a capacidade de suporte do sistema (capacidade de suporte sombreada de 4,86 UA/ha em detrimento de 4,26 UA/ha em pleno sol).

Porém, essa restrição de luz não pode atingir níveis críticos, a ponto de prejudicar o desenvolvimento da forragem, por isso é crucial conhecer os níveis toleráveis de sombreamento para promover o manejo correto, entendendo que as práticas silvipastoris pressupõe o equilíbrio entre os componentes envolvidos (SOUSA et. al, 2022). Os estudos ressaltaram que a viabilidade do sistema silvipastoril depende de ajustes técnicos corretos.Outro estudo de impacto do sombreamento arbóreo (nessa ocasião, da espécie *Grevillea robusta*) na produtividade pecuária foi realizado no estado do Paraná. Esse, por sua vez, também concluiu por impactos positivos na forragem, beneficiando a ciclagem edáfica de nutrientes. O crescimento da serapilheira foi significativamente maior próximo às árvores, favorecendo o estoque de carbono no sistema. Assim, a disponibilidade de matéria seca foi favorecida pela Grevílea, principalmente no verão, quando a produção sombreada foi maior do que a produção a pleno sol. No inverno, a produção caiu, mas continuou sendo maior próximo das árvores.

Assim, ao passo que o aumento nos teores de nitrogênio (N) e potássio (K) foi promovido pela presença das árvores, o artigo destaca que a serapilheira da Grevílea otimiza o desenvolvimento da pastagem, melhorando seu valor proteico e mineral. O estudo realizado por Maia et. al (2006) no semiárido cearense evidenciou resultados similares em relação ao aumento do potencial de ciclagem de nutrientes no solo em sistemas de integração de culturas, recomendando o tratamento silvipastoril para manutenção da qualidade do solo no semiárido.

Outrossim, é relevante investigar parâmetros biofísicos de diferentes usos do solo para compreender a interação entre a qualidade do solo e a produção pecuária. Silva et. al. (2015) realizou essa investigação com dados de radiação indicados por satélite e temperatura radiométrica estimados por algoritmo no sudoeste da Amazônia brasileira, partindo da premissa que “processos radiativos na superfície interferem na redistribuição de umidade e calor no solo e na atmosfera que, por sua vez, afetam o comportamento do tempo, clima e biosfera na Terra” (SILVA et. al, 2015). Os resultados demonstraram que o saldo de radiação, que foi maior na floresta, em seguida no sistema silvipastoril e menor na pastagem convencional. Isso indica que sistemas com árvores preservam melhor as características biofísicas originais do solo, pois a cobertura vegetal retém energia, regulando a temperatura de todo sistema, influenciando processos de evapotranspiração, aquecimento do ar e do solo e o clima. (SILVA et. al, 2015).

No âmbito da mecânica dos solos agrícolas, o Sistema Silvipastoril (SSP) oferece uma sustentabilidade estrutural superior ao de outros sistemas, e sua vantagem é medida por meio da pressão de preconsolidação (σp), que define a tensão crítica suficiente para desencadear a compactação irreversível. Iori et al (2012) demonstraram que, a implementação do SSP em Cambissolos e Argissolos oferece capacidade superior de carga, o que mantém as funções físicas do solo, em relação às pastagens degradadas, que apresentam níveis críticos de resistência. Esse estudo aponta que, enquanto o SSP atua como um modelo de transição conservacionista, por apresentar resultados que validam o nível ideal de pressão de preconsolidação é atingido em sistemas agroflorestais, o manejo convencional frequentemente ultrapassa o limite crítico para resistência mecânica de 2,0 a 2,5 MPa. Dessa maneira, o desenvolvimento de uma “memória mecânica”, proporcionada pela integração arbórea, permite que o solo suporte o pisoteio constante do gado, não atingindo o estado de compactação total, mantendo a macroporosidade e a taxa de infiltração de água essenciais para a saúde ambiental das bacias.

Uma vez que frequentemente há discussões acerca da competição por recursos que possa haver entre árvores e forrageiras, com premissas voltadas geralmente ao desempenho lucrativo, a viabilidade hidrológica é posta em prova. No entanto, Limberger et al. (2020) apresentam evidências de que a reforma de monocultivos de pastagem para SSPs em solos arenosos não prejudica a disponibilidade de água. Em contraponto, o estudo infere que o sistema manteve níveis de umidade estáveis ou

superiores, adequados em até 1 metro abaixo da superfície. Como mencionado anteriormente, sobre a redução da evapotranspiração, os dados quantitativos de Limberger corroboram que o consumo das árvores é compensado pela barreira térmica da copa, mantendo índices de presença de água adequados em distâncias de até 1,5 metros do tronco. Para a Engenharia Ambiental, isso posiciona o SSP como potencial solução de infraestrutura verde, favorecendo a reposição de reservas subterrâneas e resiliência contra estiagens.

Conforme referenciado anteriormente, a melhoria nos teores de carbono e na agregação no solo reflete-se na capacidade do sistema atual como um filtro sanitário para a bacia. Brasil Neto et al. (2018) conectam esse aporte de matéria orgânica a um aumento na porosidade total e na macroporosidade de Latossolos. Essa reestruturação física possibilita o funcionamento de um sistema de tratamento de poluentes difusos naturalmente, pois na prática no sanitarismo, a considerável taxa de infiltração reduz o escoamento superficial e, conforme elucidado por Nogueira et al. (2008), retém sedimentos e nutrientes que poderiam acarretar a eutrofização de corpos hídricos. Dessa maneira, o Sistema Silvipastoril protege ativamente a qualidade da água em escala regional.

Considerações Finais

Portanto, a compilação de resultados científicos de experimentos que se voltaram ao estudo das interações e influências do solo no contexto de sistema silvipastoril de manejo demonstraram, em consenso, que o sistema silvipastoril é eficiente ao papel de preservação ambiental, controle da erosão e aumento da produtividade pecuária. Em suma, a implementação de formas de manejo ecológico de pastagens promove o uso eficiente da pastagem, a manutenção das espécies forrageiras, a manutenção do equilíbrio dos cursos de água, controle da erosão edáfica e o aumento da produção dos rebanhos pecuários (PRIMAVESI, 2019). Tais interações entre os sistemas integrados de pastagem-rebanho não apenas potencializam a produtividade de biomassa por meio da plasticidade adaptativa das plantas, mas também asseguram a viabilidade econômica e a preservação de dinâmicas ecossistêmicas essenciais.

Embora os resultados analisados evidenciem, consistentemente, a eficácia dos sistemas silvipastoris na melhoria dos indicadores de qualidade do solo e na mitigação dos impactos associados à pecuária intensiva, é válido considerar as potenciais limitações inerentes à coletânea de estudos avaliados. Desse modo, observa-se a predominância de abordagens centradas nos atributos físicos e químicos do solo, em detrimento de análises mais robustas na dimensão biológica, o que pode restringir a compreensão integrada dos processos edáficos. Adjacente a isso, a heterogeneidade metodológica entre os trabalhos, aliada às singularidades edafoclimáticas e dos estágios de implantação dos SSPs, impõem restrições à generalização dos resultados. Ainda assim, tais limitações não comprometem a robustez das evidências aduzidas, mas indicam a necessidade de maior padronização metodológica. Nesse sentido, o sistema silvipastoril torna-se uma alternativa tecnicamente consistente e ambientalmente sustentável, cujo aprimoramento depende do avanço de pesquisas que incorporem indicadores mais abrangentes.

Referências Bibliográficas

BATTISTI, L. F. Z. et al. Atributos físicos do solo em um sistema silvipastoril com núcleos arbóreos no estado de Santa Catarina. **Holos**, Natal, ano 36, v. 6, e9473, p. 1-16, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.15628/holos.2020.9473. Acesso em: 4 mar. 2026.

BRASIL NETO, Alberto Bentes et al. Matéria orgânica e atributos físico-hídricos de um latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Agroecossistemas**, Belém, v. 10, n. 2, p. 147-164, 2018. Disponível em: https://dx.doi.org/10.18542/ragros.v10i2.5134. Acesso em: 4 mar. 2026.

CASTRO, Anderson Corrêa et al. Sistema silvipastoril na Amazônia: ferramenta para elevar o desempenho produtivo de búfalos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 8, p. 2395-2402, nov. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000800050. Acesso em: 4 mar. 2026.

DALPOSSO, David Marlon et al. Qualidade física do solo sob sistema silvipastoril com *Peltophorum dubium* e *Panicum maximum* cv. *Aruana*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 40, e201801645, p. 1–8, mai. 2020. Disponível em: https://dx.doi.org/10.4336/2020.pfb.40e201801645. Acesso em: 4 mar. 2026.

FAVARE, H. G. de et al. Desempenho de forrageiras em sistema silvipastoril com *Caryocar brasiliense* Camb. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v. 27, n. 3, p. 340-353, jul. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.32929/2446-8355.2018v27n3p340-353. Acesso em: 4 mar. 2026.

FREITAS, I. C. de et al. Estratégias para incremento de carbono e retorno econômico em áreas de sequeiro com sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no semiárido. **Research, Society and Development**, s. l., v. 10, n. 7, e48710716769, jun. 2021. Disponível em: https://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16769. Acesso em: 4 mar. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Pecuária Municipal.** Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html. Acesso em: 4 mar. 2026.

IORI, Pietro et al. Pressão de preconsolidação como ferramenta de sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1448-1456, set./out. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500008. Acesso em: 4 mar. 2026.

IORI, Pietro; DIAS JÚNIOR, Moacir de Souza; SILVA, Reginaldo Barboza da. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente**. Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, supl. 1, p. 185-195, mar. 2012. Disponível em: https://hdl.handle.net/11449/109. Acesso em: 4 mar. 2026.

LIMBERGER, Erni et al. Umidade e água disponível no solo em monocultivo de pastagem e sistema silvipastoril com fileiras duplas de eucalipto. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 16, n. 3, p. 104-114, maio/jun. 2020. Disponível em: https://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view.3219. Acesso em: 4 mar. 2026.

LUKE, E.; PESSOA JR., M. G.; YAMASHITA, O. M.; TAVARES, A. T.; OLIVAL, A. A. Sistemas silvipastoris como ferramenta na recuperação de pastagens degradadas: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação,** v. 10, p. e025009, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.18554/rbcti.v10i00.8611. Acesso em: 15 mar. 2026.

MAIA, S. M. F. et al. Frações de nitrogênio em Luvissolo sob sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 381-392, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100036. Acesso em: 4 mar. 2026.

MAIA, S. M. F. et al. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 837-848, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000500018. Acesso em: 4 mar. 2026.

NOGUEIRA, R. da S. et al. Formas de fósforo em Luvissolo Crómico Órtico sob sistemas agroflorestais no município de Sobral-CE. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 4, p. 494-502, out./dez. 2008. Disponível em: https://periodicos.ufc.br/revistacienciaagronomica/article/view/83899. Acesso em: 4 mar. 2026.

NOGUEIRA, R. da S. et al. Redistribuição de carbono orgânico e fósforo pelo escoamento superficial em sistemas agrícolas convencionais e agroflorestais no semi-árido cearense. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 55, n. 4, p. 327-337, jul./ago. 2008. Disponível em: https://ojs.ceres.ufv.br/ceres/article/view/3338. Acesso em: 4 mar. 2026.

PETROSINO, Mariana Arnaldi. **Sistema silvipastoril como alternativa para a bovinocultura leiteira no Brasil:** uma revisão de literatura. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Medicina Veterinária) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, 2025. Disponível em: https://hdl.handle.net/11449/315638. Acesso em: 4 mar. 2026.

PEZZONI, T. et al. Influência de *Pterodon emarginatus* Vogel sobre atributos físicos e químicos do solo e valor nutritivo de *Brachiaria decumbens* Stapf em sistema silvipastoril. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 293-301, abr./jun. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000200014. Acesso em: 4 mar. 2026.

PRIMAVESI, Ana. **Cartilha da Terra.** São Paulo: Expressão Popular, 2020.

PRIMAVESI, Ana. **Manejo ecológico de pastagens em regiões tropicais e subtropicais.** São Paulo: Expressão Popular, 2019.

RADOMSKI, M. I.; RIBASKI, J. Fertilidade do solo e produtividade da pastagem em sistema silvipastoril com *Grevillea robusta*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 53-61, jan./mar. 2012. Disponível em: https://pfb.sede.embrapa.br/pfb/article/view/280. Acesso em: 4 mar. 2026.

SARTOR, Laércio Ricardo et al. Resistência mecânica do solo à penetração em sistema silvipastoril após onze anos de implantação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 231-241, jan./mar. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.5902/1980509831205. Acesso em: 4 mar. 2026.

SILVA, A. de A. et al. Impacto socioambiental da implantação de sistema silvipastoril em propriedades familiares em Rondônia. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, s. l., v. 6, n. 3, p. 469-489, jul./dez. 2014. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1003505. Acesso em: 4 mar. 2026.

SILVA, L. C. et al. Estimativa do balanço de radiação por sensoriamento remoto de diferentes usos de solo no sudoeste da Amazônia brasileira. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 341-356, maio/ago. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1982-451320160109. Acesso em: 4 mar. 2026.

SILVA, L. V. da; SILVA, I. N. da; ALMEIDA, J. C. de C. Análise da dinâmica de serapilheira em sistema silvipastoril com eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 33, n. 2, e71450, p. 1-20, abr./jun. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.5902/1980509871450. Acesso em: 4 mar. 2026.

SOUSA, A. P. W. P.; SOUSA, A. W. P. P. Comportamento do componente forrageiro e conforto térmico em sistema silvipastoril. **Scientific Electronic Archives**, s. l., v. 15, n. 11, p. 70-77, nov. 2022. Disponível em: https://scientificelectronicarchives.org/index.php/SEA/article/view/1619. Acesso em: 4 mar. 2026.

ADOÇÃO DE PRÁTICAS AGRÍCOLAS SUSTENTÁVEIS POR MULHERES EM ASSENTAMENTOS DE REFORMA AGRÁRIA

1 Roseli Azambuja Barbosa, 2 João Augusto Rossi Borges, 3 Anderson Carlos dos Santos Barbosa
1Universidade Federal da Grande Dourados, e-mail: azambujaroseli@gmail.com; 2Universidade Federal da Grande Dourados, e-mail: joaoborges@ufgd.edu.br; 3Universidade Federal da Grande Dourados, e-mail: andersonbarbosa@ufgd.edu.br

Palavras-chave: Agricultura sustentável; Agricultura familiar; Mulheres agricultoras.

Resumo

A adoção de práticas agrícolas sustentáveis tem sido amplamente discutida como estratégia para promover sistemas produtivos mais resilientes, eficientes e ambientalmente equilibrados, especialmente em contextos de agricultura familiar. Este estudo teve como objetivo investigar as práticas agrícolas sustentáveis mais adotadas em pequenas propriedades rurais em assentamentos de reforma agrária, bem como analisar o nível de adoção dessas práticas. A pesquisa foi realizada nos municípios de Dourados e Ponta Porã, no estado de Mato Grosso do Sul, entre agosto de 2025 e março de 2026, envolvendo 114 mulheres agricultoras. Os dados foram coletados por meio de questionário estruturado, composto por variáveis demográficas e uma lista de práticas agrícolas sustentáveis, com respostas dicotômicas (sim/não). A análise foi realizada por meio de estatística descritiva, incluindo a construção de um índice de adoção de práticas. Os resultados indicaram média de quatro práticas adotadas por domicílio, com variação entre uma e dez práticas. As práticas mais frequentes foram rotação de culturas (88%) e plantio direto (68%). Em contrapartida, práticas como integração lavoura-pecuária-floresta (2%), captação de água da chuva (6%) e agroecologia (15%) apresentaram baixa adoção. Observou-se predominância de práticas de manejo convencionais e intermediárias, enquanto práticas mais integradas e sistêmicas ainda são pouco difundidas. Conclui-se que a adoção de práticas sustentáveis ainda ocorre de forma parcial e heterogênea, sendo influenciada por fatores técnicos, econômicos e estruturais, reforçando a necessidade de políticas públicas voltadas ao fortalecimento da agricultura familiar sustentável.

Introdução

As práticas agrícolas sustentáveis podem ser compreendidas como estratégias produtivas que buscam conciliar produtividade, conservação dos recursos naturais e resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas (Pretty, 2008). Essas práticas incluem manejo conservacionista do solo e da água, uso eficiente de insumos e incorporação de tecnologias inovadoras, visando promover simultaneamente sustentabilidade ambiental e segurança alimentar (FAO, 2013). Nesse contexto, tais sistemas desempenham papel central na transição de modelos agrícolas convencionais para sistemas agroalimentares mais resilientes e sustentáveis (HLPE, 2019; Rockström et al., 2017).

A relevância dessas práticas é reforçada pelo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 2 (ODS 2), que busca erradicar a fome, melhorar a nutrição e promover sistemas agrícolas sustentáveis (FAO, 2014). Para isso, são necessárias abordagens que integrem processos ecológicos, reduzam a dependência de insumos externos e valorizem o conhecimento local dos agricultores. Nesse contexto, a agricultura familiar desempenha papel central na produção de alimentos e na promoção da segurança alimentar em diversos países (FAO, 2019). Em muitas regiões rurais, as mulheres assumem papel fundamental nas atividades agrícolas e na gestão da alimentação familiar, participando do cultivo, processamento de alimentos, criação de animais e organização da dieta do domicílio (Alkire et al., 2013; Haug et al., 2021; Perelli et al., 2024; FAO, 2022).

Apesar dessa contribuição, o trabalho das mulheres rurais ainda é frequentemente subvalorizado e invisibilizado nas estatísticas agrícolas e nos processos de tomada de decisão, refletindo limitações no acesso a recursos produtivos, crédito, assistência técnica e mercados (Ogunlela e Mukhtar, 2009; FAO, 2019). Essas restrições podem influenciar diretamente a adoção de práticas agrícolas inovadoras e sustentáveis, reduzindo o potencial produtivo das propriedades e os benefícios socioambientais associados à agricultura familiar (Holland e Rammohan, 2019; Santalucia e Sibhatu, 2023; Perelli et al., 2024).

Diante desse cenário, a incorporação da perspectiva de gênero na análise dos sistemas produtivos rurais torna-se fundamental para compreender as dinâmicas da agricultura familiar e subsidiar estratégias de desenvolvimento rural sustentável mais inclusivas. Assim, o presente estudo tem como objetivo geral investigar as práticas agrícolas sustentáveis mais adotadas em pequenas propriedades rurais conduzidas por mulheres em assentamentos de reforma agrária. Especificamente, busca-se identificar o perfil demográfico das mulheres agricultoras participantes, descrever o nível de adoção de práticas agrícolas sustentáveis nas propriedades analisadas, identificar as práticas mais e menos adotadas, bem como analisar a heterogeneidade no padrão de adoção dessas práticas entre os domicílios estudados.

Referencial Teórico

A avaliação da adoção e dos impactos das práticas agrícolas sustentáveis envolve diferentes métricas e indicadores, incluindo produtividade agrícola, diversidade produtiva, uso de insumos, conservação do solo e da água, balanço de carbono e impactos socioeconômicos (Pretty, 2008; Kassie et al., 2013; Santalucia e Sibhatu, 2023). Estudos têm combinado indicadores agrícolas e socioeconômicos para analisar a relação entre essas práticas e a segurança alimentar, considerando aspectos como acesso à alimentação, diversidade alimentar e renda familiar (Domènech, 2015; Kerr et al., 2021).

No que se refere aos métodos de mensuração, destacam-se abordagens multidimensionais que consideram diferentes aspectos do sistema produtivo. A produtividade e a diversificação agrícola são avaliadas pela quantidade e variedade de culturas produzidas, sistemas de produção diversificados e rotação de culturas. A dimensão ambiental inclui indicadores relacionados à fertilidade do solo, uso sustentável da água e redução de insumos químicos. Já os impactos socioeconômicos abrangem a renda agrícola, a segurança alimentar dos domicílios e a participação de grupos vulneráveis na tomada de decisão (Darkwah et al., 2019; Perelli et al., 2024).

Além disso, a resiliência climática é analisada a partir da adoção de práticas de Agricultura Inteligente para o Clima (CSA) e da capacidade de mitigação de eventos climáticos extremos (Santalucia e Sibhatu, 2023; Liang et al., 2021). Evidências empíricas indicam que a adoção dessas práticas gera benefícios significativos, incluindo aumento da produtividade, melhoria da segurança alimentar, fortalecimento da resiliência climática e ganhos ambientais e socioeconômicos (Darkwah et al., 2019; Liang et al., 2021; Perelli et al., 2024; Rashidi et al., 2024).

No âmbito produtivo, estudos demonstram que essas práticas contribuem para o aumento da eficiência dos sistemas agrícolas, sendo esse efeito influenciado por fatores como conhecimento técnico, percepção de risco climático e acesso a instituições (Liang et al., 2021; Darkwah et al., 2019; Rashidi et al., 2024). Em termos ambientais, destacam-se a redução do uso de pesticidas, a melhoria do balanço de carbono, a conservação dos recursos hídricos e o aumento da fertilidade do solo (Pretty, 2008; Foguesatto et al., 2019; Maharjan et al., 2022).

Apesar desses benefícios, a literatura aponta diversas barreiras à adoção, como limitações no acesso à informação e à assistência técnica, restrições financeiras, escassez de mão de obra e desigualdades estruturais (Teklu et al., 2023; Rashidi et al., 2024; Perelli et al., 2024). Fatores como distância aos mercados e riscos produtivos também podem dificultar a adoção dessas práticas (Rodríguez-Barillas et al., 2024; Darkwah et al., 2019).

Dessa forma, evidencia-se que a adoção de práticas agrícolas sustentáveis está condicionada a um conjunto complexo de fatores, reforçando a necessidade de políticas públicas que promovam acesso a crédito, assistência técnica, informação e mercados. Ademais, destaca-se a importância de ampliar evidências empíricas, especialmente no que se refere aos impactos sobre a segurança e a diversidade alimentar.

Material e Métodos

A pesquisa foi conduzida em assentamentos de reforma agrária localizados nos municípios de Dourados e Ponta Porã, na região sul do estado de Mato Grosso do Sul. A escolha dessas localidades justifica-se pela relevância da agricultura familiar e pela presença expressiva de pequenas propriedades rurais, caracterizadas pela diversificação produtiva e forte dependência dos recursos naturais. O estudo possui abordagem quantitativa, com caráter descritivo e exploratório, tendo como objetivo investigar as práticas agrícolas sustentáveis mais adotadas em pequenas propriedades rurais.

A coleta de dados foi realizada por meio da aplicação de um questionário estruturado junto a 114 mulheres agricultoras residentes nos assentamentos estudados. O instrumento foi composto por duas seções principais: (i) um módulo de caracterização demográfica e socioeconômica das participantes, incluindo informações como idade, escolaridade, tamanho da propriedade e fontes de renda; e (ii) uma lista de práticas agrícolas sustentáveis, na qual as respondentes indicaram as práticas adotadas em seus sistemas produtivos, tais como manejo do solo, conservação da água, diversificação de culturas e uso de insumos.

Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva, com o objetivo de identificar a frequência de adoção das diferentes práticas agrícolas sustentáveis, bem como traçar o perfil das participantes. As práticas foram analisadas considerando diferentes dimensões, incluindo aspectos produtivos, ambientais e socioeconômicos.

Resultados e Discussão

As análises descritivas foram conduzidas com o objetivo de caracterizar a amostra e as principais variáveis do estudo. Inicialmente, apresentam-se os dados demográficos das participantes, seguidos pelos padrões de adoção de práticas agrícolas sustentáveis nas propriedades investigadas. A Tabela 1 apresenta o perfil demográfico das participantes do estudo. As variáveis foram organizadas de forma a facilitar a visualização das tendências e destacar características relevantes da agricultura familiar nas regiões analisadas.

Variável	n	(%)	Média +/-DP	Mín-Máx
Idade (anos)	-	-	52 ± 13	20-78
Estado civil*				
Com companheiro	93	82%	-	-
Sem companheiro	21	18%	-	-
Escolaridade**				
Sem instrução / fundamental incompleto	55	48%	-	-
Fundamental completo / médio incompleto	22	19%	-	-
Médio completo / superior incompleto	30	26%	-	-
Superior completo	7	6%	-	-
Pós-graduação	0	0%	-	-
Composição familiar				
Nº de pessoas < 18 anos	-	-	1 ± 1	0-7
Nº de pessoas ≥ 18 anos	-	-	2 ± 1	1-5
Área da propriedade (hectares)	-	-	17 ± 7	4-30
Tipo de produção				
Grãos	102	89%	-	-
Agropecuários	73	64%	-	-
Leite e derivados	41	36%	-	-
Destino da produção				
Consumo	4	4%	-	-
Venda	39	34%	-	-
Ambos	71	62%	-	-
Posse da terra			-	-
Proprietária	49	43%	-	-
Coproprietária	65	57%	-	-
Distribuição geográfica				
Amparo	31	27%	-	-
Lagoa Grande	39	34%	-	-
Itamarati	44	39%	-	-

Tabela 1 - Perfil demográfico das participantes do estudo.

Nota: DP = desvio padrão; "–" = não aplicável. Valores expressos em frequência absoluta e relativa (%), calculados com base no total de participantes (n = 114).

*A variável estado civil foi categorizada em dois grupos para melhorar a clareza na apresentação dos dados. Com companheiro = casada ou união estável; sem companheiro = solteira, divorciada ou viúva.

**A classificação dos níveis de escolaridade segue os critérios estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A Tabela 1 apresenta um perfil da amostra formado majoritariamente por mulheres em idade adulta, inseridas em contextos familiares e produtivos. A idade média foi de 52 anos, com ampla variação entre as participantes, indicando a presença de diferentes faixas etárias no grupo estudado. Quanto ao estado civil, a maioria das participantes vive com companheiro, o que sugere predominância de arranjos familiares estáveis. Em relação à escolaridade, sobressai a baixa escolarização, com quase metade das participantes sem instrução ou com ensino fundamental incompleto. Já a composição familiar revela domicílios formados, em média, por dois adultos e uma criança ou adolescente, com variação entre as unidades, especialmente no número de menores de 18 anos.

No que se refere às atividades produtivas, destaca-se a produção de grãos como a mais frequente, seguida pelos sistemas agropecuários e pela produção de leite, configurando uma base produtiva predominantemente agrícola, com diversidade de sistemas nos domicílios analisados. Quanto ao destino da produção, a maior parte dos domicílios combina consumo próprio e comercialização, enquanto uma parcela menor produz exclusivamente para o autoconsumo. No que diz respeito às condições de acesso à terra, observa-se leve predominância de coproprietárias em relação às proprietárias, sugerindo formas compartilhadas de acesso entre as participantes. Por fim, a distribuição geográfica da amostra evidencia participação relativamente equilibrada entre os três assentamentos, com maior concentração no Itamarati, seguido de Lagoa Grande e Amparo.

A adoção de práticas agrícolas sustentáveis foi avaliada a partir de 13 práticas previamente validadas para o contexto do estudo. Essas práticas abrangem diferentes estratégias associadas a distintas dimensões da sustentabilidade. A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas do índice de adoção, calculado com base no número de práticas implementadas em cada domicílio.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas do índice de adoção de práticas agrícolas.

Estatística	Valor
Média do índice	4
Mediana	5
Mínimo	1
Máximo	10
Desvio-Padrão	2

Nota: Valores calculados com base no total de domicílios participantes (n = 114). O índice reflete a implementação de técnicas voltadas à sustentabilidade ambiental, social e econômica.

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam um nível intermediário de adoção de práticas agrícolas sustentáveis entre os domicílios analisados, com média de quatro práticas por unidade produtiva. Esse padrão sugere que, embora haja incorporação de técnicas associadas à sustentabilidade, essa adoção ainda ocorre de forma parcial, não configurando sistemas produtivos plenamente integrados.

Essa heterogeneidade pode ser explicada por limitações estruturais frequentemente observadas em contextos de agricultura familiar, como restrições de acesso à assistência técnica, crédito rural e tecnologias apropriadas. Além disso, a adoção parcial pode refletir estratégias de redução de risco por parte das agricultoras, que tendem a incorporar gradualmente práticas novas sem comprometer a estabilidade produtiva do domicílio. Esse comportamento é consistente com a literatura, que aponta a adoção incremental como característica comum em sistemas agrícolas de pequena escala.

Para um maior detalhamento dessa distribuição, a Tabela 3 apresenta a proporção de domicílios que adotaram cada prática agrícola, evidenciando diferenças no nível de implementação entre as técnicas avaliadas.

Tabela 3 - Proporção de domicílios que adotaram cada prática agrícola.

Práticas agrícolas	n	(%)
Rotação de culturas	100	88%
Plantio direto e manejo integrado do solo	78	68%
Uso de esterco de origem animal para adubação	76	67%
Diversificação de culturas	61	54%
Conservação do solo	55	48%
Manejo integrado de pragas e doenças	45	39%
Produção orgânica	35	31%
Sistema agroflorestal (SAF)	35	31%
Compostagem e uso de resíduos orgânicos	31	27%
Energias renováveis	27	24%
Agroecologia	17	15%
Captura e armazenamento de água da chuva	7	6%
Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)	2	2%

Nota: Valores expressos em frequência absoluta (n) e relativa (%), calculados com base no total de domicílios participantes (n = 114). Cada prática foi codificada como 0 = não adotada e 1 = adotada.

De acordo com a Tabela 3, observa-se maior frequência de adoção das práticas relacionadas à rotação de culturas, ao plantio direto e manejo integrado do solo e ao uso de esterco de origem animal para adubação, seguidas pela diversificação de culturas e conservação do solo. Em contrapartida, as menores frequências estão associadas à integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e a captura e armazenamento de água da chuva, além da baixa adoção de práticas como agroecologia, energias renováveis e compostagem, indicando variação no nível de incorporação das práticas agrícolas entre os domicílios analisados.

A maior adoção de práticas como rotação de culturas, plantio direto e uso de esterco de origem animal pode estar associada ao fato de essas técnicas já estarem consolidadas no contexto produtivo da agricultura familiar, sendo amplamente difundidas por políticas públicas e programas de extensão rural. Além disso, essas práticas demandam menor investimento financeiro e apresentam retorno produtivo mais imediato, o que favorece sua incorporação por agricultores com restrições de recursos. Outro aspecto relevante é que tais práticas podem ser implementadas de forma relativamente independente, sem a necessidade de mudanças estruturais profundas no sistema produtivo, o que reduz barreiras à adoção.

Em contrapartida, a baixa adoção de práticas como integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), captação de água da chuva e agroecologia indica a presença de barreiras mais complexas à implementação de sistemas produtivos sustentáveis de caráter integrado. Essas práticas, em geral, exigem maior nível de conhecimento técnico, planejamento de longo prazo e, em muitos casos, investimentos iniciais mais elevados.

Além disso, a implementação dessas estratégias depende frequentemente de apoio institucional, acesso à assistência técnica especializada e condições estruturais adequadas, fatores que nem sempre estão disponíveis em assentamentos de reforma agrária. A baixa adoção também pode refletir limitações no acesso à informação e à capacitação, especialmente entre mulheres agricultoras, que historicamente enfrentam desigualdades no acesso a recursos produtivos.

A análise dos resultados sob a perspectiva de gênero sugere que as desigualdades no acesso a recursos produtivos podem influenciar diretamente o padrão de adoção observado. Mulheres agricultoras, embora desempenhem papel central nos sistemas produtivos e na segurança alimentar, frequentemente enfrentam maiores restrições no acesso à terra, crédito, assistência técnica e processos de tomada de decisão.

Essas limitações podem restringir a adoção de práticas mais complexas e intensivas em conhecimento, contribuindo para a predominância de técnicas mais tradicionais ou de menor custo. Assim, os resultados reforçam a importância de políticas públicas sensíveis à dimensão de gênero, que promovam maior equidade no acesso a recursos e ampliem a capacidade de adoção de práticas sustentáveis.

De forma geral, os resultados indicam que a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis ainda se encontra em estágio intermediário nos assentamentos analisados. Observa-se a coexistência de práticas convencionais, intermediárias e sustentáveis, configurando um processo gradual e heterogêneo de mudança nos sistemas produtivos. Esse cenário evidencia que a adoção de práticas agrícolas sustentáveis não ocorre de maneira isolada, mas está condicionada a um conjunto de fatores técnicos, econômicos e institucionais, reforçando a necessidade de estratégias integradas de desenvolvimento rural.

Considerações Finais

Os resultados deste estudo evidenciam que a adoção de práticas agrícolas sustentáveis em pequenas propriedades rurais conduzidas por mulheres em assentamentos de reforma agrária ocorre de forma parcial, heterogênea e predominantemente baseada em práticas já consolidadas nos sistemas produtivos. Observou-se maior frequência de adoção de técnicas como rotação de culturas, plantio direto e uso de esterco de origem animal, enquanto práticas mais integradas e complexas, como sistemas agroflorestais, integração lavoura-pecuária-floresta e captação de água da chuva, ainda apresentam baixa incorporação.

Esse padrão sugere que a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis ocorre de maneira gradual, sendo influenciada por fatores estruturais, econômicos e institucionais. Práticas de menor custo, menor complexidade técnica e retorno mais imediato tendem a ser priorizadas, enquanto estratégias que exigem maior investimento, planejamento de longo prazo e acesso a conhecimento especializado enfrentam maiores barreiras à adoção.

Adicionalmente, a análise sob a perspectiva de gênero indica que as desigualdades no acesso a recursos produtivos, assistência técnica e espaços de decisão podem limitar a capacidade das mulheres agricultoras de adotar práticas mais complexas e inovadoras. Nesse sentido, os resultados reforçam a importância de incorporar a dimensão de gênero na formulação de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento rural sustentável.

Dessa forma, destaca-se a necessidade de fortalecimento de políticas e programas de extensão rural que promovam não apenas a difusão de tecnologias sustentáveis, mas também o acesso equitativo a recursos produtivos, capacitação técnica e apoio institucional, especialmente em contextos de agricultura familiar em assentamentos.

Por fim, este estudo contribui ao evidenciar padrões de adoção de práticas agrícolas sustentáveis em um grupo ainda pouco explorado na literatura, ressaltando a importância de abordagens mais inclusivas e integradas. Como limitação, destaca-se o uso de análise descritiva, sugerindo-se que pesquisas futuras avancem na investigação dos fatores determinantes da adoção dessas práticas, por meio de análises inferenciais e modelos explicativos, aprofundando a compreensão das relações entre gênero, sustentabilidade e segurança alimentar.

Agradecimentos

Ao meu orientador e à Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), pelo apoio recebido. E, a todas as mulheres que participaram desta pesquisa, minha profunda gratidão por aceitarem contribuir de forma tão valiosa para a construção deste trabalho e para o avanço da ciência.

Referências Bibliográficas

ALKIRE, S. et al. The Women's Empowerment in Agriculture Index. *World Development*, v. 52, p. 71–91, 2013.

DARKWAH, S. et al. Sustainable agriculture and food security: The role of socioeconomic factors. *Sustainability*, v. 11, n. 21, 2019.

DOMÈNECH, L. Is reliable water access the solution to undernutrition? A review of the potential links between water and nutrition outcomes. *Global Food Security*, v. 4, p. 44–52, 2015.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Climate-smart agriculture sourcebook. Rome: FAO, 2013.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Building a common vision for sustainable food and agriculture. Rome: FAO, 2014.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The state of food and agriculture: moving forward on food loss and waste reduction. Rome: FAO, 2019.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The status of women in agrifood systems. Rome: FAO, 2022.

FOGUESATTO, C. R. et al. Adoption of sustainable agricultural practices and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, v. 218, p. 312–321, 2019.

HAUG, R. et al. Gender roles in agriculture and rural livelihoods. *Journal of Rural Studies*, v. 85, p. 1–12, 2021.

HLPE – HIGH LEVEL PANEL OF EXPERTS ON FOOD SECURITY AND NUTRITION. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. Rome: FAO, 2019.

HOLLAND, T.; RAMMOHAN, A. Gender and agricultural productivity. *World Development*, v. 115, p. 45–58, 2019.

KASSIE, M.; JETA, M.; MATTEI, A. Adoption of improved agricultural practices and its impact on farm productivity and welfare in Ethiopia. *Food Policy*, v. 44, p. 1–12, 2013.

KERR, R. B. et al. Can agroecology improve food security and nutrition? A review. *Global Food Security*, v. 29, 100540, 2021.

LIANG, X. et al. Climate-smart agriculture and its impact on productivity and resilience: Evidence from smallholder farmers. *Agricultural Systems*, v. 190, 2021.

MAHARJAN, S. et al. Soil fertility and sustainable agriculture practices: A review. *Sustainability*, v. 14, 2022.

OGUNLELA, Y. I.; MUKHTAR, A. A. Gender issues in agriculture and rural development in Nigeria. *Humanity & Social Sciences Journal*, v. 4, n. 1, p. 19–30, 2009.

PERELLI, C. et al. Sustainable agriculture and rural development: a systematic review. *Agricultural Systems*, v. 210, 2024.

PRETTY, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 363, p. 447–465, 2008.

RASHIDI, H. et al. Determinants of sustainable agricultural practices adoption: A global review. *Agricultural Systems*, v. 215, 2024.

ROCKSTRÖM, J. et al. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Nature*, v. 515, p. 451–455, 2017.

RODRÍGUEZ-BARILLAS, I. et al. Market access and adoption of sustainable farming practices. *Food Policy*, v. 121, 2024.

SANTALUCIA, M.; SIBHATU, K. T. Climate resilience in smallholder agriculture: Evidence and implications. *Food Policy*, v. 118, 2023.

TEKLU, M. et al. Barriers to adoption of sustainable agricultural practices among smallholders. *Sustainability*, v. 15, 2023.

DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA DE 2,4D EM ESGOTO SANITÁRIO SINTÉTICO TRATADO EM REATOR ANAERÓBIO HORIZONTAL DE LEITO FIXO MODIFICADO (RAHLF)

1Duanny Thais Rodrigues Caproni, 2Alessandra Giordani, 3Bianca do Amaral, 4Gunther Brucha, 5Rafael Brito de Moura

1 Universidade Federal de Alfenas, duanny.caproni@sou.unifal-mg.edu.br; 2 Universidade Federal de Alfenas, giordani.alessandra1211@gmail.com; 3 ITAIPU-PARQUETEC, bianca.amaral@pti.org.br; 4 Universidade Federal de Alfenas, gunther.brucha@unifal-mg.edu.br; 4 Universidade Federal de Alfenas, rafael.moura@unifal-mg.edu.br

Palavras-chave: herbicida; bioaumentação; xenobióticos.

Resumo

2,4-D pode ser considerado como um herbicida de ação seletiva amplamente utilizado na agricultura para o controle de plantas adventícias principalmente de folha larga. Apesar de sua inegável eficácia agronômica, é associado a impactos preocupantes tanto para o ambiente quanto para a saúde humana. As técnicas de remoção de pesticidas de água e esgoto consistem em combinação de métodos físicos, químicos e biológicos. O reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF), demonstrou sucesso na sua utilização em vários processos de biorremediação. O RAHLF foi confeccionado em acrílico, apresentando volume total de 1650 ml e volume útil de 740 ml. Operado por 312 dias, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 24 horas. A alimentação do reator consistiu em esgoto sanitário sintético, suplementado com 2,4 D em concentrações de 1,0 mg L^{-1} na Fase 1 e 2,0 mg L^{-1} nas Fases 2 e 5 mg L^{-1} na Fase 3, sendo a Fase 1 conduzida com bioaumentação. Para a avaliação dos parâmetros físico-químicos de operação do RAHLF, foram realizadas análises de pH, DQO, sólidos totais, sólidos voláteis totais e sólidos fixos totais. A quantificação do 2,4-D foi feita por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC UV). Para análise de DQO, foi obtido remoção acima de 97%, para relação AI/AP foram encontrados valores de 0,1. Após a bioaumentação realizada na Fase 1, houve um aumento considerável na degradação do pesticida, com eficiências de remoção de 2,4-D de até 93% ao final da Fase 2. Já na fase 3, com a concentração de 5 mg/L^{-1} houve uma degradação variando entre 89% e 83%. Houve êxito na estratégia de bioaumentação, demonstrando degradação de acordo com o aumento da concentração de 2,4-D.

Introdução

Um dos agrotóxicos mais empregados na agricultura e que vem recendo bastante atenção é o 2,4-D (ácido diclorofenoxiacético). Juntamente com outros herbicidas como a atrazina, glifosato, paraquat e diuron, foram responsáveis por 91% do total de herbicidas aplicados em solo nacional no ano de 2019 (Merotto Jr et al., 2022).

Nesse contexto, o ácido 2,4-D pode ser considerado como um herbicida de ação seletiva amplamente utilizado na agricultura para o controle de plantas adventícias principalmente de folha larga, com uso aprovado, no Brasil, em culturas de arroz, cana-de-açúcar, milho, soja, trigo e em pastagens.

Sua atuação acontece por vias hormonais, ao mimetizar o efeito da auxina e provocar crescimento descontrolado, que leva à morte da planta.

Apesar de sua inegável eficácia agronômica, o 2,4-D é associado a impactos preocupantes tanto para o ambiente quanto para a saúde humana (Islam et al., 2018), em especial aos arredores dos locais de aplicação. Estudos têm detectado concentrações elevadas do herbicida em diferentes compartimentos ambientais – solo, ar e águas superficiais – e em seres humanos, sendo a deriva e o comprometimento da saúde dos trabalhadores e populações rurais, além de bebês e crianças, questões de relevância crítica nesse contexto (Muñoz-Quezada et al., 2020; Freisthler et al., 2022).

Quando se trata de técnicas de remoção de pesticidas de água e esgoto, a melhor abordagem consiste na combinação de métodos físicos, químicos e biológicos. Vale destacar que a escolha de tratamentos inapropriados pode resultar em compostos ou subprodutos ainda mais tóxicos que os contaminantes originais (SALEH; ZOUARI; AL-GHOUTI, 2020).

Assim, os biorreatores anaeróbios têm ganhado relevância considerável, uma vez que sua tecnologia é de baixo custo, devido a simplicidade do material, consomem menos energia e tem produção reduzida de lodo, quando se compara a reatores aeróbios. Sem contar que, durante a digestão anaeróbia, é produzido o biogás, constituído em grande parte de metano que pode ser recuperado para fins energéticos.

O reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF), foi desenvolvido por Foresti et al., (1995) e possui típica configuração do sistema, constituído por pontos intermediários ao longo de sua extensão longitudinal para retirada de amostragens, completamente preenchido com meio de suporte inerte para imobilização da biomassa (DAMASCENO, 2023). Posteriormente, avaliou-se seu emprego em outros segmentos, como esgoto sanitário, por exemplo (Zaiat et al., 2003).

Em reatores anaeróbios pode ser utilizada técnicas de biorremediação. Entre elas, a bioaumentação, a qual se baseia na introdução de uma cepa específica ou um consórcio de microrganismos para aumentar a atividade biológica de um sistema, facilitando assim o processo de remediação (HERRERO e STUCKEY, 2015; SHAH, 2017; SZAJA, 2018)

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é averiguar o desempenho do RAHLF utilizando a técnica de bioaumentação na degradação de 2,4-D em ausência de oxigênio.

Materiais e Métodos

O reator utilizado foi um reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) confeccionado em acrílico, apresenta um com volume total de 1650 ml e volume útil de 740 ml. O sistema apresentava comprimento de 100 cm e diâmetro de 5 cm. O reator é dotado de 4 pontos intermediários para amostragem, e sistema coletor de gás, conforme mostra a Figura 01.

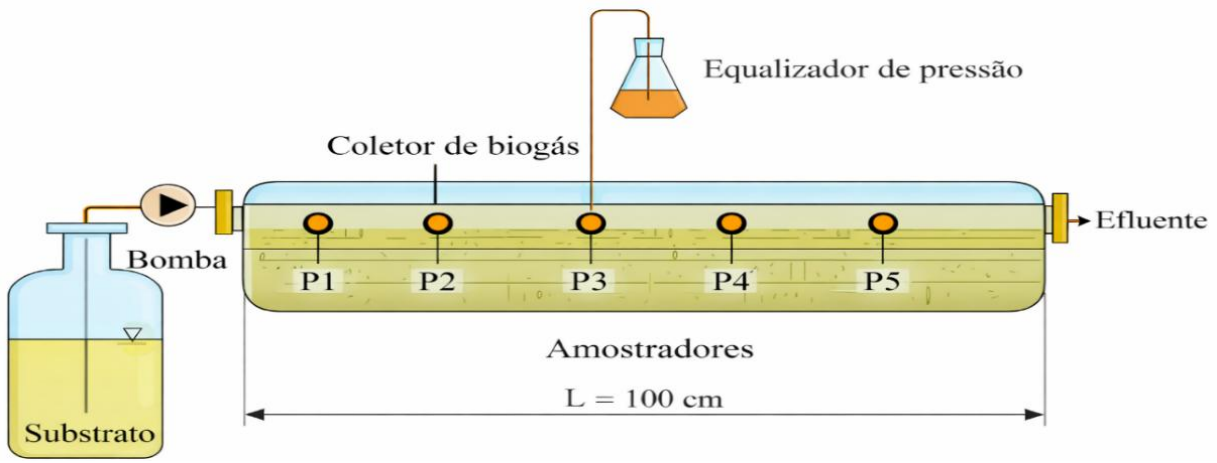


Figura 01: Representação esquemática do RAHLF em escala de bancada. Fonte: A autora, (2026).

O RAHLF foi operado durante 312 dias, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 24 horas. As condições e fases operacionais adotadas ao longo do experimento estão descritas na Tabela 01. A alimentação do reator consistiu em esgoto sanitário sintético, adaptado de Oliveira et al. (2022), suplementado com 2,4 D em concentrações de 1,0 mg L^{-1} na Fase 1 e 2,0 mg L^{-1} nas Fases 2 e 5 mg L^{-1} na Fase 3, sendo a Fase 1 conduzida com bioaumentação. Devido à baixa capacidade dos microrganismos presentes no RAHLF em iniciar a degradação do 2,4-D, aos 186 dias de operação foi realizada uma etapa de bioaumentação (Fase 1). Para isso, foram coletadas amostras do biofilme de um reator RAHLF em operação (Damasceno, 2023), contendo uma comunidade microbiana previamente adaptada à degradação de 2,4-D. Foram retirados 6 ml de biofilme de cada ponto de amostragem ao longo da estrutura do reator doador, totalizando 18 ml, os quais foram inoculados no ponto 1 do reator utilizado no presente estudo, com auxílio de uma seringa.

Para a avaliação dos parâmetros físico-químicos de operação do RAHLF, foram realizadas análises de pH, demanda química de oxigênio (DQO), de acordo com o Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, 2023). A alcalinidade total (AT) foi analisada segundo método proposto por Dilallo e Albertson (1961) modificado por Ripley et al. (1986). A quantificação do 2,4-D foi feita por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC UV), utilizando coluna C18 (4.6 mm x 250 mm i.d., 5µm) e comprimento de onda a 274 nm conforme metodologia descrita por Brucha et al. (2021).

Resultados e Discussão

O RAHLF encontra-se em operação há 312 dias e os parâmetros operacionais monitorados e suas eficiências encontram-se na Tabela 1.

Parâmetros	Fase 1	Fase 2	Fase 3
DQO Bruta afluente (mg/L)	331,6 ± 64	445,3±63,8	445,3 ± 69,1
DQO Bruta efluente (mg/L)	4,5±18,4	3,9± 2,7	2,7± 2,5
Eficiência de remoção de DQO (%)	98,5±6	99±0,7	99,3±0,6
AI/AP	0,1±0,1	0,1±0,0	0,1± 0,0
pH afluente	7,6 ±0,4	7,5± 0,3	7,4± 0,1
pH efluente	8,4±0,2	8,2±0,4	8,1± 0,4
2,4-D afluente (mg/L)	1,06 ±1,16	2,36 ±0,32	5,54 ±29,54
2,4-D efluente (mg/L)	1,13 ±0,49	0,22 ± 0,24	1,97 ± 22,03
Eficiência Degradação de 2,4-D (%)	8,2± 38,2	90,2±10,9	85,6± 2,4

Tabela 01: Parâmetros operacional do RAHLF. Fonte: A autora, (2026).

Após o período de adaptação, observa-se a estabilização da remoção de DQO em toda as Fases operacionais estudados, conforme mostra a Figura 02.

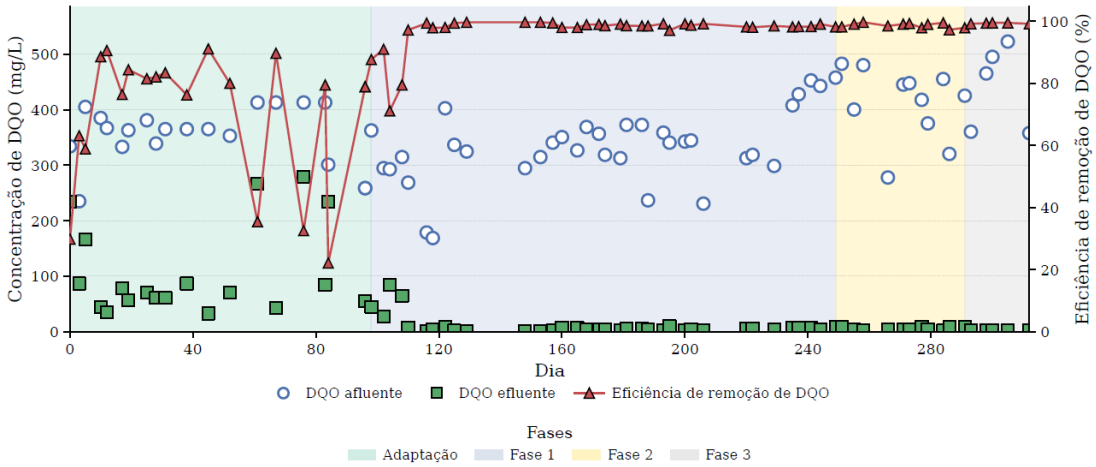


Figura 02: Concentração e eficiência de remoção de DQO ao longo das fases. Fonte: A autora, (2026).

Elevadas eficiências de remoção de DQO foram constatadas ao longo de toda as fases operacionais, com valores médios de 98,5±6% na Fase 1, 99±0,7% Fase 2 e de 99,3±0,6% na Fase 3. Esses resultados evidenciam o elevado desempenho do sistema na degradação da matéria orgânica presente no afluente. Em reatores anaeróbios, eficiências de remoção de DQO na faixa de 97 a 99%. Oliveira (2001) utilizaram RAHLF em tratamento de água residuárias com presença de formaldeído e observaram uma eficiência na remoção de DQO de 99,7%. Já para remoção de gasolina em aquíferos contaminados, a eficiência de remoção de DQO foi de 96% (Nardi et al., 2005). No estudo de degradação de pentaclorofenol (PCP) em RAHLF a remoção de DQO foi de 99% (Saia et al., 2007). Esses dados corroboram com os observados no presente estudo e sugerem que as diferentes etapas do processo **(**hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese**)** encontram-se bem equilibradas, sem acúmulo significativo de intermediários metabólicos, como os ácidos graxos voláteis (AGVs) (Chernicharo, 2007).

A alta eficiência de remoção obtida no presente estudo está normalmente associado a uma biomassa adaptada ao substrato**,** com atividade metanogênica estável e condições operacionais adequadas. Quando se trata do ponto de vista microbiológico, teores de remoção acima de 97% indicam boa sincronia entre microrganismos acidogênicos e metanogênicos e estabilidade da comunidade microbiana frente as variações operacionais. Isso demonstra alta robustez, mesmo com cargas orgânicas elevadas, além de possuir a capacidade de manter o desempenho consistente ao longo do tempo **(**Chen; Cheng e Creamer, 2008**).**

Em se tratando de alcalinidade, essa é uma das análises mais importantes, visando controlar a estabilidade do reator. Ela está diretamente relacionada à capacidade do sistema em resistir a quedas bruscas de pH, evitando assim, falhas no processo (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Nos efluentes e reatores anaeróbios, ela está principalmente associada à presença de bicarbonatos (HCO_3^-)**,** mas também pode envolver carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-). De uma forma simplificada, ela é o poder tampão do sistema (Beruth, 2023)**.**

Com valores de alcalinidade, possível encontrar o parâmetro de AI/AP a qual é um indicador de estabilidade operacional de reatores anaeróbios, mostrando o equilíbrio entre a produção e o consumo de ácidos voláteis (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). A Figura 03 demonstra esses resultados.

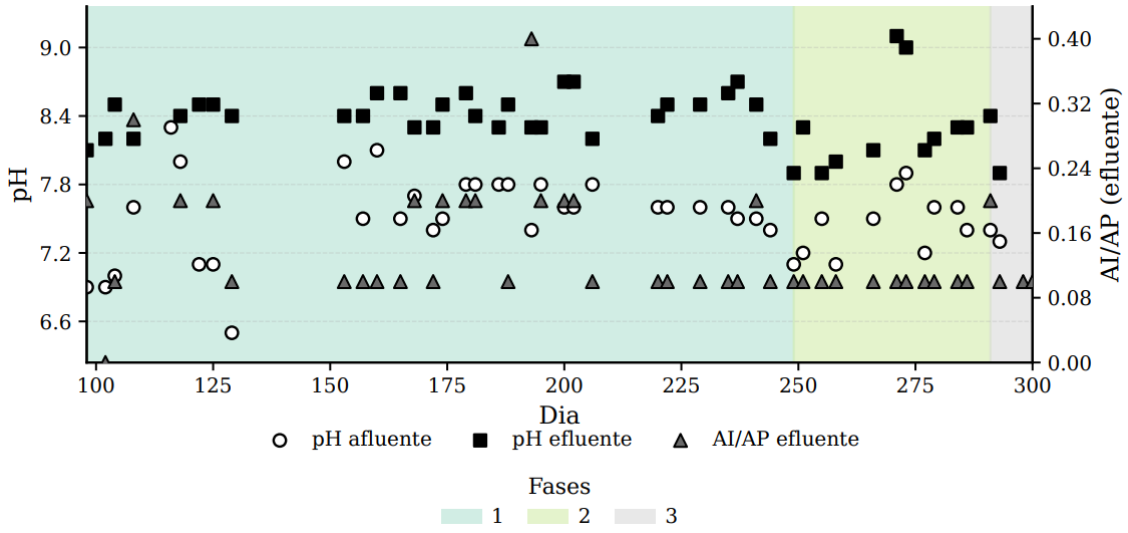


Figura 03: Valores de pH e relação AI/AP. Fonte: A autora, (2026).

Nesse contexto entende-se que uma relação menor que 0,3 demonstra um sistema estável, com boa conversão de ácidos em metano. Um sistema com relação entre 0,3 e 0,4 mostra um possível acúmulo de ácidos. Já um sistema com valores acima de 0,4 demonstra um sistema em desequilíbrio, com risco de acidificação e queda do pH (Mézes et al,.2011). No referido trabalho, foram encontrados valores de 0,1±0,1 na primeira fase, 0,1±0,0 na segunda fase, 0,1± 0,0 na terceira fase. Esses resultados evidenciam que o reator manteve condições de estabilidade ao longo de todo o período operacional, indicando um equilíbrio adequado entre a produção e o consumo de ácidos no processo anaeróbio. Soroka, (2024) observou que o reator contendo atrazina e 2,4-D, excedeu o valor de 0,3 da relação AI/AP, o que sugere uma maior produção e acúmulo de ácidos voláteis.

Para análise de pH, sabe-se que este é um parâmetro crítico para funcionamento e para estabilidade de reatores anaeróbios, influenciando diretamente a atividade microbiana e suas rotas metabólicas. De modo simplificado, para um reator estável, é importante que se tenha valores de pH de saída maiores que valores de entrada. Isso assegura que o reator não está ácido e que a comunidade microbiana está ativa (Deublein; Steinhauser, 2011). Para o RAHLF foram obtidos os seguintes valores de pH do afluente: 7,6 ±0,4 na Fase 1, 7,5± 0,3 na Fase 2 e 7,4± 0,1 na Fase 3. Já para o efluente, foram encontrados valores de 8,4±0,2 na Fase 1, 8,2±0,4 na Fase 2 e 8,1± 0,4 na Fase 3 (Tabela 1). Esses dados corroboram com os dados de Deublein e Steinhauser (2011) e demonstra que todo o sistema operacional do reator está satisfatório. Estudos em reatores com atrazina e 2,4-D apresentaram estabilização dos valores de pH entre 6,25 e 7,25, isso mostra que esses valores estão muito próximos da margem "ótima" de maximização do processo de metanogênese, o qual varia de 6,5 a 8,0.

Os reatores anaeróbios são amplamente utilizados para tratar efluentes com alta carga orgânica**,** mas também podem atuar na transformação de compostos xenobióticos (como pesticidas). A degradação do 2,4-D em ambiente anaeróbio ocorre principalmente por descloração redutiva, seguida por quebra do anel aromático. Esse processo depende de microrganismos especializados **e** condições redutoras adequadas (Brucha et al. 2021).

A Figura 04 apresenta concentrações de 2,4-D no afluente e efluente do RAHLF ao longo das diferentes fases operacionais.

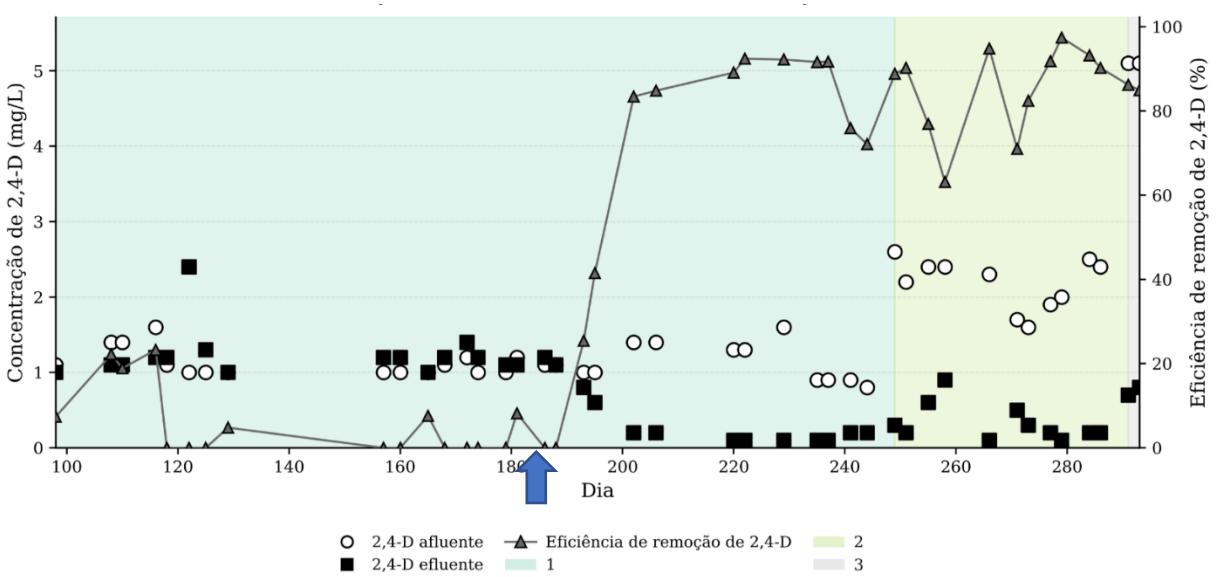


Figura 04: Concentração afluente, efluente e eficiência de remoção de 2,4-D. Fonte: A autora, (2026).

É possível observar que, após a etapa de bioaumentação realizada na Fase 1, houve um aumento na degradação do pesticida, mostrando a efetividade dessa estratégia no enriquecimento da comunidade microbiana degradadora. Esses resultados corroboram com os de Nzila et al. (2016) que, durante um trabalho de revisão a respeito do emprego da técnica de bioaumentação no tratamento de águas residuárias industriais obtiveram resultados positivos. Mehrotra et al. (2019) mostraram em seus experimentos que a biodegradação de águas residuais domésticas pode ser alcançada de forma rápida pela incorporação de consórcio de bactérias.

Após esse processo, eficiências de remoção de 2,4-D de até 93% foram obtidas ao final da Fase 2. Já na fase 3, com a concentração de 5 mg/L^{-1} houve uma degradação variando entre 89% e 83%. Damasceno, (2023) observou uma remoção eficiente de 2,4-D em RAHLF na ordem de 14,79% a 96,52%. Já Brucha et al. (2021) demonstraram depleção de 2,4-D com todas as amostras de solo utilizadas, sendo as de solo superficial com degradação mais rápida de 2,4-D.

Considerações Finais

Os resultados apresentados nesse trabalho mostraram êxito na estratégia de bioaumentação para degradação de 2,4-D em reator anaeróbio. Perspectivas mostram que com o aumento das concentrações do pesticida a comunidade microbiana tem capacidade de degradação de 2,4-D. Os parâmetros físico-químicos estão dentro dos valores esperados para um reator de alta eficiência.

Agradecimentos

ITAIPU- PARQUETEC; Universidade Federal de Alfenas- Campus Poços de Caldas (UNIFAL).

Referências Bibliográficas

APHA (American Public Health Association); AWWA (American Water Works Association); WEF (Water Environment Federation). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2023.

BERUTH, W. N. Análise de desempenho do reator anaeróbio de circulação interna no tratamento de efluentes em uma indústria de bebidas. **Revista Científica Acadêmica**, 11: 229, 2023.

BRUCHA, G.; ALDAS-VARGAS, A.; ROSS, Z.; PENG, P.; ATASHGAHI, S.; SMIDT, H.; LANGENHOFF, A.; SUTTON, N. B. 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid degradation in methanogenic mixed cultures obtained from Brazilian Amazonian soil samples. **Biodegradation,** 32:419-433, 2021.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. ***Bioresource Technology***, v. 99, n. 10, p. 4044–4064, 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. (2007). **Reatores Biológicos Anaeróbios**. Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Vol. 2. UFMG.

DAMASCENO, Bianca Gouvea. ***Estudo de degradação anaeróbia do 2,4-D em reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) inoculado com microrganismos enriquecidos provenientes do sedimento do reservatório de Itaipú-PR.*** 2023. 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2023.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction**. Wiley-VCH, 2011.

DILALLO, R; ALBERTSON, O.E. Volatile Acids by Direct Titration. **Journal of Water Pollution Control Federation**, v.33, n.4, p.356-65.1961.

FORESTI, E; ZAIA, Marcelo; CABRAL, A. K. A; NERY, V. Horizontal-flow anaerobic immobilized sludge (HAIS) reactor for paper industry wastewatertreatment. **Braz. J. Chem. Eng.,** V. 12, p. 157-163. 1995.

FREISTHLER, M. S., ROBBINS, C. R., BENBROOK, C. M., YOUNG, H. A., HAAS, D. M., WINCHESTER, P. D., & PERRY, M. J. Association between increasing agricultural use of 2,4-D and population biomarkers of exposure: findings from the National **Health and Nutrition Examination Survey**, 2022.

HERRERO, M; STUCKEY, DC. Bioaugmentation and its application in wastewater treatment: a review. Chemosphere, v. 140, p. 119-128, dez. 2015

ISLAM, F., WANG, J., FAROOQ, M. A., KHAN, M. S. S., XU, L., ZHU, J., ZHAO, M., MUÑOS, S., LI, Q. X., & ZHOU, W. Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. **Environment Internationa**l, 111, 332–351, 2018.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R; AMARAL, A. C do. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia: Sbera; **Embrapa Suínos e Aves**, 2019. 209 p.

MEHROTRA, T; SRIVASTAVA, A; RAO, RP; SINGH, R. A Novel Immobilized bacterial consortium bioaugmented in a bioreactor for sustainable wastewater treatment. Journal of Pure and Applied Microbiology, v. 13, n. 1, p. 371-383, mar. 2019.

MEROTTO JR, A., GAZZIERO, D. L. P., OLIVEIRA, M. C., SCURSONI, J., GARCIA, M. A., FIGUEROA, R., & TURRA, G. M. Herbicide use history and perspective in South America. **Advances in Weed Science**, 40(spe1), 2022.

MÉZES, L.; BIRÓ, G.; SULYOK, E.; PETIS, M.; BORBÉLY, J.; TAMÁS, J. Novel Approach on the basis of FOS/TAC method. **Analele Universitāti din Oradea, Fascicula: Protectia Mediului**, v. 17, ano 16, p. 713-718, 2011B.

MUÑOZ-QUEZADA, M. T., LUCERO, B. A., GUTIÉRREZ-JARA, J. P., BURALLI, R. J., ZÚÑIGA-VENEGAS, L., MUÑOZ, M. P., PONCE, K. V., & IGLESIAS, V. Longitudinal exposure to pyrethroids (3-PBA and trans-DCCA) and 2,4-D herbicide in rural schoolchildren of Maule region, Chile. Science of The Total. **Environment**, 749, 141512, 2020.

NARDI, I. R.; RIBEIRO, R.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Anaerobic packed-bed reactor for bioremediation of gasoline-contaminated aquifers. Process Biochemistry, v. 40, n. 2, p. 587- 592, 2005.

NZILA, A; RAZZAK, SA; ZHU, J. Bioaugmentation: an emerging strategy of industrial wastewater treatment for reuse and discharge. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 13, n. 9, p. 1-20, ago. 2016.

OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. **Avaliação da Degradação e Toxidade de Formaldeído em Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo**. 2001. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Hidráulicae Saneamento – EESC/USP, São Carlos, 2001.

RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring anaerobic digestion of high-strenght wastes. **Journal of Water Pollution Control Federation,** v.58, p.406-11, 1986.

SALEH, I., ZOUARI, N., & AL-GHOUTI, M.A. Removal of pesticides from water and wastewater: chemical, physical and biological treatment approaches. **Environmental Technology and Innovation,** 19, 101026, 2020.

SHAH, M. Bio-Augmentation: a fantabulous technology in waste water treatment. International Journal of Waste Resources, v. 7, n. 1, p. 1-3, 2017

SOROKA, Vinicius Duarte. **BIORREATORES ANAERÓBIOS APLICADOS À REMOÇÃO DE 2,4-D E ATRAZINA DE EFLUENTE SINTÉTICO.** 2024. 97 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

SZAJA, A; LAGÓD, G; JAROMIN-GLÉN, K; MONTUSIEWICZ, A. The effect of bioaugmentation with archaea on the oxygen uptake rate in a sequencing batch reactor. Water, v. 10, n. 5, p. 1-11, 2018.

ZAIAT, Marcelo. **Desenvolvimento e Análise de Biorreatores Anaeróbios contendo células imobilizadas para tratamento de águas residuárias: Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo e Restor Anaeróbio Operado em Bateladas Sequenciais**. 2003. 135 f – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO ABATE E DO DESEMPENHO DAS EXPORTAÇÕES DE CARNE BOVINA NO BRASIL (2014–2024): UMA ANÁLISE INTEGRADA DA SUSTENTABILIDADE DO AGRONEGÓCIO

1 Mônica Stobienia, 2 Giovanna Bellina Spadachin, 3 André Sandmann, 4 Fabiana Costa de Araujo Schutz
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail:Mnstobienia@gmail.com; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail:giovannabellina@alunos.utfpr.edu.br, 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: 3 sandmann@utfpr.edu.br Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: fabianaschutz@gmail.com

Palavras-chave: pecuária bovina;exportações;sustentabilidade.

Resumo

A pecuária bovina brasileira possui papel estratégico na economia nacional e no comércio internacional, sendo o Brasil um dos principais exportadores mundiais de carne bovina. Neste estudo, objetivou-se analisar a relação entre o número de bovinos abatidos, o volume exportado de carne bovina e o valor FOB das exportações nas diferentes regiões do Brasil, no período de 2014 a 2024, utilizando técnicas estatísticas descritivas e inferenciais. Foram utilizados dados secundários obtidos do Sistema de Informações Gerenciais do Serviço de Inspeção Federal (SIGSIF/MAPA) e da base Com exStat (SECEX/MDIC), organizados por região e analisados no software PAST 5.0.2. Aplicaram-se estatística descritiva, coeficiente de variação, intervalo interquartil, correlação de Pearson e regressão linear simples para avaliação de tendências temporais e associações entre variáveis. Os resultados evidenciaram o Centro-Oeste como principal polo produtivo e exportador, apresentando as maiores médias para abate, produção e valor FOB. Observou-se que o número de bovinos abatidos não apresentou forte correlação consistente com o desempenho exportador, enquanto houve forte correlação positiva e estatisticamente significativa entre o volume exportado e o valor FOB em todas as regiões. Esses resultados indicam que o desempenho econômico das exportações está mais associado à eficiência produtivo-comercial e à agregação de valor do que à ampliação da escala de abate. Sob a perspectiva da sustentabilidade, os achados demonstram convergência com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12, ao evidenciar que ganhos de eficiência produtiva podem fortalecer simultaneamente competitividade e uso mais racional dos recursos. Conclui-se que o fortalecimento da pecuária bovina brasileira depende de estratégias voltadas à eficiência, qualidade, competitividade e sustentabilidade do agronegócio.

Introdução

A pecuária bovina brasileira desempenha papel estratégico na economia nacional e no comércio internacional de alimentos, consolidando o Brasil como um dos principais produtores e exportadores de carne bovina do mundo. Ao longo das últimas décadas, o setor passou por intensas transformações produtivas, tecnológicas e logísticas, que contribuíram para o aumento da eficiência, da produtividade e da competitividade nos mercados externos. Nesse contexto, a dinâmica entre o volume de animais abatidos e o desempenho das exportações torna-se um importante indicador para compreender a estrutura, a eficiência e o comportamento da cadeia produtiva.O crescimento das exportações de carne bovina está diretamente associado a fatores como demanda internacional, padrões sanitários, acordos comerciais e variações cambiais, além da capacidade produtiva interna. Entretanto, nem sempre o aumento no número de animais abatidos reflete proporcionalmente no volume exportado ou no valor agregado das exportações, evidenciando a necessidade de análises estatísticas que permitam compreender essas relações de forma mais aprofundada. Dessa forma, estudos que integrem dados de abate, produção e exportação são fundamentais para avaliar o desempenho regional da pecuária bovina no Brasil, identificar padrões e tendências ao longo do tempo, bem como subsidiar a tomada de decisões no âmbito econômico e político.Além dos aspectos econômicos e produtivos, a análise do setor também demanda considerar a sustentabilidade do agronegócio, diante das crescentes exigências por sistemas produtivos mais eficientes no uso dos recursos naturais e com menores impactos ambientais.

Nesse contexto, práticas como intensificação sustentável, recuperação de pastagens degradadas, rastreabilidade socioambiental e sistemas integrados de produção têm ganhado relevância como estratégias para ampliar a eficiência produtiva e fortalecer a competitividade do setor. Essa perspectiva está alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12, que incentiva padrões sustentáveis de produção, promovendo maior eficiência no uso dos recursos e o fortalecimento de cadeias produtivas mais responsáveis. A análise estatística dessas variáveis possibilita verificar a existência de correlações significativas, além de avaliar a influência de fatores produtivos sobre o valor das exportações, incorporando também a dimensão da sustentabilidade como elemento associado ao desempenho do setor. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar a relação entre o número de bovinos abatidos e o volume exportado de carne bovina nas diferentes regiões do Brasil, no período de 2014 a 2024, por meio de técnicas estatísticas descritivas e inferenciais. Busca-se, assim, compreender de que maneira a produção interna se relaciona com o desempenho exportador, contribuindo para o entendimento da eficiência, da competitividade e da sustentabilidade da pecuária bovina brasileira no cenário nacional.

Material e Métodos

Para a avaliação estatística do abate e do desempenho das exportações de bovinos no Brasil, foram utilizados dados secundários oficiais referentes ao período de 2014 a 2024. As informações relativas ao abate e à produção foram obtidas no Sistema de Informações Gerenciais do Serviço de Inspeção Federal (SIGSIF), vinculado ao Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), contemplando a quantidade mensal de animais abatidos e o volume de carne produzida por unidade federativa. Os dados de exportação, referentes à carne bovina congelada com e sem osso, foram obtidos a partir da base ComexStat, da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX/MDIC).As bases de dados foram consolidadas em uma planilha eletrônica estruturada por região, ano, número de animais abatidos, volume exportado (toneladas) e valor FOB das exportações (US$), compondo o banco de dados utilizado nas análises. Inicialmente, realizou-se a organização, conferência e padronização dos dados, incluindo verificação de consistência das séries históricas e identificação de possíveis valores discrepantes, visando reduzir distorções analíticas e garantir confiabilidade aos resultados.

O tratamento estatístico foi realizado no software PAST versão 5.0.2 (Hammer, Harper e Ryan, 2001), por meio de análises descritivas e inferenciais. Primeiramente, aplicam-se procedimentos de estatística descritiva para caracterização dos dados, incluindo medidas de tendência central e dispersão, como média, desvio padrão, amplitude, intervalo interquartil (IIQ) e coeficiente de variação (CV), utilizados para avaliar a dispersão, heterogeneidade e estabilidade dos dados entre regiões e ao longo da série temporal. O IIQ foi empregado para descrever a variabilidade central e reduzir a influência de valores extremos, enquanto o CV foi utilizado para comparar a variabilidade relativa entre as variáveis analisadas. Também foi realizada análise do comportamento temporal das variáveis e comparação entre as regiões brasileiras (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul), com o objetivo de identificar padrões espaciais e tendências regionais associadas ao abate e às exportações. Para avaliar a associação linear entre o número de animais abatidos e o volume exportado por região, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, após verificação dos pressupostos de normalidade, por meio do teste de Shapiro-Wilk, e da linearidade entre as variáveis. A magnitude da associação foi interpretada com base no coeficiente *r*, em que valores próximos de 1 ou -1 indicam forte correlação positiva ou negativa, respectivamente, enquanto valores próximos de zero indicam associação fraca ou inexistente. A significância estatística foi determinada pelo p-valor, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).A tendência temporal do desempenho econômico das exportações foi avaliada por meio de regressão linear simples, utilizando o ano como variável independente e o valor FOB anual como variável dependente, com o objetivo de identificar padrões de crescimento, estabilidade ou declínio ao longo da série histórica analisada. Como medida complementar de eficiência produtivo-exportadora, considerou-se ainda a relação entre o volume exportado e o número de animais abatidos, utilizada como indicador auxiliar para interpretação dos padrões regionais de aproveitamento produtivo. Os resultados foram apresentados por meio de tabelas, gráficos e coeficientes de ajuste dos modelos, incluindo o coeficiente de determinação (R^2), empregado para avaliar o poder explicativo das regressões lineares. A interpretação dos resultados considerou tanto a significância estatística quanto sua relevância prática para a compreensão do desempenho da cadeia produtiva bovina brasileira. Por fim, os resultados foram discutidos sob a perspectiva da sustentabilidade produtiva, tomando como referência o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12, com enfoque na relação entre eficiência produtiva, uso racional de recursos e competitividade do agronegócio. Essa análise complementar permitiu relacionar os padrões observados aos princípios de produção sustentável e ao fortalecimento de cadeias produtivas mais responsáveis.

Resultados e Discussão

Inicialmente, na Tabela 1, são apresentados os parâmetros estatísticos descritivos das variáveis analisadas número de cabeças abatidas, volume de carne produzido e valor FOB das exportações para as cinco regiões do Brasil, no período de 2014 a 2024. Foram considerados indicadores de tendência central e dispersão, incluindo média, valores mínimos e máximos, desvio padrão, intervalo interquartil (IIQ) e coeficiente de variação (CV), os quais permitem uma visão geral do comportamento dos dados, evidenciando padrões de distribuição, variabilidade e amplitude das oscilações temporais. Esses indicadores são fundamentais para compreender a dinâmica produtiva e comercial da pecuária bovina no país e fornecer subsídios para interpretação das diferenças regionais observadas.

Região	Variável	Média	Desvio padrão	Mediana	Mín.	Máx.	IIQ	CV (%)
Centro-Oeste	Cabeças abatidas	10.621.930	1.038.181	10.328.690	8.832.359	12.499.210	1.536.275	10
	Ton de carne	1.197.408	65.913	735.354	478.596	1.197.408	347.893	30
	Valor FOB (Mi US$)	3.438	368	3.101	2.000	5.571	2.037	35
Nordeste	Cabeças abatidas	803.332	159.535	793.416	535.921	1.017.016	258.669	20
	Ton de carne	7.334	4.053	7.513	1.282	15.993	6.730	55

Norte	Valor FOB (Mi US$)	31	17	27	7	67	30	57
	Cabeças abatidas	5.699.461	774.724	5.607.390	4.511.417	7.316.956	799.030	14
	Ton de carne	296.750	92.725	279.019	203.100	503.283	141.270	31
	Valor FOB (Mi US$)	1.299	532	1.014	753	2.259	923	41
Sudeste	Cabeças abatidas	4.756.763	508.642	4.663.850	3.804.255	5.771.507	653.855	11
	Ton de carne	473.039	144.083	434.101	310.995	755.104	258.843	30
	Valor FOB (Mi US$)	2.262	885	2.139	1.362	4.082	1.408	39
Sul	Cabeças abatidas	1.639.926	203.947	1.688.599	1.271.179	1.962.943	265.515	12
	Ton de carne	50.136	12.214	50.651	31.006	69.793	19.097	24
	Valor FOB (Mi US$)	226	72	238	120	359	97	32

Tabela 1 - Estatística descritiva dos dados de abate e exportação de bovinos em estabelecimentos com SIF no Brasil (2014 a 2024).

Observa-se que a região Centro-Oeste apresentou as maiores médias para as três variáveis analisadas, com 10,62 milhões de cabeças abatidas, produção média de 1,197 milhão de toneladas e valor FOB médio de US$ 4,348 milhões, confirmando sua liderança na produção e exportação de carne bovina no Brasil. Além dos maiores valores médios, essa região apresentou amplitude interquartil relativamente consistente e coeficientes de variação moderados, indicando maior robustez produtiva e menor vulnerabilidade a oscilações conjunturais. Esses resultados refletem a forte especialização pecuária regional, associada à elevada disponibilidade de áreas de pastagem, concentração de rebanhos e infraestrutura voltada à exportação. Em contraste, a região Nordeste apresentou as menores médias para abate (7,33 milhões de cabeças), produção (699 mil toneladas) e valor FOB (US$ 1,279 milhão), além dos maiores coeficientes de variação (55–60%), evidenciando elevada variabilidade temporal e maior instabilidade no comportamento das variáveis analisadas. Os valores de IIQ também sugerem maior dispersão dos dados, indicando flutuações mais acentuadas ao longo da série histórica. Esse comportamento pode estar relacionado a limitações estruturais, menor inserção internacional e maior sensibilidade a fatores climáticos e econômicos. As regiões Sudeste e Sul apresentaram médias intermediárias aproximadamente 9,28 e 9,03 milhões de cabeças abatidas, respectivamente, com produção próxima de 1,03 milhão de toneladas e valor FOB médio de US$ 2,282 milhões acompanhadas de menores coeficientes de variação para abate e produção, indicando maior estabilidade relativa. Essa menor variabilidade, reforçada por intervalos interquartis mais estreitos, sugere maior regularidade produtiva e previsibilidade na dinâmica regional. De modo geral, os resultados evidenciam uma concentração regional da cadeia bovina brasileira, com destaque para o protagonismo do Centro-Oeste, ao mesmo tempo em que revelam heterogeneidade significativa entre as regiões quanto à estabilidade e ao desempenho produtivo-exportador. Essas diferenças reforçam a necessidade de políticas públicas e estratégias regionais diferenciadas voltadas à competitividade, eficiência e redução de desigualdades estruturais no setor.Sob a perspectiva da sustentabilidade, os padrões observados também podem ser discutidos à luz do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12, uma vez que regiões com maior eficiência produtiva e menor variabilidade tendem a apresentar maior potencial para alinhar crescimento econômico e uso mais racional dos recursos produtivos. Nesse contexto, a interpretação dos indicadores estatísticos contribui não apenas para avaliar desempenho econômico, mas também para discutir a sustentabilidade e a resiliência da cadeia pecuária brasileira. Em seguida, a Tabela 2 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson e os respectivos valores de ρ (*rho*), representando o nível de significância estatística, entre três variáveis principais: número de cabeças abatidas, toneladas líquidas de carne produzida e valor FOB das exportações, segmentadas por região. Essa análise permite avaliar a intensidade e a direção das associações entre as variáveis produtivas e econômicas, bem como verificar se essas relações são estatisticamente significativas, contribuindo para a interpretação dos padrões regionais de eficiência e desempenho da cadeia pecuária bovina brasileira.

Região	Variável	Cabeças abatidas	Ton de carne	Valor FOB
Centro-Oeste	Cabeças abatidas		ρ=0,11	ρ=0,27
	Ton de carne	0,51		ρ<0,05
	Valor FOB	0,36	0,95	
Nordeste	Cabeças abatidas		ρ=0,54	ρ=0,61
	Ton de carne	-0,21		ρ<0,05
	Valor FOB	-0,17	0,99	
Norte	Cabeças abatidas		ρ=0,06	ρ=0,28
	Ton de carne	0,58		ρ<0,05
	Valor FOB	0,36	0,94	
Sudeste	Cabeças abatidas		ρ=0,85	ρ=0,61
	Ton de carne	-0,06		ρ<0,05
	Valor FOB	-0,18	0,94	
Sul	Cabeças abatidas		ρ=0,54	ρ=0,16
	Ton de carne	-0,21		ρ<0,05
	Valor FOB	-0,46	0,90	

Tabela 2 - Correlação de Pearson dos dados de abate e exportação de bovinos em estabelecimentos com SIF no Brasil (2014 a 2024).

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson entre cabeças abatidas, toneladas de carne e valor FOB por região (2014–2024), com os respectivos níveis de significância. De modo geral, observa-se que a correlação entre o número de cabeças abatidas e o volume de carne produzida varia entre as regiões, sendo em alguns casos moderada e, em outros, fraca ou até negativa. Esse comportamento indica que o aumento no número de animais abatidos nem sempre está diretamente associado ao aumento proporcional da produção, podendo refletir diferenças regionais relacionadas à produtividade, peso médio dos animais, manejo e eficiência dos sistemas produtivos. Destaca-se o Centro-Oeste, que apresentou forte relação entre cabeças abatidas e toneladas produzidas ($R^2 = 0,8293$), evidenciando maior consistência entre escala produtiva e rendimento. Nas demais regiões, a maior variabilidade observada sugere diferenças no aproveitamento produtivo por animal, indicando distintos níveis de eficiência e organização da cadeia produtiva regional.Na relação entre cabeças abatidas e valor FOB, os coeficientes mostraram-se, em sua maioria, fracos ou moderados, reforçando que o aumento do abate, isoladamente, não garante maior retorno econômico nas exportações. Em contraste, o resultado mais expressivo da Tabela 2 corresponde à forte correlação positiva e estatisticamente significativa entre a quantidade de carne exportada e o valor FOB em todas as regiões, com coeficientes elevados e p-valor inferior a 0,05. Esse padrão demonstra que o desempenho econômico das exportações está diretamente relacionado ao volume efetivamente exportado, evidenciando maior influência da eficiência produtivo-comercial do que da simples expansão do número de animais abatidos. Sob a perspectiva da sustentabilidade do agronegócio, esses resultados apresentam convergência com os princípios do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12, ao indicar que ganhos de eficiência por animal e por tonelada podem ser mais relevantes do que a ampliação da escala produtiva. O aumento do rendimento por cabeça, associado a fatores como melhor conversão alimentar, manejo, rastreabilidade e agregação de valor por qualidade e certificações, permite elevar receitas sem expansão proporcional da área produtiva ou da pressão ambiental. Esse resultado reforça que competitividade e sustentabilidade podem ser complementares, especialmente quando associadas à intensificação sustentável. Nesse contexto, estratégias como sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, incentivos à rastreabilidade, assistência técnica regionalizada e maior eficiência industrial podem contribuir para elevar o aproveitamento produtivo e reduzir impactos ambientais. Assim, os dados demonstram que o desempenho exportador da pecuária bovina brasileira está mais associado à eficiência na produção e comercialização do que ao aumento do rebanho ou do abate, reforçando a importância de políticas orientadas à produtividade, geração de valor e sustentabilidade do setor.

Considerações Finais

As análises realizadas permitem concluir que a dinâmica da pecuária bovina brasileira, no período de 2014 a 2024, apresenta diferenças significativas entre as regiões, tanto em termos produtivos quanto econômicos. A região Centro-Oeste destaca-se como principal polo de abate, produção e geração de valor, evidenciando sua relevância estratégica no cenário nacional. Por outro lado, as demais regiões apresentam participações distintas, refletindo particularidades estruturais, produtivas e níveis diferenciados de eficiência ao longo da cadeia pecuária. Os resultados demonstraram que o número de bovinos abatidos não apresenta, de forma consistente, forte correlação com o volume de carne exportada ou com o valor FOB, indicando que a ampliação do abate não garante, por si só, maior desempenho no mercado externo. Em contrapartida, observou-se uma forte correlação positiva e estatisticamente significativa entre a quantidade de carne exportada e o valor FOB em todas as regiões, evidenciando que o retorno econômico está diretamente associado ao volume efetivamente exportado. Esses achados indicam

que fatores como eficiência produtiva, qualidade da carne, padronização, exigências sanitárias e inserção em mercados internacionais desempenham papel mais determinante no desempenho exportador do que a simples escala de produção.

Assim, regiões com menor volume de abate podem, ainda assim, apresentar desempenho econômico favorável quando conseguem agregar valor ao produto exportado. Esse resultado reforça que competitividade no setor não depende exclusivamente do aumento do rebanho ou da expansão produtiva, mas da capacidade de gerar maior eficiência e valor ao longo da cadeia. Sob a perspectiva da sustentabilidade, os resultados também evidenciam convergência com os princípios do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12, ao demonstrar que ganhos em eficiência produtiva e agregação de valor podem representar estratégias mais sustentáveis do que a ampliação da produção baseada apenas em escala. A priorização de maior rendimento por animal, uso mais eficiente dos recursos e fortalecimento de cadeias produtivas responsáveis contribui para alinhar competitividade econômica e sustentabilidade no agronegócio brasileiro. Dessa forma, conclui-se que o fortalecimento da pecuária bovina brasileira no mercado internacional depende não apenas do aumento da produção, mas principalmente de estratégias voltadas à melhoria da qualidade, à eficiência produtiva, à competitividade comercial e à sustentabilidade do setor. Nesse contexto, políticas de incentivo à rastreabilidade, inovação tecnológica, intensificação sustentável e práticas integradas de produção podem contribuir para maximizar o valor das exportações e consolidar a posição do Brasil como um dos principais players globais no setor de carne bovina, em consonância com demandas crescentes por sistemas produtivos mais eficientes e responsáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo suporte institucional e acadêmico para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro por meio da bolsa de Iniciação Científica, fundamental para o desenvolvimento da pesquisa e para a formação científica. Agradecem, também, ao Ministério da Agricultura e Pecuária pelo suporte técnico e pela disponibilização de dados e informações essenciais à realização do estudo. Por fim, expressam sua gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo apoio e pelas contribuições fundamentais para a execução deste trabalho.

Referências Bibliográficas

HAMMER, Øyvind; HARPER, David A. T.; RYAN, Paul D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, v. 4, n. 1, p. 1–9, 2001.

Ministério da Agricultura e Pecuária. Sistema de Informações Gerenciais do Serviço de Inspeção Federal (SIGSIF). Brasília, DF: MAPA, 2024.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. ComexStat: sistema para consultas e extração de dados do comércio exterior brasileiro. Brasília, DF: Secretaria de Comércio Exterior, 2024.

United Nations. *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.* Nova York: Organização das Nações Unidas, 2015.

ESTRUTURAS PARA O CONTROLE E MITIGAÇÃO DA POLUIÇÃO DIFUSA NA AGRICULTURA: APLICAÇÕES PRÁTICAS DOS ASPECTOS DE DRENAGEM E AMBIENTAIS

1 Asdrubal Jesus Farias-Ramirez, 2 Marco Antonio Jacomazzi, 3 Marcus Vinícius Galbetti, 4 André Luis Marreto Fusatto

1 Faculdade PECEGE. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. Correio electrónico: ajfara@gmail.com https://orcid.org/0000-0003-1544-8759; 2 Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, marcoantono@rasa.eng.br 3 Faculdade de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - UEMS, marcusgalbetti@gmail.com e 4 Engenheiro na R.A.S.A. Racionalize Água Solo e Ambiente Ltda, andreluis@rasa.eng.br

Palavras-chave: poluição difusa, volume de qualidade, drenagem agrícola.

Resumo

A intensificação dos sistemas agrícolas, especialmente no contexto da agroindústria sucroenergética brasileira, tem ampliado os desafios associados à gestão da água e ao controle da poluição difusa. Este artigo teve como objetivo avaliar a adequação das capacidades hidráulicas e ambientais de estruturas de drenagem no controle da poluição difusa em sistemas agrícolas. Com base no conceito de Volume de Qualidade (VQ), com foco na interceptação do escoamento superficial gerado por chuvas hidrologicamente leves, principais responsáveis pelo transporte de poluentes no fenômeno de first flush. A metodologia integrou análise probabilístico pluviométrica, dimensionamento hidráulico e simulação de cenários extremos, utilizando dados representativos da região de Paranaíba (MS). Os resultados indicaram que a precipitação diária de 45 mm, associada a 90% de probabilidade de ocorrência, representa adequadamente a chuva de projeto para fins de controle qualitativo. O VQ estimado foi de 3.780 m³, demonstrando capacidade efetiva de captura do escoamento mais poluído. A configuração do sistema, composta por reservatório de sedimentação (30% do VQ) e reservatório impermeabilizado a jusante (70% do VQ), mostrou-se eficiente na retenção de sólidos e no armazenamento temporário. As simulações hidrológicas evidenciaram estabilidade estrutural para eventos com tempo de retorno de até 10 anos, mantendo borda livre segura e ausência de extravasamento crítico. Os achados reforçam que abordagens baseadas em chuvas frequentes e dados locais são mais eficazes do que métodos tradicionais centrados em eventos extremos. Conclui-se que o dimensionamento orientado ao VQ representa uma estratégia robusta, sustentável e tecnicamente consistente para o controle da poluição difusa em sistemas agrícolas.

Introdução

A intensificação global dos sistemas agrícolas, impulsionada pela crescente demanda por alimentos e biocombustíveis, tem gerado pressões significativas sobre a gestão dos recursos hídricos. Em regiões tropicais, como o Brasil, a expansão da indústria sucroenergética resultou em mudanças drásticas no uso e ocupação do solo que, muitas vezes desacompanhadas de tratos conservacionistas, provocam impactos severos na hidrologia local e na qualidade da água (Jacomazzi, M. A. *et al.*, 2019; Johanson *et al.*, 2023; Mello Rocha, de, Reis e Araújo, de, 2011).

Diferentemente das fontes pontuais, a poluição difusa caracteriza-se pela sua natureza espacialmente distribuída, sendo fortemente influenciada por fatores hidrológicos, uso do solo e práticas de manejo, o que dificulta sua quantificação e controle. Enquanto o controle de fontes pontuais de poluição avançou consideravelmente, a poluição de fonte difusa permanece como um dos maiores desafios para a sustentabilidade ambiental, devido à sua natureza dispersa e variabilidade espaço-temporal (Johansson *et al.*, 2024; Russo *et al.*, 2023; Zheng, 2018).

O *first flush* (primeira lavagem) é o fenômeno hidrológico no qual a concentração ou carga de poluentes é significativamente maior na fase inicial do escoamento superficial do que nos estágios posteriores do mesmo evento de chuva (Baek *et al.*, 2015; Johansson *et al.*, 2024; Maniquiz-Redillas *et al.*, 2022; Sansalone e Cristina, 2004).

A poluição difusa agrícola é intrinsecamente ligada ao ciclo hidrológico, no qual o escoamento superficial atua como o principal agente de transporte de contaminantes acumulados na superfície do solo, assim o *first flush* é crítico porque transporta rapidamente poluentes altamente concentrados acumulados durante períodos de seca (Jacomazzi, Marco Antonio *et al.*, 2019; Johansson *et al.*, 2024; Lay *et al.*, 2024).

Entre esses poluentes, o nitrato (NO_3) assume papel crítico em virtude de sua alta solubilidade e fraca retenção nos coloides do solo, o que facilita processos de lixiviação e o carregamento para corpos d'água superficiais e profundos, que causa desequilíbrios ecológicos desencadeando processos de eutrofização e riscos à saúde pública. A dinâmica de transporte desses poluentes frequentemente ocorre em etapas: primeiro, o umedecimento e a infiltração iniciam a dissolução de elementos solúveis no solo; logo superada a capacidade de infiltração, inicia-se o escoamento superficial, que arrasta partículas sólidas e poluentes por meio da energia cinética das gotas de chuva e da velocidade do fluxo (Johanson *et al.*, 2023; Johansson *et al.*, 2024).

A compreensão desse efeito é vital para o estabelecimento do Volume de Qualidade (VQ), também denominado Water Quality Capture Volume (WQCV), que representa a parcela do escoamento superficial que deve ser capturada e tratada para mitigar os impactos qualitativos, representa um parâmetro fundamental de projeto utilizado no dimensionamento de estruturas

de controle de águas pluviais para mitigar os impactos da poluição difusa como design otimizado de Melhores Práticas de Manejo (BMPs) e tecnologias de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) (Lee *et al.*, 2005; Maniquiz-Redillas *et al.*, 2022; Park, Song e Roesner, 2013; Perera *et al.*, 2021; Russo *et al.*, 2023; Silva e Silveira, 2012; Zhang *et al.*, 2016).

Entretanto, o dimensionamento dessas estruturas exige uma mudança de paradigma: enquanto a macrodrenagem tradicional foca em eventos extremos para o controle de enchentes, o projeto para o manejo do VQ baseia-se no volume de escoamento superficial gerado por chuvas leves (chuvas pequenas com alta frequência), pois estas transportam a maior parte da carga poluidora ou efeito *first flush*. Esta abordagem reconhece que as tempestades menores e frequentes, tipicamente associadas a períodos de retorno inferiores a um ano, respondem pela maior parte do volume de escoamento anual e, consequentemente, pelo transporte da carga poluidora (Jacomazzi, Marco Antonio *et al.*, 2019; Johanson *et al.*, 2023; Johansson *et al.*, 2024; Perera *et al.*, 2019; Silva e Silveira, 2012; Yang *et al.*, 2023).

Nesse cenário, estruturas hidráulicas de controle como bacias de detenção e reservatórios de infiltração são projetadas para interceptar esse volume inicial mais contaminado, o que representa uma estratégia técnica e economicamente mais eficiente do que o tratamento do volume total de eventos extremos (Jacomazzi, Marco Antonio *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2015; Russo *et al.*, 2023; Silva e Silveira, 2012).

No entanto, a eficiência dessas estruturas depende diretamente de seu adequado dimensionamento, o qual deve integrar critérios hidrológicos, hidráulicos e ambientais, dessa forma a determinação do VQ ideal permanece um desafio, porque na literatura ainda não existe um critério fixo para a determinação da chuva leve, como a regra empírica da meia polegada (12,7 mm) criticada por sua arbitrariedade, em vez disso recomenda-se que o VQ seja baseado em estatísticas locais de precipitação, frequentemente buscando capturar eventos entre o 85º e 95º percentil das chuvas anuais para maximizar a eficiência de remoção de poluentes por sedimentação natural isto na prática representa interceptar os primeiros 30% do volume de escoamento pode capturar até 80% da massa de poluentes, definindo assim um VQ eficiente para o sistema (Alves *et al.*, 2021; Genova Martins e Taffarello, 2017; Jacomazzi, Marco Antonio *et al.*, 2019; Johanson *et al.*, 2023; Johansson *et al.*, 2024; Orlando *et al.*, 1995; Sansalone e Cristina, 2004; Zhang *et al.*, 2016, 2010).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a adequação das capacidades hidráulicas e ambientais de estruturas de drenagem no controle da poluição difusa em sistemas agrícolas. Por meio da análise de cenários de dimensionamento aplicando critérios controle da poluição difusa, busca-se verificar se as estruturas hidráulicas possuem capacidade hidráulica adequada e propor diretrizes para o dimensionamento de reservatórios visando a proteção efetiva dos recursos hídricos nas áreas agrícolas.

Material e Métodos

A consecução do dimensionamento das estruturas de controle da poluição difusa em áreas de produção agroindustriais exige uma abordagem lógica e sequencial, integrando parâmetros hidrológicos, critérios de engenharia e diretrizes de gestão operacional. Para sistematizar esse processo e facilitar a compreensão da metodologia aplicada no exemplo desse estudo, a Figura 01 apresenta o fluxograma de dimensionamento, estabelecendo a conexão entre a caracterização inicial da área, o cálculo do volume de qualidade e a verificação da segurança hidráulica das barreiras de contenção. As etapas detalhadas para a consecução de cada módulo deste fluxo de trabalho estão descritas a seguir, fundamentando as premissas técnicas adotadas para garantir a eficácia ambiental do sistema.

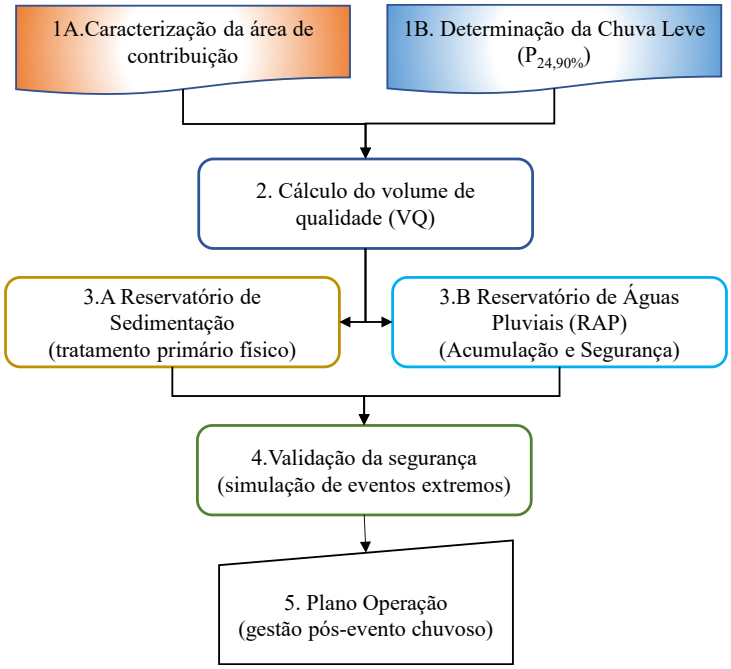


Figura 04: Fluxograma para dimensionamento das estruturas de reservatórios para controle de poluição difusa em áreas agroindustriais. Fonte: Os autores (2026)

Caracterização da Área de Contribuição

O primeiro passo é definir as características físicas área de contribuição sendo: Área da Superfície de Contribuição (ASC, em hectares), relevo e declividades do terreno e o coeficiente de deflúvio (C), geralmente adotado entre 0,5 e 0,7 devido à compactação do solo.

Estudo pluviométrico e determinação da Chuva Leve

Para determinação da chuva de projeto é considerada a metodologia de *Chuvas Hidrológicas Leves*, que são definidas como lâmina de precipitação diária capaz de gerar deflúvio superficial e carrear maior parte da carga poluidora difusa sobre a superfície. Conforme estudos apresentados pelo relatório "Iowa Stormwater Management Manual – dezembro 2008, capítulo 2C-6 Smal Storm Hydrology", os primeiros milímetros de um evento chuvoso são suficientes para carrear 99% da carga poluidora. Portanto, as chuvas leves de projeto são estimadas pela precipitação diária (acima de 2,00 mm/dia), com 24 horas de duração e representam, pelo menos, 90% dos eventos de precipitação diária. Para determinar a probabilidade de ocorrência da precipitação diária ou chuva leve é empregado o método de cálculo estatístico da distribuição Log-Normal. As estações selecionadas foram obtidas no Banco de Dados Hidrológicos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, [s.d.]) da estações Fazenda Pindorama (1951003), com um período de análise de 1983 – 2020.

Cálculo do Volume de Qualidade (VQ)

Os reservatórios de acumulação temporária de águas pluviais (RAP) visa armazenar parte do escoamento superficial que deverá ocorrer durante eventos de chuva diária, carreando maior parte dos sedimentos suspensos sobre a superfície que poderá estar compactada ou não. A equação 01 apresenta estimativa desse volume de escoamento superficial:

$$VQ = 10 \cdot P_{24h,90\%} \cdot ASC \cdot C \qquad (01)$$

Onde: VQ - o Volume de Qualidade para acumulação do escoamento superficial (m3); $P_{24h,90\%}$ e a precipitação diária de 24 horas com probabilidade de 90% de ocorrência (mm/dia); ASC, área da superfície de contribuição (ha); e, C, o coeficiente de deflúvio.

O volume estimado pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, denominado como Volume de Qualidade (VQ), representa o volume de escoamento superficial que concentra significativa parte da poluição difusa sobre a superfície com algum potencial de poluição difusa. Esse volume deve ser armazenado temporariamente no reservatório revestido (localizado lateralmente na região das menores elevações da área).

Dimensionamento do Reservatório de Sedimentação (VQ)

O sistema de coleta de águas pluviais direciona o fluxo do escoamento para uma estrutura prismática que retém cerca 30% do VQ; de modo a reduzir a velocidade da vazão afluente, permitindo que as partículas sólidas apresentem tempo para se sedimentar. As principias características dos reservatorios de sedimentação são:

- Capacidade Alvo: Deve reter aproximadamente 30% do VQ total;
- Geometria: Define-se o comprimento, largura e profundidade (média de 1,4 a 1,5 metros) para permitir a decantação de sólidos;
- Acesso: Deve prever uma rampa de entrada (inclinação de 10% a 15%) para permitir a limpeza mecanizada do lodo depositado; e
- Taxa de aplicação superficial: menor que 200 $m^3.d^{-1}.m^{-1}$ para os diferentes eventos simulados.

Trata-se de um reservatório prismático retangular com profundidade média em torno de 1,50 metro de altura. Este reservatório apresenta uma rampa de acesso de 15% em um dos lados.

Como o reservatório destina-se à acumulação temporária de águas pluviais por período inferior a 24 horas, a estrutura será retangular construída em concreto, permitindo operação de limpeza mecanizada do material depositado.

Ao final do reservatório de sedimentação haverá uma soleira de concreto que controla tanto o nível de água na estrutura, quanto a vazão vertida para a descarga de fundo, essa soleira trata-se de uma estrutura vertedora de descarga livre, lançando a vazão defluente para o reservatório revestido à jusante.

Para operação de limpeza mecanizada do fundo do reservatório, serão instaladas comportas retangulares verticais ao longo da soleira, que permitirão o esgotamento pleno do volume acumulado, após ocorrência dos eventos chuvosos. Essas comportas serão operadas somente no advento da remoção do fluido alojado, após sedimentação e limpeza mecanizada.

Dimensionamento do Reservatório de Águas Pluviais (V_{RAP})

O volume remanescente (cerca de 70% do VQ) é encaminhado para outro reservatorio revestido em geomembrana (RAP), à jusante da Caixa de sedimentação. As principais características desse segundo reservatorio são:

- Volume Requerido: $V_{RAP} = VQ - V_{SED}$;

- Impermeabilização: A estrutura deve ser obrigatoriamente revestida com geomembrana para impedir a contaminação do lençol freático;
- Profundidade Útil: Geralmente fixada em torno de 3 metros para acomodar o volume operacional antes de atingir o sistema de segurança; e
- Base do reservatório deve ser provida de sistema de drenagem para detecção de vazamentos, interligado à uma caixa externa de inspeção.

Verificação de Segurança Hidráulica

Após assegurar a capacidade de armazenamento do Volume de Qualidade (VQ), o sistema deve ser submetido a testes de estresse hidrológico frente a eventos chuvosos extremos de diferentes durações, parametrizados por tempos de retorno de 5 ou 10 anos. Tal verificação é essencial para avaliar a resiliência das estruturas contra riscos de extravasamento decorrentes dos hidrogramas afluentes hipotéticos, prevenindo a ocorrência de processos erosivos a jusante dos dispositivos de controle.
Todo o volume de qualidade (VQ) e parte do escoamento superficial do pátio será direcionado ao reservatório R.A.P. e, durante eventos de fortes chuvas, deve ser prevista estrutura de segurança para extravasão do excesso desse escoamento. Os reservatórios são providos de dispositivos extravasores de segurança, dimensionados como vertedores em descarga livre, instalados em torres de saída (stop-log) e galeria de concreto para escoar o excesso de água limpa de chuvas intensas.
Esse volume em excesso de águas pluviais apresentará insignificante potencial poluidor, uma vez que o volume de qualidade (VQ), proveniente das chuvas leves, fora parcialmente separado pela estrutura de sedimentação, inserida na etapa inicial do sistema de controle físico.

Conforme discutido anteriormente, é previsto acomodação do volume de qualidade até o nível de soleira da estrutura extravasora,

A vazão vertida será conduzida a jusante para o lançamento final, que encaminhará o excesso de escoamento para o retorno ao canal coletor da drenagem. Para a extravasão do escoamento proveniente de chuvas intensas é considerado o amortecimento do hidrograma de enchente afluente ao reservatório.

Neste contexto, é previsto: (i) a máxima sobre elevação de uma onda de cheia proveniente da chuva intensa associada ao tempo de retorno de 10 anos; (ii) volume de espera no reservatório durante eventos extremos e (iii) máxima vazão defluente do reservatório.

Para a estimativa das vazões máximas é empregado o método racional, descrito pela equação 02; o evento chuvoso é aquele que proporcionará maior sobre elevação do nível de água nos reservatórios projetados e, portanto, é a condição crítica de projeto. O hidrograma sintético gerado pelo modelo apresenta forma trapezoidal com tempo de ocorrência do pico de vazão igual ao tempo de concentração (tc).

$$Qp = 0{,}2778 * Cp * IDF(d, Tr) * Ad \qquad (02)$$

Onde: Qp – vazão de pico ($m^3.s^{-1}$); IDF(d,Tr) - intensidade de chuva ($mm.h^{-1}$), para duração = tc e Tr = 10 anos (anos) e C é o coeficiente de deflúvio (adimensional) entre 0,5 e 0,7.

$$IDF(d, Tr) = \frac{5856{,}28 * Tr^{0{,}18}}{(d + 38{,}49)^{1{,}08}} \qquad (03)$$

Para o amortecimento do hidrograma de cheia é utilizou o modelo modificado de armazenamento de Pulz, descrito em Tucci (1993; cap. 12, pág. 451 a 458) e em Tomaz (2002; cap. 10). Essa metodologia consiste na aplicação de uma expressão discretizada da equação da continuidade e na relação entre armazenamento e vazão do reservatório, sendo empregada a equação 03.

$$O_{t+1} + 2.\frac{VLE_{t+1}}{\Delta t} = I_t + I_{t+1} + 2.\frac{VLE_t}{\Delta t} - O_t \qquad (04)$$

Onde: I_{t+1} e I_t - vazões de entrada (INFLOW) nos instantes t+1 e t, respectivamente, obtidas a partir do hidrograma de cheia; O_{t+1} e O_t - vazões de saída (OUTFLOW) nos instantes t+1 e t, respectivamente e $VLE_{(t+1)}/\Delta t$ e $VLE(t)/\Delta t$ – volume de espera no reservatório dividido pelo intervalo de tempo (Δt) no instantes t+1 e t, respectivamente.

Os valores das variáveis da equação 03 (I_t; I_{t+1}; Ot e 2* VLE(t)/Dt) são conhecidos para qualquer instante. Pela aplicação dessa equação, determina-se o valor da soma das duas incógnitas O_{t+1} e 2* VLE_{t+1}/Dt. Essa soma é denominada X2, que matematicamente, é representada pela equação 04.

$$X2 = O_{t+1} + 2.\frac{VLE_{t+1}}{\Delta t} \qquad (05)$$

Para determinar os valores dessas incógnitas é necessário ajustar uma Função Auxiliar que correlacione a quantidade (O + 2* VLE/Δt) na abscissa e, na ordenada, a vazão de saída nas estruturas de descarga das cheias (O).
A vazão de saída (O) é a descarga pelo vertedor retangular de soleira delgada, sendo empregada a equação 05 na estimativa da vazão de descarga (O), em função da sobre elevação a partir da soleira do vertedor:

$$O = 1{,}71 * L * H^{1,5} \quad (06)$$

Onde: L – Largura da soleira do vertedor e H – carga hidráulica sobre o vertedor, à partir, do nível normal de água na barragem.

Após determinação da máxima sobre elevação do nível de água na estrutura é verificado a borda livre resultante da subtração entre o nível máximo de água da enchente crítica e o nível de crista do aterro do reservatório; o sistema deve manter uma distância de segurança mínima de segurança, evitando potencial galgamento.

Estratégia de Esvaziamento

O fluxograma termina na definição operacional cujo volume armazenado – equivalente ao volume de qualidade, seja removido em até 24 horas após a chuva, ou por bombeamento, ou por gravidade, para áreas de destinação controlada para recebimento desse material.

A seguir estão os dados para elaboração de um exemplo hipotético para dimensionamento das estruturas de controle ambiental em áreas agroindustriais:

Superficie de controle ambiental:

- Pátio de compostagem de torta de filtro em agroindustrial:
- Localização: região de Paranaíba em Mato Grosso do Sul;
- Área do pátio de compostagem = 12 ha;
- Coeficiente de deflúvio = 0,65;
- Precipitação de 24h com 90% de probabilidade de ser excedida ($P_{24h,90\%}$) = 45 mm; e
- Volume de Qualidade = 3.780 m³.

Resultados e Discussão

Os valores de precipitação diária e respectivas frequência estão apresentadas na Figura 2. Segundo essa figura, para 90% do tempo, os valores de precipitação foram inferiores à 45 mm/dia. Esse valor foi considerado como a precipitação de projeto para dimensionamento do volume de escoamento decorrente de Chuvas Hidrologicamente Leves.

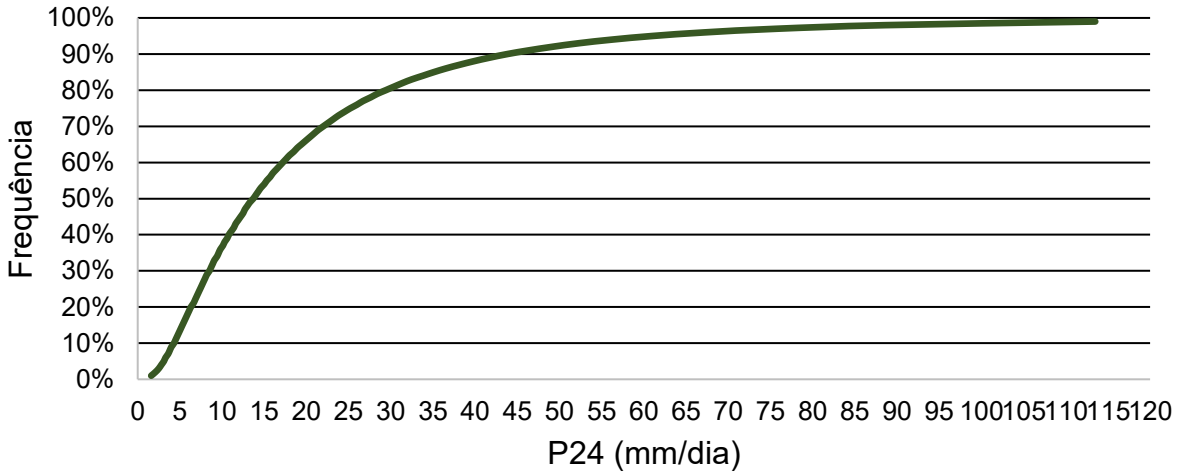


Figura 02 - Precipitações prováveis de 24 horas em função da frequência de ocorrência segundo a distribuição LogNormal da Estação Pluviométrica Fazenda Pindorama. Fonte: Os autores (2026)

Usando os dados hipotéticos para dimensionamento das estruturas o volume de escoamento superficial gerado pelo pátio de compostagem pode observar-se na Tabela 1, o volume de qualidade para uma precipitação de 24h com 90% de probabilidade de ser excedida (45 mm) foi estimado em 3.780 m³.

Quando comparado com o dimensionamento tradicional conforme as Tabela 2; para a elaboração do projeto de amortecimento foi utilizada a equação intensidade-duração-frequência da chuva para a partir dos índices de IDF da região, os valores de intensidade de precipitação com duração de 15 e 30 minutos para Tempo de retorno (Tr) de 5 anos e 10 anos e estimativa da precipitação efetiva, adotando um coeficiente de deflúvio de 0,65 para as chuvas intensas.

Tabela 1 - Determinação do volume do escoamento superficial (volume de qualidade, VQ), produzido no pátio de compostagem da usina, em função da precipitação diária provável.

Frequência da Precipitação	Precipitação Diária P_{24} (mm/dia)		Volume de Qualidade (m^3/d)
	Total	Efetiva	
90%	45	31,5	3.780

Fonte: Os autores (2026)

Tabela 2 - Estimativa da chuva de projeto, duração de 15 e 30 minutos, 1 a 24 horas.

Duração da chuva	Tempo de retorno Tr (anos	Chuva de projeto			
		Intensidade IDF (mm/h)	Acumulada P0 (mm)	Coeficiente deflúvio da chuva intensa	Efetiva $Pe=C.P_0$
5 min	5	149,0	12,0	0,65	8,0
15 min	5	119,9	30,0	0,65	19,0
30 min	5	92,5	46,0	0,65	30,0
1 horas	5	63,2	63,0	0,65	41,0
2 horas	5	38,3	77,0	0,65	50,0
3 horas	5	27,4	82,0	0,65	53,0
12 horas	10	8,4	101,0	0,65	65,0
24 horas	10	4,2	100,0	0,65	65,0

Fonte: Os autores (2026)

Para avaliação hidráulica do desempenho do sistema extravasor foram simulados 8 cenários para a chuva intensa de projeto, sendo 15 e 30 minutos, 1 a 6 horas associados ao tempo de retorno de 5 anos e 12 e 24 horas associados ao tempo de retorno de 10 anos (Tabela 3).

Tabela 3 - Vazão máxima de projeto (QP) para o pátio de compostagem.

Simulação Duração – Tr	Coeficiente de deflúvio (C)	Área de contribuição Ac (ha)	IDF (d,Tr) mm/hora	Vazões máximas Qp (m^3/s)
5 min – Tr 5 anos	0,65	12,00	149,0	3,228
15 min – Tr 5 anos			119,9	2,598
30 min – Tr 5 anos	0,65	12,00	92,5	2,004
1 h – Tr 5 anos			63,2	1,368
2 h – Tr 5 anos			38,3	0,830
3 h – Tr 5 anos			27,4	0,593
12 h – Tr 5 anos	0,65	12,00	8,4	0,182
24 h – Tr 5 anos			4,2	0,090

Fonte: Os autores (2026)

Assim os resultados do dimensionamento foram os seguintes:
Reservatório de Sedimentação:

- Geometria do reservatório de sedimentação: (i) comprimento C_{CS} = 40,0 metros e comprimento efetivo para sedimentação na caixa (C_{CS} – 1) → 40 - 1 → 39m; (ii) Largura Total da caixa, *Lcaixa* = 20,0 metros;
- Altura da caixa no início, hc_1 = 1,4 metro e no final, hc_2 = 1,65 metros;
- Rampa de acesso de máquinas: Inclinação da rampa, I_{rampa}= 15%; comprimento da rampa, C_{rampa}= 15 metros; Largura da rampa, *Lrampa* = 8 metros;
- Volume Acumulado no Nível d'Água Normal = 30%.

Reservatório de Águas Pluviais:

- Comprimento Total = 60,0 metros;
- Largura Total = 26,0 metros;
- Altura Total = 3,00 metros;
- Profundidade Útil = 2,25 metros;
- Inclinação dos Taludes = 1H:1V;
- Cota da crista do reservatório = 429,00 m;
- Cota de fundo no início do reservatório = 426,87 m; e
- Cota de fundo no final do reservatório = 426,87 m.

Extravasor de segurança para eventos extremos:

- Tipo de estructura extravasora: torre retangular (stop logg) interligada, ao fundo, por galeria circular de concreto, que é a própria saída do extravasor de superficie, a soleira da torre stop log opera hidráulicamente como vertedor retangular, com soleira delgada;
- L – Largura efetiva da soleira do vertedor de descarga livre = 1,75 metros;
- H – Carga hidráulica sobre a soleira do vertedor, à partir, do nível operacional de água; e
- Condição de operação do sistema extravasor: reservatório cheio, considerando que todo o volumen de Qualidade já estaría armazenado anteriormente.

Na Tabela 4 estão apresentadas, de forma resumida, os resultados das simulações hidrológicas para os diferentes cenários das chuvas prováveis na bacia do pátio de compostagem. Nessa tabela estão apresentadas as estimativas das vazões máximas afluentes e vertidas (Saída do sistema extravasor), nível de água máximo atingido na simulação, bem como, as condições de borda livre (diferença geométrica entre o nível da crista e o Nível máximo de água).

Tabela 4 - Resumo das simulações hidrológicas para os diferentes cenários propostos das chuvas de projeto para as estruturas hidráulicas de segurança dos reservatórios do sistema de drenagem do pátio de compostagem.

Evento chuvoso simulado	Vazões máximas (m^3/s)		Níveis de água (m), a partir cota da soleira do extravasor		
duração - tempo de retorno (anos)	Afluente (Inflow)	Defluente (Outflow)	Máximo NA (m)	Máxima elevação (H)	Borda livre (BL, m)
Reservatório de águas pluviais, NA.operacional = 426,00 metros (condição inicial vazio)					
0,1h - Tr = 5anos	1,16	0,00	426,39	0,39	2,61
0,3h - Tr = 5anos	1,16	0,00	426,93	0,93	2,07
0,5h - Tr = 5anos	0,98	0,00	427,49	1,49	1,51
1h - Tr = 5anos	0,68	0,00	428,01	2,01	0,99
2h - Tr = 5anos	0,51	0,43	428,55	2,55	0,45
3h - Tr = 5anos	0,43	0,43	428,55	2,55	0,45
12h - Tr = 10anos	0,18	0,18	428,42	2,42	0,58
24h - Tr = 10anos	0,09	0,09	429,38	2,35	0,65
Reservatório de águas pluviais, NA.operacional = 428,25 metros (condição inicial cheio)					
0,1h - Tr = 5anos	1,16	0,30	428,49	0,24	0,51
0,3h - Tr = 5anos	1,16	0,75	428,69	0,44	0,31
0,5h - Tr = 5anos	0,98	0,88	428,74	0,49	0,26
1h - Tr = 5anos	0,68	0,67	428,66	0,41	0,34
2h - Tr = 5anos	0,51	0,51	428,59	0,34	0,41
3h - Tr = 5anos	0,43	0,43	428,55	0,30	0,45
12h - Tr = 10anos	0,18	0,18	428,42	0,17	0,58
24h - Tr = 10anos	0,09	0,09	428,36	0,11	0,64

Fonte: Os autores (2026)

Para a condição crítica de operação do reservatório de águas pluviais, inicialmente cheio – NA inicial = 428,25 metros; o evento crítico estaria em torno de 30 e 60 minutos, com máxima sobre elevação de 50 cm, atingindo nível máximo de água 428,75 m. Para esses níveis de água, a vazão máxima vertida pela estrutura seria de 0,88 m3/s, resultando numa borda livre de 26 cm, logo não haveria risco de galgamento da crista do reservatório projetado.

Como os níveis de água atingidos são inferiores ao da soleira do reservatório de sedimentação (430,00 metros), o evento crítico simulado não interfere na operação hidráulica do reservatório montante.

Considerando a condição normal de operação do reservatório de águas pluviais, ou seja, inicialmente vazio e NA = 426 metros; a vazão somente verteria pelo sistema extravasor para eventos extremos com duração superior a 2 horas. Dessa forma para eventos chuvosos (associados ao tempo de retorno de 5 anos) com duração menor que 2 horas, todo o volume afluente ao reservatório de águas pluviais ficaria retida pela estrutura.

As simulações hidrológicas indicaram que o sistema permanece estável frente a eventos extremos com tempo de retorno de até 10 anos, mantendo borda livre adequada e evitando extravasamentos.

Considerações Finais

Este estudo avançou na sistematização do dimensionamento de estruturas voltadas ao controle da poluição difusa ao integrar fundamentos hidrológicos e hidráulicos sob o paradigma do Volume de Qualidade (VQ). Os resultados demonstram que o foco

em chuvas hidrologicamente leves, definidas pelo percentil de 90% de probabilidade, constitui uma estratégia de mitigação ambiental superior às abordagens tradicionais de macrodrenagem. Essa metodologia permite a captura eficaz do first flush, com volumes dimensionados em 3.780 m^3 para o cenário analisado, garantindo a retenção da carga poluidora inicial.

A estratégia de compartimentalização do sistema, que prevê a retenção primária de sedimentos (correspondente a 30% do VQ) seguida pelo armazenamento em reservatório impermeabilizado com geomembrana, assegura alta eficiência na redução de poluentes particulados. Além de otimizar a operacionalidade por meio de manutenções mecanizadas, a utilização de critérios probabilísticos baseados em dados locais reforça a necessidade de novos paradigmas de projeto. Tal abordagem orienta a gestão hídrica no agronegócio para soluções mais inteligentes, sustentáveis e tecnicamente resilientes.

Referências Bibliográficas

ALVES, L. D. et al. Avaliação Da Qualidade Da Água De Chuva Do Fenômeno First Flush E De Volumes Armazenados Em Reservatórios De Sistemas De Águas Pluviais Na Cidade Do Rio De Janeiro-Rj. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, p. 193–204, 2021.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Portal HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 2 fev. 2026.

BAEK, S. S. et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach. Water Research, v. 86, p. 122–131, 1 dez. 2015.

GENOVA MARTINS, R.; TAFFARELLO, D. Análise da ocorrência de first flush em bacia urbana brasileira2017

JACOMAZZI, M. A. et al. TENDÊNCIAS DE INTENSIFICAÇÃO DAS CHUVAS PARA AS SÉRIES PLUVIOMÉTRICAS NA REGIÃO DE CAMPINAS – SPXXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS. Anais...2019

JACOMAZZI, MARCO ANTONIO et al. PRECIPITAÇÕES HIDROLÓGICAS LEVES : CORRELAÇÃO DA SÉRIE PLUVIOGRÁFICA LEVES COM OS DADOS DE CHUVA DIÁRIAXXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS. Anais...Foz do Iguaçu: ABRHidro, 2019Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5787>. Acesso em: 3 maio. 2026

JOHANSON, F. T. et al. Light Rain Characterization in Piracicaba, São Paulo State, Brazil. Engenharia Agricola, v. 43, n. 1, p. 1–4, 2023.

JOHANSSON, F. T. et al. LIGHT RAIN FOR RUNOFF AND DESIGN DEPTH. Journal of Engineering Research, v. 4, n. 6, p. 2–13, 23 fev. 2024.

LAY, J. J. et al. Water Quality and the First-Flush Effect in Roof-Based Rainwater Harvesting, Part II: First Flush. Water (Switzerland), v. 16, n. 10, 2024.

LEE, B. C. et al. Characterizations of the first flush in storm water runoff from an urban roadway. Environmental Technology, v. 26, n. 7, p. 773–782, 2005.

LEE, J. et al. Optimal volume of non-point sources management detention considering spatio-temporal variability of land surface moisture condition. Desalination and Water Treatment, v. 53, n. 11, p. 3080–3087, 2015.

MANIQUIZ-REDILLAS, M. et al. First Flush Stormwater Runoff in Urban Catchments: A Bibliometric and Comprehensive Review. Hydrology, v. 9, n. 4, p. 1–22, 2022.

MELLO ROCHA, B. C. DE; REIS, R. P. A.; ARAÚJO, J. V. G. DE. Avaliação Do Volume Necessário De Descarte De Água De Chuva Escoada Sobre Coberturas De Diferentes Materiais. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 1, n. 2, p. 51–58, 2011.

ORLANDO, E. G. et al. Métodos para avaliação do fenômeno de first flush. v. c, p. 1–8, 1995.

PARK, D.; SONG, Y.-I.; ROESNER, L. A. Effect of the Seasonal Rainfall Distribution on Storm-Water Quality Capture Volume Estimation. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 139, n. 1, p. 45–52, 2013.

PERERA, T. et al. Taxonomy of influential factors for predicting pollutant first flush in urban stormwater runoff. Water Research, v. 166, 2019.

___. New conceptualisation of first flush phenomena in urban catchments. Journal of Environmental Management, v. 281, n.

June 2020, p. 111820, 2021.

RUSSO, C. et al. Improving the sediment and nutrient first-flush prediction and ranking its influencing factors: An integrated machine-learning framework. Journal of Hydrology, v. 616, n. November 2022, 2023.

SANSALONE, J. J.; CRISTINA, C. M. First Flush Concepts for Suspended and Dissolved Solids in Small Impervious Watersheds. Journal of Environmental Engineering, v. 130, n. 11, p. 1301–1314, 1 nov. 2004.

SILVA, M. K. DA; SILVEIRA, A. L. L. DA. Modelo para pré-dimensionamento de bacias de detenção para controle da poluição difusa das águas pluviais no município de Porto Alegre. 2012.

YANG, L. et al. Water quality improvement project for initial rainwater pollution and its performance evaluation. Environmental Research, v. 237, n. P1, p. 116987, 2023.

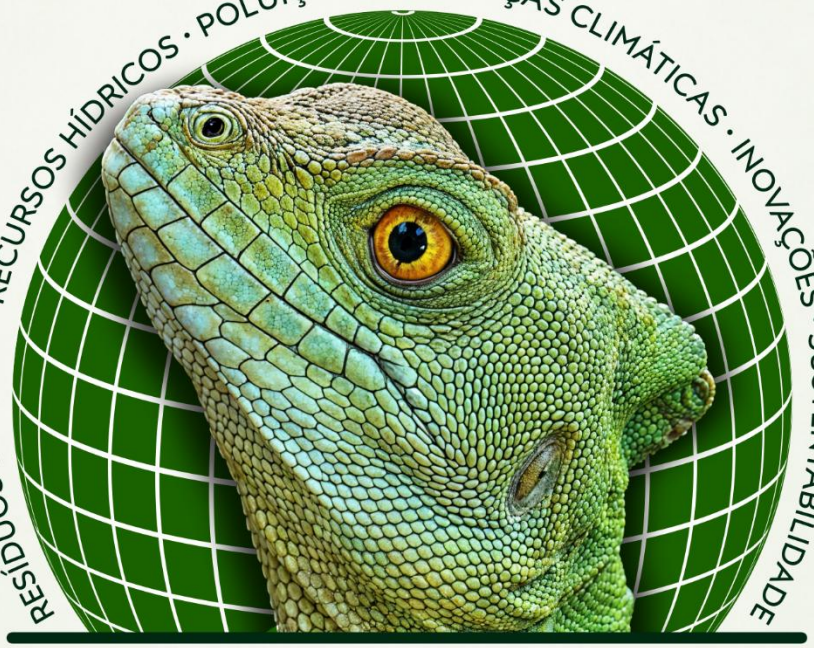
ZHANG, K. et al. Discussion about initial runoff and volume capture ratio of annual rainfall. Water Science and Technology, v. 74, n. 8, p. 1764–1772, 2016.

ZHANG, M. et al. Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization. Journal of Environmental Sciences, v. 22, n. 1, p. 40–46, 2010.

ZHENG, C. Control technology on surface runoff pollution: a review. International Conference on Mechanical, Electrical, Electronic Engineering & Science, p. 397–402, 1 maio 2018.

ÁREA TEMÁTICA 37

TECNOLOGIAS VERDES E INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

PLANEJAMENTO DE APP PARA GESTÃO SUSTENTÁVEL DA APICULTURA FAMILIAR

1Rodolfo Rocha Vieira Leocádio, 2Lavinia de Jesus Pereira, 3Matheus Silva Araujo, 4Sandra Aparecida Lima de Moura

1 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: rodolfo.leocadio@ufop.edu.br; 2 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: lavinia.pereira1@aluno.ufop.edu.br; 3 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: matheus.sa2@aluno.ufop.edu.br; 4 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: sandramoura@ufop.edu.br

Palavras-chave: Planejamento e controle da produção apícola; Apicultura familiar; Gêmeo digital.

Resumo

Realizar o manejo sustentável de um apiário enquanto comprova e registra as atividades desenvolvidas é desafiador. Por esse motivo, App's de gestão apícola vem sendo desenvolvidos com público alvo focado na indústria melífera. Portanto, o objetivo é planejar um app totalmente gratuito que se personaliza a cada apiário tornando-se seu gêmeo digital para torná-lo intuitivo e de fácil manuseio. Para isso, aplica-se Planejamento e Controle da Produção Apícola e acordo com as necessidades da apicultura familiar. O Diagrama Entidade-Relacionamento, que basicamente utiliza elementos gráficos para descrever o modelo de dados de um sistema com alto nível de abstração, é utilizado como método para execução da ideia. Foi elaborado o diagrama de Entidade-Relacionamento, considerando: Apicultor, Apiário, Produtos apícolas, Colmeia, Quadros de Mel, Quadros de cria, Pasto apícola e Flora apícola, em conjunto com suas características buscando fidelidade do gêmeo digital. O design do App também é apresentado concatenado com o diagrama.

Introdução

A produção de um apiário depende do seu manejo, buscando sempre sua sustentabilidade. Já a qualidade da produção depende da comprovação das atividades desenvolvidas e registros. Contudo, realizar ambas as tarefas de forma simultânea é uma tarefa desafiadora (PAULINO, 2004). A grande demanda de trabalho manual gerado pela implantação e manutenção sustentável de apiários, juntamente com a dificuldade de aquisição e organização do volume imenso de dados gerados, tem motivado esforços em elaborar Apps voltados para gestão apícola. Os apps que vem sendo mais utilizados no Brasil e que disponibilizam mais funcionalidades são Abelheiro – 2022 (https://www.abelheiro.com/), APIWEB – 2023 (https://apiweb.agr.br/), GeoApis – 2023 (https://geoapis.com.br/app-geoapis/) e o BBEE – Smart Apiculture – 2026 (https://ibbee.com.br/).

O Abelheiro é destinado ao uso profissional para grandes apicultores com a vantagem de permitir visualização de gráficos e relatórios para análise de produção e finanças gerados por um manejo detalhado. Já o APIWEB é mais simples e se destina a pequenos apicultores, tem foco em inspeções e manutenção, além de emitir alertas e notificações. O GeoApis engloba georreferenciamento de apiários em áreas agrícolas e é ideal para integração com o meio agrícola. Por fim, o BBEE – Smart Apiculture tem foco em planejamento de tarefas, portanto, é voltado a apicultores com uma visão gerencial com foco em metas de produção. Alternativas de outros países incorporam dificuldades de idioma, pois poucos tem tradução para o português do Brasil. O ApiManager (https://apimanager.net/) permite exportar os dados para Excel e CSV, além de montar equipes para manejo. Nenhum dos Apps tem seu público alvo no apicultor que está inserido em apicultura familiar sustentável e não são gratuitos. Algumas outras características dificultam ainda mais essa implantação: (i) o Abelheiro é complexo de usar; (ii) o GeoApis tem foco em agronegócio; (iii) o BBEE – Smart Apiculture possui funcionalidades técnicas reduzidas e; (iv) o ApiManager é traduzido para português de Portugal.

Portanto, nosso objetivo é planejar um app totalmente gratuito que se personaliza a cada apiário tornando-se seu gêmeo digital para torna-lo intuitivo e de fácil manuseio. Para isso, aplicou-se Planejamento e Controle da Produção Apícola (PCPA) de acordo com necessidades dos apicultores de forma sustentável baseado em fundamentação teórica da apicultura como uma indústria de insumos extrativista, modelou-se um diagrama de Entidade-Relacionamento com o fluxo de informações, banco de dados e interações humano-computador para executar o PCPA e projetou-se as especificidades básicas iniciais do App (Design e Telas). A seguir apresenta-se os materiais e métodos utilizados para modelar as entidades apícolas, seguido dos resultados e as discussões geradas pelo modelamento e; por fim, as considerações finais sobre o App elaborado em relação as necessidades do público alvo.

Material e Métodos

A modelagem conceitual objetiva a compreensão e representação do mundo real, de tal forma que ele possa ser traduzido em um modelo que capte os aspectos que se deseje estudar de uma realidade. O Diagrama Entidade-Relacionamento utiliza elementos gráficos para descrever o modelo de dados de um sistema com alto nível de abstração. O diagrama parte do princípio que o mundo real é formado por um conjunto de objetos chamados entidades e por relacionamentos entre esses objetos (FRANCK, PEREIRA e DANTAS FILHO, 2021). Seus elementos são apresentados na **Tabela 1**, e a definição de cada elemento é descrita como: (i) Entidade – Objeto ou conceito do mundo real que possui existência própria; (ii) Atributo – Propriedade ou característica de uma entidade ou relacionamento; (iii) Atributo chave – Atributo que identifica unicamente uma instância da

entidade; (iv) Relacionamento – Associação entre duas ou mais entidades; (v) Entidade fraca – Entidade que depende de outra (não tem chave própria); (vi) Relacionamento identificador – Relacionamento que conecta entidade fraca à sua entidade forte; (vii) Atributo multivalorado – Atributo que pode ter mais de um valor para a mesma entidade; (viii) Atributo derivado – Atributo cujo valor pode ser calculado a partir de outros atributos; (ix) Atributo composto – Atributo que pode ser dividido em subatributos menores, mas com significado próprio, formando um conjunto de informações e; (x) Cardinalidade – Define quantas ocorrências de uma entidade podem se relacionar com outra.

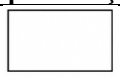
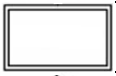
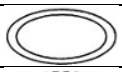
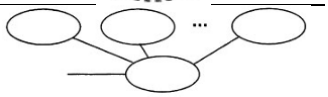
Elemento	Representação
Entidade	
Atributo	
Atributo chave	
Relacionamento	
Entidade fraca	
Relacionamento identificador	
Atributo multivalorado	
Atributo derivado	
Atributo composto	
Cardinalidade	1:1, 1:N, N:M

Tabela 6: Elementos de um Diagrama Entidade-Relacionamento.

Resultados e Discussão

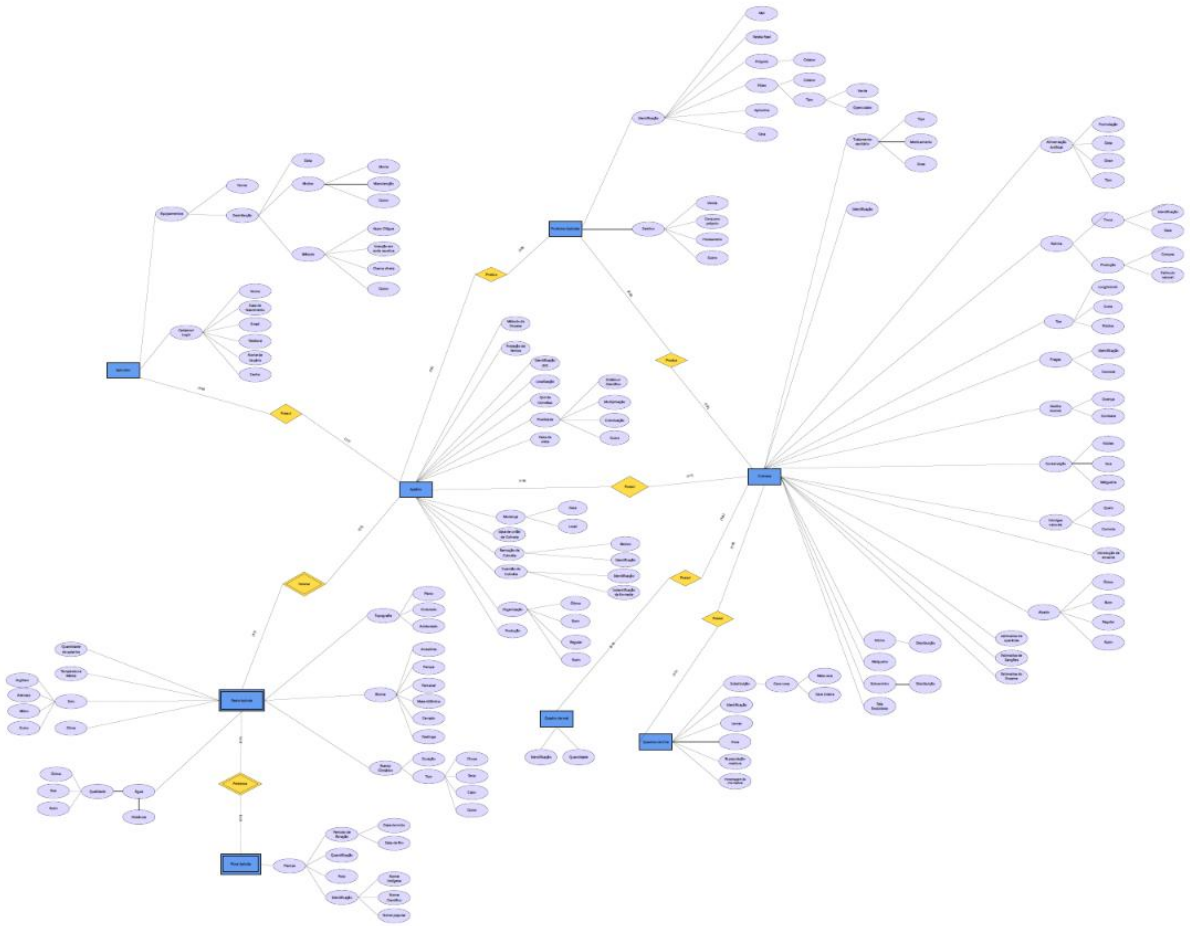
O Diagrama Entidade-Relacionamento completo (Figura 1a) foi elaborado intuitivamente buscando fidelidade ao seu gêmeo digital, baseado em cadernos de campo apícola de vários apicultores familiares. O detalhamento de seus atributos será discutido após a descrição das ênfases do mesmo diagrama ilustrado na Figura 1b. O elemento principal é o apicultor, o mesmo possui apiários de forma que um apicultor pode possuir vários apiários, mas um apiário somente pode estar associado a um apicultor. Essa convenção foi designada pelos autores, para simplificar a aplicação e defini-lo como principal.

O apiário possui colmeias, de forma que um apiário pode possuir várias colmeias, mas uma colmeia especifica somente pode estar em um apiário. A própria definição de apiário pode ser entendida como um conjunto de colmeias arranjados em uma mesma área. Portanto, é fisicamente impossível que uma colmeia possa estar em dois lugares ao mesmo tempo. As colmeias podem possuir quadros de cria (ninho e sobre ninho) e quadros de mel (melgueira) de forma que uma colmeia pode possuir vários quadros de cria e mel, porem um quadro de cria somente pode ser alocada em uma colmeia. A colmeia Langstroth (JOHANSSON e JOHANSSON, 1967) possui até 10 quadros de cria e 10 quadros de mel e estes também são fisicamente impossíveis que possam estar em dois lugares ao mesmo tempo.

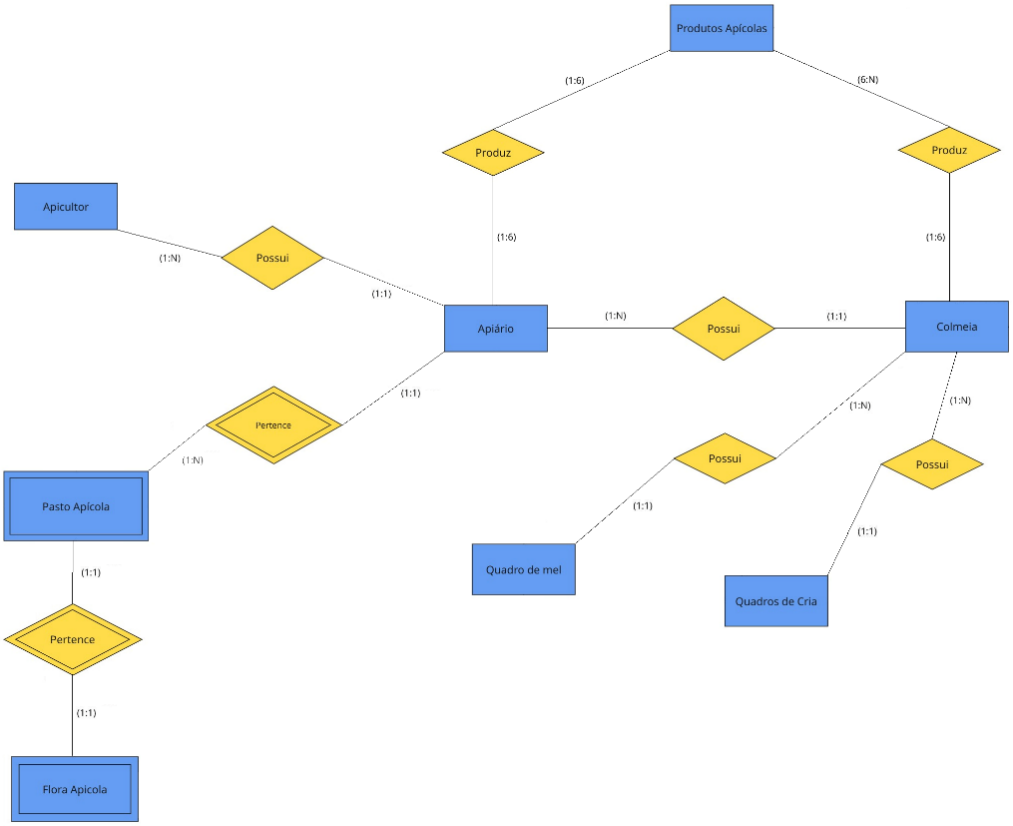
Seis produtos apícolas podem ser produzidos por um apiário e um apiário pode produzir seis produtos apícolas. Já seis produtos apícolas podem ser produzidos por inúmeras colmeias e uma colmeia pode produzir até seis produtos apícolas. Essa formulação é baseada em raciocínio logico considerando o layout do apiário e seus produtos apícolas.

Um apiário também pode pertencer somente a um pasto apícola, mas um pasto apícola pode pertencer a vários apiários. O pasto apícola é uma região delimitada pelo forrageamento das abelhas, portanto, não é impossível ter diversos apiários instalados na mesma área de forrageamento, sempre de apicultores diferentes. Contudo um apiário certamente deve estar situado em seu pasto apícola. E por fim, um pasto apícola pertence a uma flora apícola e uma flora apícola pode pertencer somente a um pasto apícola. A flora apícola é o conjunto de plantas que fornecem alimento (néctar e pólen) às abelhas em uma determinada região.

O objetivo da entidade Apicultor é caracterizar o responsável pela manutenção do apiário para ter uma rastreabilidade dos produtos apícolas e facilitar a comunicação. Para isso utilizou-se o atributo composto Login formado por Nome de usuário, Senha, Nome completo, Data de nascimento, Telefone e e-mail. Além disso, também é necessário confirmar se as boas práticas de manejo estão sendo realizadas corretamente. Tais práticas de manejo adequadas garantem a saúde e segurança das abelhas e a qualidade dos produtos apícolas. Assim, utilizou-se o atributo composto Equipamentos formado por Nome, e Desinfecção. Desinfecção é formado por Data, Motivo e Método. Motivo por sua vez é formado por Morte, Manutenção e Outro enquanto Método é formado por Vapor d'água, Imersão em soda caustica, Chama direta e Outro. O design das telas projetas vinculadas a esta entidade está apresentado na Figura 2.



(a)



(b)

Figura 5: Diagrama Entidade-Relacionamento (a) completo, (b) com ênfases do gêmeo digital.

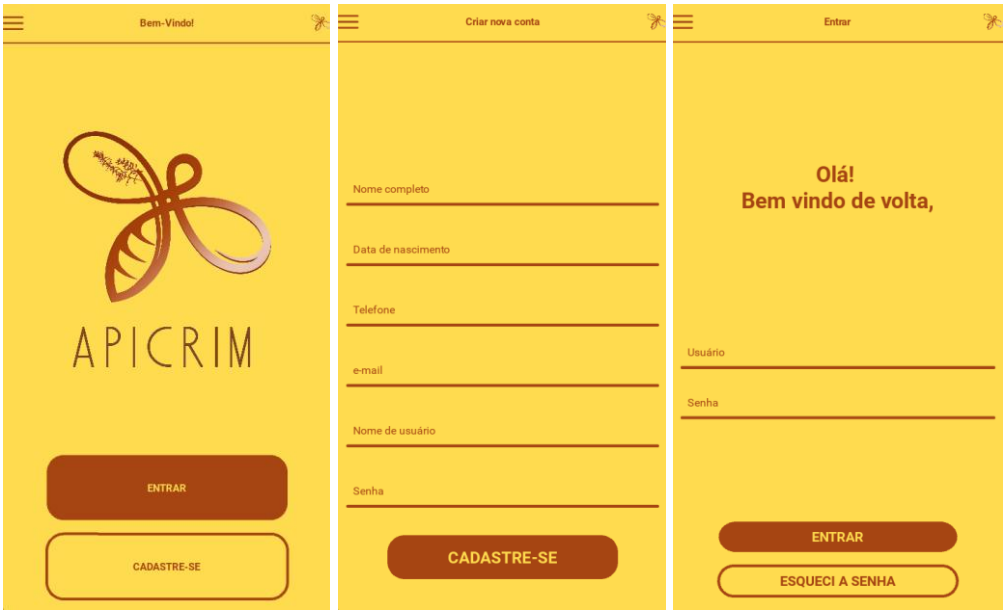


Figura 6: Telas do App baseadas na entidade Apicultor.

Já a entidade Apiário é importante para identificar problemas, tomar medidas corretivas, melhorar a saúde das abelhas, aumentar a produtividade e assegurar a qualidade dos produtos apícolas. Ele é formado por Método de limpeza, pois saber qual método é utilizado para a limpeza do apiário é importante para avaliar sua eficiência para a demanda; Proteção de ventos; Identificação (Nº); Localização, importante para facilitar o acesso, monitorar as condições ambientais e garantir conformidade; Quantidade de colmeias, evitando sobrecarga e disputa por alimento; Data da visita e Produção. Também temos atributos compostos como Finalidade da colmeia, que é formado por Didático/Cientifico, Multiplicação, Colonização, Outro; pois cada colmeia tem uma finalidade no apiário. Mudança de local do apiário (formado por Data e Local) para ajudar a identificar fatores ambientais ou locais que afetaram o desempenho das colmeias. Organização é formado por Ótimo, Bom, Regular e Ruim. Data de união de colmeia para reforçar as colmeias fracas fortalecendo o enxame, o que pode aumentar a produção dos produtos apícolas. Remoção de colmeia é formado pelos atributos Motivo e Identificação o que garante controle de doenças e pragas, avalia o impacto na produtividade, monitora problemas, ajusta práticas de manejo e mantem registros. Por fim, Inversão de colmeia ocorre para o fortalecimento dos enxames e é formado por Identificação e Identificação da formada. O design das telas projetas vinculadas a esta entidade está apresentado na Figura 3.

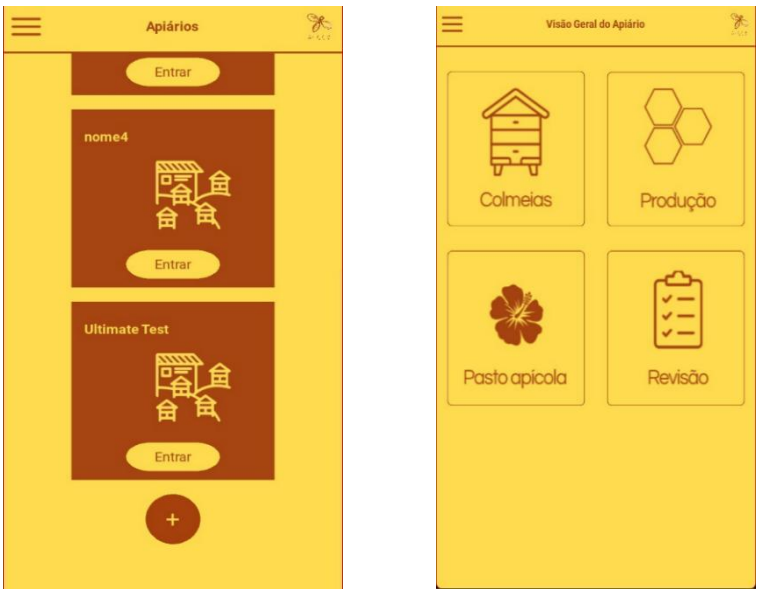


Figura 7: Telas do App baseadas na entidade Apiário.

O objetivo da entidade Colmeia é relatar o estado de cada colmeia individualmente. É formado pelos atributos Identificação, Introdução de enxame para fortalecer a colmeia, Estimativa de operarias, zangões e enxame para embasar decisões de divisão de enxames, reforço ou redução de densidade, mantendo boa taxa de forrageamento, introdução de Melgueira e Tela excluidora para controlar a atividade da rainha. A maior parte dos atributos que compõem a Colmeia são compostos. Ninho e

Sobre ninho são formados por Distribuição e informam sobre organização da colmeia. Os atributos Tratamento sanitário que é formado por Tipo, Medicamento, Dose; Abelha doente que é formado por Doença e Combate; Conservação que é formado por Núcleo, Isca e Melgueira; Pragas que é formado por Identificação e Controle e; Inimigos naturais formado por Quais e Controle, e informam sobre saúde da colmeia. A Alimentação artificial, formada por Formulação, Data, Dose e Tipo estimulam a qualidade dos produtos apícolas. O atributo Rainha é formado por dois outros atributos compostos, Troca (Identificação e Data) e Produção (Compra e Estimulo natural) e informam sobre a gestão da rainha. Ainda se tem dois outros atributos que informam sobre a situação da colmeia, Tipo formado por Langhstroth, Rústica e Outra e Alvado formado por Ótimo, Bom, Regular e Ruim. O design das telas projetas vinculadas as entidades Colmeia, Quados de cria e Quadros de mel estão apresentados na Figura 4.

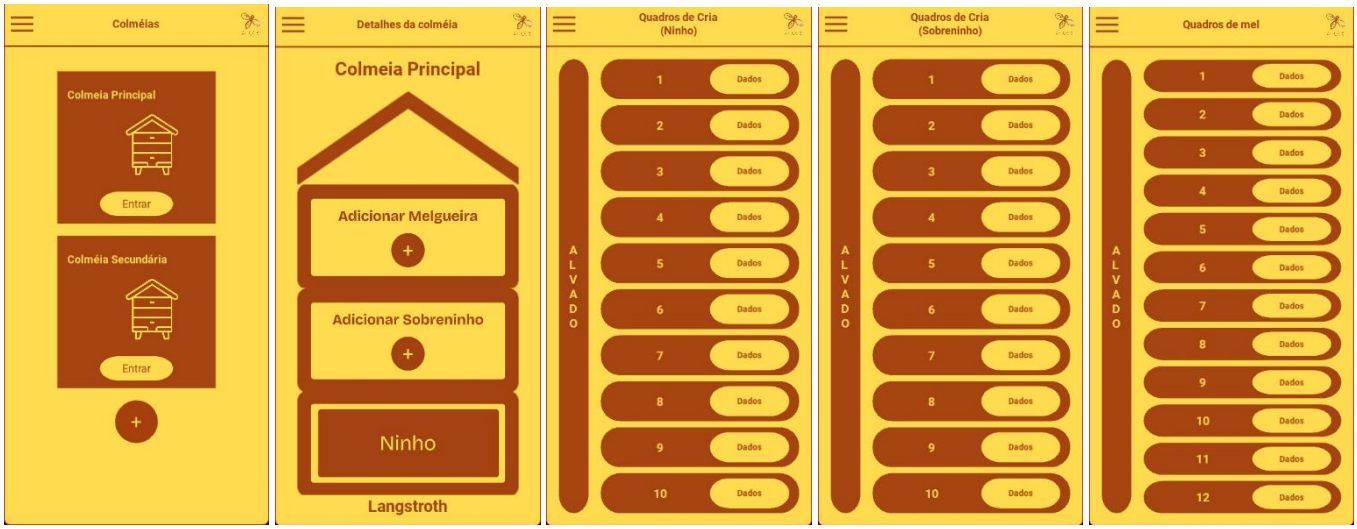


Figura 8: Telas do software baseadas nas entidades Colmeia, Quadros de cria e de mel.

No interior das colmeias podemos considerar duas entidades distintas, ambas informam sobre a produção da colmeia. A primeira, Quadros de Mel é formada por Identificação e Quantidade. A segunda, Quadros de cria é formada por Identificação, Larvas, Ovos, % população madura, % cria madura e pelo atributo composto Substituição formado por Cera nova que por sua vez, é formado por Meia cera e Cera inteira.

A entidade Produtos apícolas visa monitorar a produção do apiário por safra identificando padrões sazonais, comparar a produção entre diferentes períodos, e ajustar práticas de manejo e insumos para otimizar os rendimentos e aplicar o PCPA. O design das telas para registro dos produtos é apresentado na Figura 5. Este atributo é formado por dois atributos compostos Identificação e Destino. O primeiro é formado pelos seis produtos apícolas Mel, Geleia real, Própolis, Polen, Apitoxina e Cera. O Própolis ainda se divide em Coletor e o Polen se divide em Coletor e Tipo (Verde ou Operculado). O segundo é formado por Venda, Consumo próprio, Processamento e Outro.

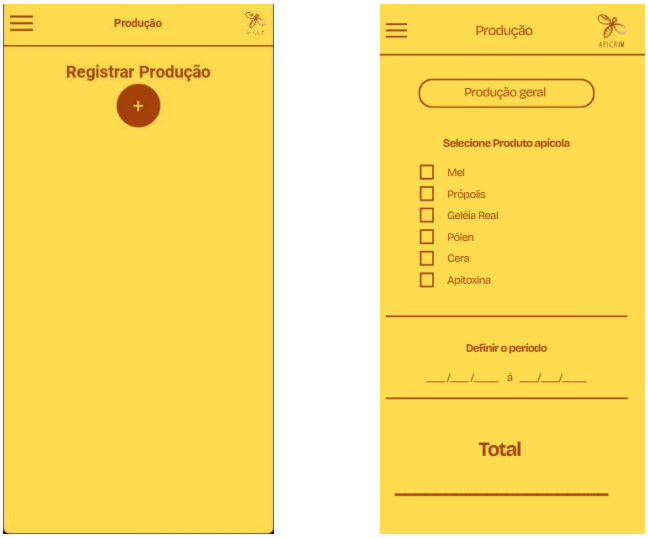


Figura 9: Telas do software baseadas na entidade Produtos apícolas.

A entidade fraca Pasto apícola depende de apiário e contém informações sobre a área de forrageamento das abelhas. É formada pelos atributos Quantidade de apiários, Temperatura média, Clima e pelos atributos compostos Solo, Água, Topografia,

Bioma e Evento climático; formados por Argiloso, Arenoso, Misto e Outro; Distância e Qualidade (Ótima, Boa e Ruim); Plano, Ondulado e Acidentado; Amazonia, Pampa, Pantanal, Mata atlântica, Cerrado e Caatinga e; Duração e Tipo (Chuva, Seca, Calor e Outro), respectivamente. O design das telas das entidades Pasto apícola e flora apícola estão apresentas na Figura 6, note que além de telas de cadastro, também existe uma tela para visualização e reconhecimento da flora.

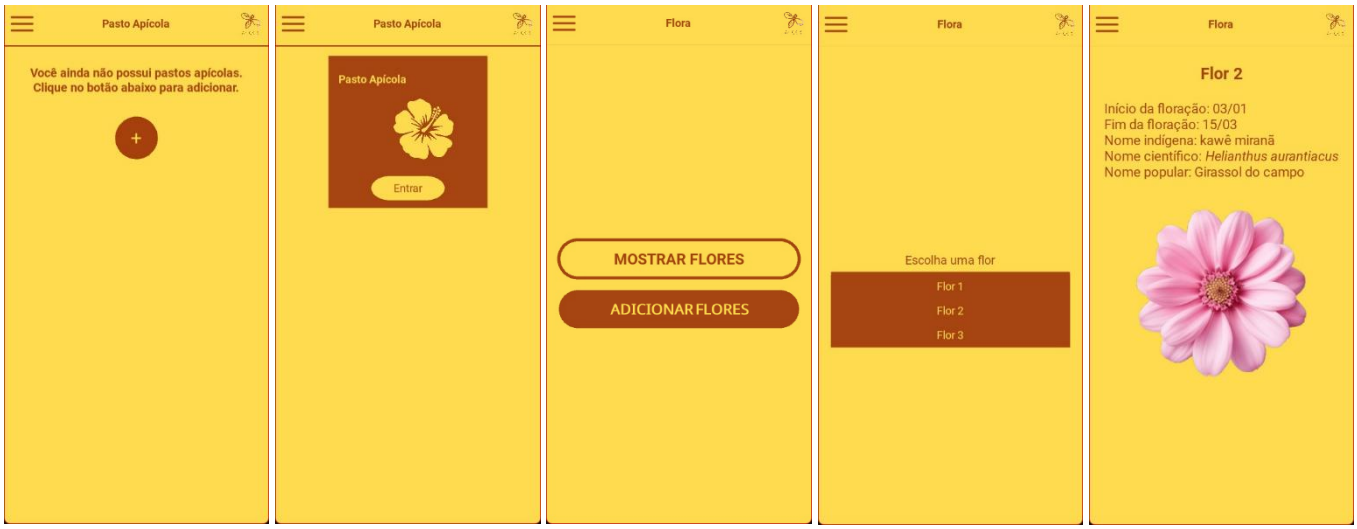


Figura 10: Telas do software baseadas nas entidades Pasto e Flora apícolas.

Por último, a entidade fraca Flora apícola, que depende de pasto apícola é essencial para formação do calendário apícola local personalizado. É formada pelo atributo composto Plantas, que contem Quantificação, Foto, Período de floração (Data de início e Data de fim) e Identificação (Nome indígena, Nome cientifico e Nome popular).

Considerações Finais

A fundamentação teórica deste trabalho considerou a organização social e funcionamento de colmeias naturais e artificiais, a colmeia Langstroth, o apiário, o pasto e o calendário apícola, o manejo sustentável e os produtos apícolas para elaboração do PCPA. Desta forma foi possível elaborar o diagrama de Entidade-Relacionamento, que se trata do próprio PCPA proposto em um gêmeo digital. Tal diagrama considerou: Apicultor, Apiário, Produtos apícolas, Colmeia, Quadros de Mel, Quadros de cria, Pasto apícola e Flora apícola; em conjunto com suas características, para sua construção. O design do App também é apresentado concatenado com o diagrama. O app está sendo implementado com a linguagem de programação Python, em conjunto com a biblioteca Kivy e o *build* para .apk utiliza o Buildozer em ambiente Linux (Ubuntu). A justificativa para a escolha é o ambiente facilitado para acoplamento de inteligência artificial e instrumentação das colmeias, que pretendemos implementar em trabalhos futuros.

O App apresenta a limitação de não ter interface Web, pois isso acarretaria custos monetários ao apicultor. Para trocas de informações, o App extrai as tabelas em formato .txt, que podem ser compartilhados de forma facilitada. Alocar um servidor gratuito para acompanhamento dos apiários também é tema de trabalhos futuros, juntamente com telas para *feedback* e previsões que guiarão o apicultor.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, ao Laboratório Multiusuário de Práticas Simuladas (LaMPS) pela infraestrutura oferecida e ao Grupo de Pesquisas em Tecnologias Sociais e Apícolas e Recuperação de Áreas degradadas (APICRIM) pelo suporte técnico.

Referências Bibliográficas

FRANCK, K. M.; PEREIRA, R. F.; DANTAS FILHO, J. V. Ratio-Entity Diagram: a tool for conceptual data modeling in Software Engineering. Research, Society and Development, v. 10, p. e49510817776, July 2021. Disponivel em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/17776>.

JOHANSSON, T. S. K.; JOHANSSON, M. P. Lorenzo L. Langstroth and the Bee Space. Taylor & Francis, v. 48, p. 133#-#143, 1967. Disponivel em: <https://doi.org/10.1080/0005772X.1967.11097170>.

PAULINO, F. D. G. Apicultura–Manual do Agente de Desenvolvimento Rural. Brasília, DF: SEBRAE: Alimentação Artificial, cap, v. 13, p. 107–114, 2004.

IDENTIFICAÇÃO DE GRÃOS DE PÓLEN EM ANÁLISES DE MÉIS DA CIDADE DE UNISTALDA-RS

1Amanda Naressi Colpo, 2Betina Machado Ferrari, 3Elloyse Malavolta Brasil, 4Maximiliano Oliveira da Silva, 5Júlio César Wincher Soares, 6Cisnara Pires Amaral

1 Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - URI, e-mail: 065552@urisantiago.br ; 2 Escola de Educação Básica da URI, e-mail: 097440@urisantiago.br; 3 Escola de Educação Básica da URI, e-mail: 065500@urisantiago.br ; 4 Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões- URI, e-mail:maximiliano.silva@urisantiago.br ; 5 Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, e-mail: gabinete@urisantiago.br ; 6 Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, e-mail:cisnara.amaral@urisantiago.br

Palavras-chave: Melissopalinologia; grão de pólen; sustentabilidade.

Resumo

O mel é um produto natural complexo, composto por uma variedade de substâncias químicas que conferem suas propriedades únicas capazes de auxiliar o ser humano em diversos aspectos de sua saúde, sendo seus principais constituintes formados por carboidratos, representados pela frutose e glicose que representam cerca de 82% de sua composição total, e a água (Garcia-Chaviano *et al.,* 2022). Nesse produto ainda se encontram uma série de componentes secundários como vitaminas, compostos fenólicos, enzimas e aminoácidos, porém esses componentes são variáveis de acordo com as flores da polinização, localização geográfica da colmeia, espécies de abelha e solo (Cruz, 2018). A qualificação desse produto fortalecerá a cadeia apícola, popularizando o conhecimento científico. Dessa forma, o objetivo desse trabalho consiste em identificar, através da técnica da melissopalinologia, os tipos de grãos de pólen encontrados em amostras de mel do município de Unistalda/RS, auxiliando os estudos sobre tipos de floradas e sua importancia econômica. Para isso, realizou-se análises no Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Santiago utilizando a técnica da melissonopalinologia levando em consideração o método adaptado de acetólise descrito por Lain e Ferreras (1999). Os resultados demonstraram que apesar das perdas no Bioma Pampa relacionados a degradação ambiental, diferentes grãos de pólen são encontrados nos méis analisados, diferindo a predominância dos grãos por regiões analisadas. Porém, em ambas as localidades foram encontradas a família Fabacea, como uma das mais proeminentes desse estudo. A análise da estrada da Porteirinha apresentou em grande concentração a família Fabaceae e em menor proporção as famílias Asteraceae e Anacardiaceae. Já a análise do Rincão dos Pavanelos apresentou grande variedade de Fabaceas e Apoaceas. Notou-se a diversidade de grãos-de-pólen e sua importancia para a conservação do nicho ecológico das abelhas. O trabalho reforçou a predominância de famílias de plantas encontradas na região Sul do país, principalmente as Fabaceas plantas que fatores diretamente relacionados a qualidade e ao sabor do produto.

Introdução

O Bioma Pampa é um dos seis biomas brasileiros, encontra-se no território nacional, ao sul do estado do Rio Grande do Sul. Inserido no domínio dos campos sul-americanos, abrangendo Argentina e Uruguai, caracteriza-se por extensas áreas de campos naturais, com relevo suavemente ondulado, clima subtropical e predominância de vegetação herbácea, composta principalmente por gramíneas e outras espécies campestres. Esse bioma apresenta elevada diversidade biológica, especialmente florística, e conta com a produção de um produto de excelência comprovada para a saúde, o mel.

Esse trabalho apresenta a análise de mel de uma das regiões centro-oeste do estado do Rio Grande do Sul, utilizando a técnica da Melissopalinologia, constituindo um parâmetro para verificar a origem botânica e geográfica do mel, estabelecendo a importância desse produto para a saúde humana. Sendo assim, o objetivo desse estudo consiste em identificar, por meio da técnica da melissopalinologia, os tipos de grãos de pólen encontrados em amostras de mel do município de Unistalda/RS. O conhecimento das floradas poderá auxiliar a certificação desse produto, indo ao encontro do que preconiza a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) em relação ao Objetivo do Desenvolvimento Sustentável, meta nº 2, que visa alcançar até 2030 a fome zero e a agricultura sustentável, para garantir a produção de alimentos de forma eficiente e ambientalmente responsável, contribuindo para a segurança alimentar e a resiliência das comunidades rurais.

Segurança alimentar se adquire através de parcerias que consigam abranger a cadeia de produção do mel, desde a polinização até o consumo do produto final, etapas que garantem a qualidade do mesmo. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) estabelece, por meio da Instrução Normativa nº 11, de 20 de outubro de 2000, a identidade e os requisitos mínimos de qualidade, características sensoriais e físico-químicas, que o mel destinado ao consumo humano direto deve apresentar (Brasil, 2000). Entretanto, essas informações obrigatórias da qualidade do mel, não chegam até o consumidor final. Observa-se que o consumidor está cada vez mais atento e preocupado com os produtos alimentícios que consome, visando aliar boas escolhas alimentares com a qualidade de vida e saúde.

Material e Métodos

O estudo para preparação e montagem de lâminas ocorreu no laboratório de Tecnologia de Alimentos da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Santiago, levando em consideração o método adaptado de acetólise

descrito por Lain e Ferreras (1999) onde foram pesados 10g de mel em um bécker, adicionado ao mesmo 20ml de água acidificada (5ml de ácido súlfurico concentrado por 1000ml de água destilada) e homogeneizado em um agitador termomagnético a 40ºC, mantendo a agitação por 1 minuto.

Após, o líquido foi dividido em dois tubos de ensaio e centrifugado por 10 minutos a 2.500 rpm. Descartou-se o líquido sobrenadante e o sedimento foi dissolvido em 10 ml de água destilada, centrifugado por 5 minutos a 2.500 rpm. O líquido foi eliminado com auxílio de pipeta descartável até atingir 0,5 ml de sedimento. Acrescentou-se ao sedimento 0,1 ml de glicerina 50%, realizando a homogeneização de forma manual. Foi realizado esfregaço, colocando a lamínula e análise microscópica.

As amostras foram doadas das regiões noroeste do estado do Rio Grande do Sul, das cidades de Itacurubi e Bossoroca. As análises foram realizadas em triplicatas, em dias alternados, e foram montadas 3 lâminas de cada amostra. Durante a análise microscópica, foram registradas 15 fotos de cada amostra, totalizando 45 imagens selecionadas.

Resultados e Discussão

Para interpretação de dados, levou-se em consideração a rede de catálogos polínicos online (RCPol), artigos de Radaeski *et al*. (2011); Evaldet *et al.* (2009), Radaeski *et al*. (2014), Atlas de Pollen de I'Université de Montepellier e Pollen Atlas . Os resultados da análise da estrada da Porteirinha apresentaram sete tipos de grãos de pólen, conforme a Figura 1.

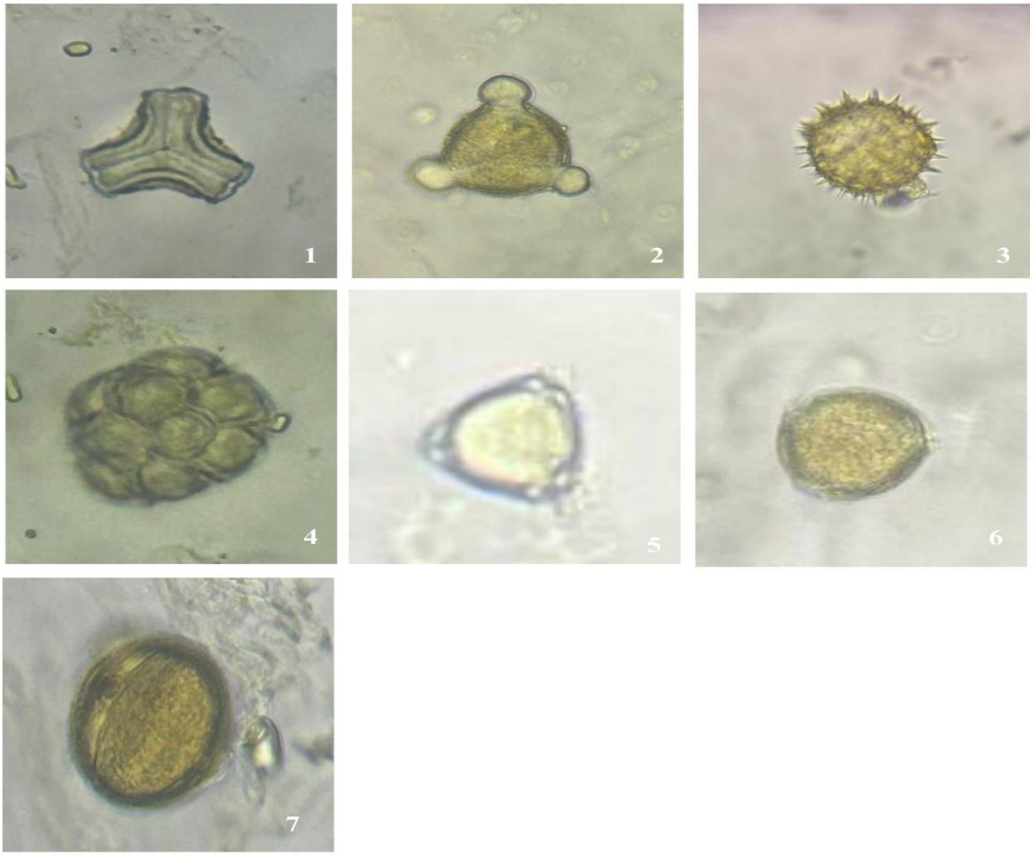


Figura 01: Amostras de grão-de-pólen visualizadas na microscopia óptica referente a estrada da Porteirinha – Unistalda/RS. Fonte: Acervo dos autores (2026)

A análise demonstrou que o grão-de-pólen mais predominante foi representado pela família das Fabaceae, identificado na Figura 1 pelos números 1, 2, 4, 5 e 7. Nota-se a diversidade na morfologia dessa família, sendo que o grão mais proeminente apresentado em todas as lâminas foi o número 2. Também verificou-se pólen da família Asteraceae, representada pelo grão-de-pólen número 3, plantas que podem ser representadas pelo girassol, margarida, dente-de-leão, carqueja, plantas estas adaptadas a campos limpos e a regiões antrópicas.

Ainda encontramos a descrição morfológica da família Anacardiaceae representada pela imagem número 6, tendo como um dos representantes as plantas conhecidas como aroeira, entre outras.

Os grãos de pólen são estruturas microscópicas encontradas em plantas fanerógamas, classificadas como gimnospermas e angiospermas, relacionadas com a reprodução das plantas e perpetuação de espécies. Esses grãos são transportados por insetos como abelhas, que se tornam fundamentais para a sobrevivência do ecossistema (Freitas; Vieira, Novaes, 2022). Sendo assim, a análise desses grãos em microscopia irá favorecer o estudo da diversidade de plantas e quais são as utilizadas pelas abelhas. O reconhecimento dos tipos polínicos e sua provável associação a alguns ecossistemas podem auxiliar na interpretação de registros subfósseis, possibilitando refinar a resolução taxonômica de estudos polínicos (Evaldt *et al.*; 2009).

Além de que, durante o manuseio em microscopia óptica, nem sempre é possível identificar grãos de pólen dispersos individualmente, além do nível genérico (Blackmore *et al*.; 2003).

Durante as análises, apareceram alguns grãos de pólen da família Asteraceae, em menor proporção. Essas plantas apresentam ampla variação de características, podendo ser herbáceas a arbóreas, com caule geralmente subcilíndrico, não-alado ou por vezes alado, apresentando folhas simples, alternas ou opostas, com flores monóclinas, díclinas ou neutras (Hattori; Nakajima, 2008). Essas plantas podem ser representadas pela marcela, pelas vassouras e cipós, entre outras.

Em relação à família Fabaceae, que apresenta a maior diversidade de grãos encontrados, sabe-se que também são representadas pelas leguminosas, sendo uma das culturas mais importantes do estado do Rio Grande do Sul, encontrada especialmente no Bioma Pampa e na Mata Atlântica. Apresentam diversas vantagens em cultivo exclusivos ou consorciados, têm alta produção de massa verde, alta concentração de proteína nas folhas e potencial para incrementar nitrogênio no solo (Martins *et al*.; 2019).

Nota-se que os criadores promovem a biodiversidade no cultivo dessas plantas, pois servem de abrigo para predadores e parasitoides, microclimas favoráveis para produção de frutas, auxiliando na reciclagem de nutrientes, no fornecimento de néctar e pólen para abelhas, aumentando a sustentabilidade global (Wollf, 2008).

Os benefícios gerados pelo plantio de leguminosas no RS são muito amplos, pois atuam diretamente no ciclo do nitrogênio e são plantas representadas por espécies como alfafa, trevos, cornichão, pega-pegas. Mas podem ser representadas por árvores, como timbaúva, espinilho, coronilha, angico, guandu, quebra-foice, maricá ou ainda por feijão-vagem, ervilha, ou lavouras de soja, feijões, amendoim, lentilha e grão-de-bico (Wollf, 2008).

Os estudos ainda verificaram poucos grãos de pólen da família Anacardiaceae, representada por 53 espécies, sendo 13 endêmicas e distribuídas em 14 gêneros. São espécies encontradas em todos os biomas brasileiros, possuem importância econômica na ornamentação, alimentação, na medicina e na indústria (Silva-Luz; Pirani; 2015; Reis *et al*., 2014).

O trabalho reforça a predominância de famílias de plantas encontradas na região Sul do país, fatores diretamente relacionados à qualidade e ao sabor do mel (Novaes, 2025).

Esse fato torna-se importante, pois o Bioma Pampa vem sofrendo degradação e descaracterização de paisagem de forma constante e tem a menor proporção de áreas protegidas (Michel; Overbeck, 2024). Para reforçar esse parâmetro, o Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomas) relata que esse bioma sofreu perda considerável de vegetação nativa nos últimos 36 anos (MapBiomas, 2022). Daí a necessidade de estudos para verificar o tipo de interação abelha-planta.

Apesar do declínio das colônias, as abelhas *Apis melífera* ainda são as mais encontradas e utilizadas no RS e sua capacidade de polinizar diferentes tipos de plantas faz com que a espécie esteja entre as preferidas entre os apicultores, pois têm população com alto índice populacional, têm hábitos generalistas em busca de recursos, são de fácil manejo e possuem ampla distribuição geográfica (Garófalo, 2014).

A Figura 2 apresenta 7 tipos de grãos de pólen verificados durante a análise da localidade Rincão dos Pavanelos.

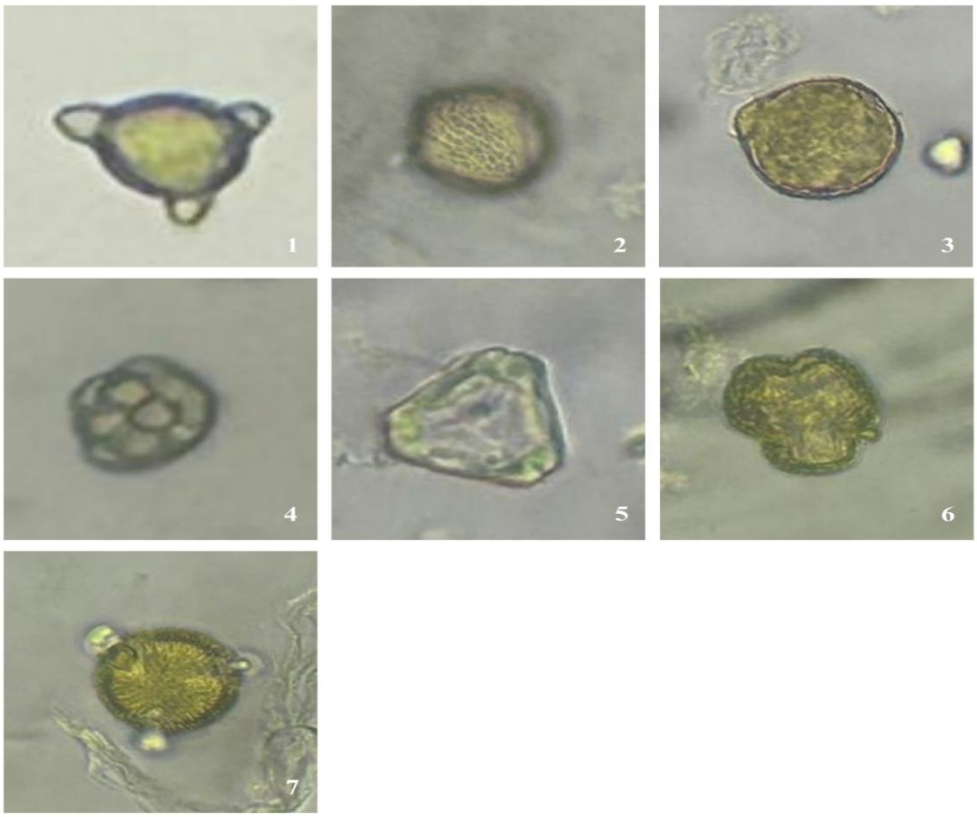


Figura 02: Amostras de grão-de-pólen visualizadas na microscopia óptica referente a localidade Rincão dos Pavanelos – Unistalda/RS. Fonte: Acervo dos autores (2026)

Durante as análises, observou-se a predominância da família Poaceae, conforme a Figura 2, representada pelos números 2 e 3. Os demais grãos de pólen, todos são da família Fabaceae. A família Poaceae é representada pelas gramíneas, principais determinantes da fisionomia dos campos do Sul do Brasil, com um número considerável de espécies (Pillar *et al*., 2009; Pillar; Lange 2015). Ressalta-se a dificuldade de realizar análises de pólen dessa família, pois Poaceae apresentam grãos de pólen com diferentes aberturas, número de aberturas e tamanho dos grãos (Radaeski *et al*. 2017).

Ainda deve-se considerar que 80% das espécies de Poaceae estão distribuídas no RS, no bioma Pampa (Longhi-Wagner, 2012). As Fabaceas, utilizadas no RS, constituem uma ferramenta para elevar a qualidade da dieta de animais criados na região dos pampas, contribuindo para a autossustentabilidade do sistema produtivo, melhorando as propriedades físico-químicas e biológicas do solo (Costa *et al*., 2017).

Observa-se a predominância em ambas as análises de plantas da família Fabaceae, plantas cultivadas no RS e com um grande poder econômico. O trabalho demonstra a diversidade de nutrição das abelhas, comprovando que a ação polinizadora para diferentes culturas, observando que o comportamento de busca de alimento depende do ambiente externo, ou seja, da composição floral da paisagem. Nota-se que as abelhas encontram recursos dinâmicos e variáveis, enfrentando desafios significativos em termos de posição geográfica, diversidade, quantidade e qualidade de pólen (Tsuruda; ChaKrabarti; Sagili, 2021).

Importante considerar que nesse Bioma encontra-se uma ordem botânica cosmopolita, denominada Fabales, englobando 4 famílias presentes no Brasil: Fabaceae, Polygalaceae, Quillajaceae e Surianaceae. No Pampa, são registrados 74 gêneros de Fabales, sendo 70 formados pelas leguminosas, e 3 espécies da família Polygalaceae e 1 família Quilajáceae (Flora e Funga do Brasil, 2024).

Ainda deve-se considerar que Fabaceae compreende cerca de 800 gêneros, sendo a terceira família de angiospermas com maior riqueza de espécies, apresentando também representantes de diversos tipos de hábito que podem ser representados por arbustos, árvores, ervas, trepadeiras e leguminosas (Flora e Funga do Brasil, 2024).

Considerações Finais

Conclui-se que o mel é um produto que necessita de estudos, que a técnica de melissopalinologia é capaz de permitir o estudo do grão de pólen de diferentes áreas, permitindo o estudo botânico e taxonômico. Que essa técnica auxilia a certificação e a qualidade dos produtos produzidos a partir da utilização do mel, além de auxiliar a identificação da paisagem florística encontrada em um bioma. O estudo em questão deixou claro a diversidade botânica encontrada na região centro-oeste do estado do Rio Grande do Sul. Essa diversidade se apresenta nas diversas formas de grãos visualizados em microscopia. Salienta-se a predominância de grãos de pólen da família Fabaceae, encontrados nas 2 amostras, e que, caracterizam plantas que constituem o bioma Pampa. Em relação às diferenças, deve-se considerar a predominância dos grãos de pólen por regiões analisadas, sendo mais predominante na Estrada da Porteirinha os grãos de pólen provenientes da família Fabaceae e registros de pólens das famílias Anacardiaceae e Asteraceae em menores proporções. Já na análise de mel do Rincão dos Pavanelos, foi encontrada a predominância de grãos de pólen da família Poaceae e Fabaceae. Em relação à família Fabaceae deve considerar a importância biológica dessas plantas para o ecossistema e para a manutenção das diferentes espécies de abelhas que constituem o Pampa; além do valor econômico dessas cultivares como ferramenta de sustentabilidade.

Agradecimentos

Aos apicultores que gentilmente realizaram a doação de mel para o estudo.

Referências Bibliográficas

BLACMORE, Stephen *et al*. Betulaceae e Corylaceae. **Revista de Paleobotânica e Palinologia**, v.123, n.1-2, p.71-98, 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Instrução Normativa MAA 11/2000**. Brasília, 2000. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-animal/legislacao/IN112000RTmel.pdf. Acesso em julho 2025.

COSTA, Pablo Tavares *et al*. Fabáceas forrageiras de estação quente no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil: uma revisão. RedVet, v.18, n.9. p.1-15, 2017.

CRUZ, Larissa Farias da. **Efeito do tempo e temperatura de armazenamento sobre os parâmetros físicos-químicos, microbiológicos e compostos bioativos do mel de Melipona scutellaris**. 90 fls. Dissertação ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2018.

EVALDT, Andreia Cardoso Pacheco *et al*. Grãos de pólen e esporos do vale do Rio Caí, nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil: descrições morfológicas e implicações paleoecológicas. **Jornal of Geoscience**, v.5, n.2, p.86-106, 2009.

FREITAS, Wagner Tenorio; VIEIRA, Thiago Almeida; NOVAIS, Jailson Santos de. Grãos de pólen revelam flora compartilhada por três espécies de abelhas nativas (Apidae: Meliponini) no baixo Amazonas, Pará, Brasil. **Holos**, v.6, e9921, 2022.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. Versão online da lista de espécies da flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: http://floradobrasil.jbrj.gov.br/. Acesso em out. 2025.

GARCÍA-CHAVIANO, María Elena et al. Composición química de la miel de abeja y su relación con los beneficios a la salud. **Revista Médica Electrónica**, v. 44, n. 1, p. 1–13, 1 jan. 2022.

GARÓFALO, Carlos Alberto. A importancia das abelhas e de suas atividades polinizadoras: um serviço ecossistêmico. *In:* SILVA, Claudia Inês (Org.). **Catálogo polínico das plantas usadas por abelhas no campus da USP de Ribeirão Preto**.1ª ed. Ribeirão Preto, SP: Holos, 2014.

HATTORI, Eric Koiti Okiyama; NAKAJIMA, Jimi Naoki. A família Asteraceae na estação de pesquisa e desenvolvimento ambiental Galheiro, Perdizes, Minas Gerais, Brasil**. Rodriguésia**, v.59, n.4, p.687-749, 2008.

LAIN, Concepcion Sainz; FERRERAS, Carmen Gomez. **Mieles Españolas:** características e identificación mediante el análisis del polen. Editoral Aedos, s. a. 1999.

MAPEAMENTO ANUAL DA COBERTURA E USO DO SOLO DO BRASIL (MAPBIOMAS). Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/o-projeto/ Acesso em março 2026.

MARTINS, Carlos Roberto *et al*. **Leguminosas na fruticultura: uso e integração em propriedades familiares do Sul do Brasil.** Brasília, DF: Embrapa, 2019.

MICHEL, Thais; OVERBECK, Gerhard. Review of ecological restoration in the Brazilian Pampa. **Ecosystems,** v.96, n.4, p.1-21, 2024.

MISSIO, Evandro Luiz *et al*. **Características das sementes de frutíferas nativas da família Myrtaceae com ocorrência no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEAPI/DDPA, 2023.

NOVAES, Flávia Santos Vieira. **Diversidade da flora apícola em uma região do Bioma Pampa: uma abordagem integrada entre Palinologia e DNA metabarcording**. 78 fls. Dissertação de Mestrado em Ciências Biológicas. Universidade Federal do Pampa. São Gabriel, 2025.

OREME. **Atlas de Pollen de l'Université de Montpellier**. Disponível em: https://data.oreme.org/palyno/palyno_gallery Acesso março de 2026.

ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. Agenda 2030. Brasil. Disponível em: https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>, Acesso em nov 2025.

PILLAR, Valério de Patta *et al.* **Campos Sulinos – conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2009.

PILLAR, Valério de Patta.; Lange, Omara. 2015. **Os Campos do Sul**. Porto Alegre: UFRGS. 192 p.

POLLEN ATLAS. Ministry of Agriculture. **Atlas de Pollen de l'Université de Montpellier**. Disponível em: https://pollenatlas.net/atlas/pollen-profiles, Acesso em out 2025.

RADAESKI, Jefferson Nunes *et al.* Diversidade de grãos de pólen e esporos dos Campos do Sul do Brasil: descrições morfológicas e implicações paleoecológicas. **Iheringia**, Série Botânica, v.69, n.1, p.107-132, 2014.

RADAESKI, Jefferson Nunes *et al.* Grãos-de-pólen das formações campestres sul-brasileiras. **Revista de Iniciação Científica da Ulbra**, 2011. Disponível em: https://rcpol.mn.ufrj.br/wp-content/uploads/2016/07/116-Radaeski-et-al.-2011-Gr%C3%A3os-de-p%C3%B3len-das-forma%C3%A7%C3%B5es-campestres-sul-brasileiras.pdf, Acesso em nov 2025.

RADESKI, Jefferson Nunes *et al***. Pólen de gramíneas sul-brasileiras**. 1ª edição. Canoas: Gráfica Epecê, 2017.

RADESKI, Jefferson Nunes; EVALDT, Andreia Cardoso Pacheco; BAUERMANN, Soraia Girardi. Grãos de pólen de espécies ocorrentes na Unidade de Conservação Parque Nacional do Espinilho, Barra do Quaraí, Rio Grande do Sul, Brasil. Pesquisas Botânicas, 2014. Disponível em: https://rcpol.mn.ufrj.br/wp-content/uploads/2018/03/114-Radaeski-et-al.-2014-Gr%C3%A3os-de-p%C3%B3len-de-esp%C3%A9cies-ocorrentes-na-Unidade-de-Conserva%C3%A7%C3%A3o-Parque-Estadual-do-Espinilho-Barra-do-Quara%C3%AD-Rio-Grande-do-Sul-Brasil.pdf, Acesso em março 2026.

REDE DE CATÁLAGOS POLÍNICOS ONLINE (RCPOL). Disponível em: https://rcpol.mn.ufrj.br/pt/home/. Acesso em março 2026.

REIS, Ana Luiza Lopes Ernesto. *et al*. Caracterização anatômica e histoquímica de raízes e folhas de plântulas de Anacardium occidentale L. (Anacardiaceae). **Revista Árvore**, v. 38, p. 209-219, 2014.

REIS, Hélio Souza dos *et al*. Floristic characterization and pollen morphology of plants visited by Apis mellifera L. in caatinga areas in Bahia, Brazil. **Acta Botanica Brasílica**, v. 37, p. e20220264, 2023.

SILVA-LUZ, Cíntia L.; PIRANI, José Rubens. Anacardiaceae in: Lista de Espécies da Flora do Brasil para 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, v. 17, p. 2020, 2015.

TSURUDA, Jennifer; CHAKRABARTI, Priyadarshini; SAGILI, Ramesh. Honey Bee Nutrition. **Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice**, v.37, n.3, p.505-519, 2021.

WOLLF, Luís Fernando. **Aspectos físicos e ecológicos a serem considerados para a correta localização de apiários e instalação das colmeias para a apicultura sustentável na região Sul do Brasil**. 1ª ed. Pelotas: Embrapa, 2008. Disponível em: file:///D:/User-%20NAO%20APAGAR/Downloads/doc238webIncluido.pdf. Acesso em março 2026.

SUSTENTABILIDADE INTEGRADA: COMO A "ÁRVORE URBANA" ALIMENTA A TECNOLOGIA E COMBATE O CALOR COM A ÁGUA DA CHUVA

1 Amanda Gabriella Vieira Soares, 2 Carolina Domingues Marinho, 3 Felipe Gouveia Sanguinetti, 4 Gabriel Bernardino Cardoso, 5 Matheus César Andrade Januario, 6 Micaella Raíssa Falcão de Moura, 7 Pedro Lucas Oliveira Lins e 8 Simone Rosa da Silva

1 Universidade de Pernambuco, e-mail:agvs@poli.br; 2 Universidade de Pernambuco, e-mail: cdm1@poli.br; 3 Universidade de Pernambuco, e-mail: fgs@poli.br; 4 Universidade de Pernambuco, e-mail: gbc2@poli.br; 5 Universidade de Pernambuco, e-mail: mcaj@poli.br; 6 Universidade de Pernambuco, e-mail: micaella.raissa@upe.br; 7 Universidade de Pernambuco, e-mail:plol@poli.br; 8 Universidade de Pernambuco, e-mail: simonerosa@poli.br

Palavras-chave: Tecnologias verdes. Captação de água. Conforto térmico.

Resumo

O crescimento urbano desordenado e o aumento das superfícies impermeáveis intensificam os desafios relacionados à drenagem, ao conforto térmico e à gestão de recursos naturais nas cidades. Diante desse contexto, o presente artigo apresenta a proposta da "Árvore Urbana", uma estrutura modular multifuncional que integra geração de energia solar, captação e reaproveitamento da água da chuva e sistemas de resfriamento evaporativo, promovendo sustentabilidade e conforto térmico em espaços públicos. O desenvolvimento foi fundamentado nas normas da ABNT, especialmente as NBR 15527:2019, 16690:2020 e 5410:2023, assegurando conformidade técnica e segurança operacional. O estudo envolveu levantamento de dados climáticos e hídricos locais, dimensionamento hidráulico e elétrico, análise estrutural e estimativa de custos. Os resultados demonstraram que o sistema é autossuficiente em energia, com potencial de eficiência hidráulica de 85% e redução térmica média de 4,2 °C, além de apresentar viabilidade técnica e econômica.

1. Introdução

O crescimento urbano desordenado e o aumento das áreas impermeáveis têm agravado problemas de drenagem, gestão de recursos hídricos e ilhas de calor nas cidades. Diante disso, torna-se essencial desenvolver soluções integradas que unam inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental, promovendo o uso racional da energia e da água no meio urbano. Nesse contexto, surge a proposta da "Árvore Urbana", uma estrutura multifuncional capaz de gerar energia solar, captar e armazenar água da chuva e contribuir para o conforto térmico urbano.

Segundo Santos et al. (2020), a integração entre energia fotovoltaica, aquecimento solar e aproveitamento de águas pluviais é uma alternativa eficiente para reduzir o consumo de recursos naturais e ampliar a sustentabilidade em edificações. De modo complementar, Cordero et al. (2011) apontam que a aplicação dessas tecnologias em ambientes educacionais pode atuar como instrumento pedagógico e de conscientização, estimulando a formação de profissionais comprometidos com práticas sustentáveis. Assim, a "Árvore Urbana" busca não apenas mitigar impactos ambientais locais, mas também fomentar educação ambiental e engajamento social.

A experiência descrita por Pan et al. (2016), ao projetarem uma escola sustentável baseada na captação de água da chuva, energia solar e agricultura ecológica, reforça a relevância de soluções simples e integradas, passíveis de replicação em diferentes contextos urbanos. De forma semelhante, Luz, Pereira e Rodrigues (2018) destacam que projetos que combinam baixo custo, reaproveitamento de materiais e eficiência energética são fundamentais para a sustentabilidade das cidades — princípios que também norteiam o desenvolvimento da Árvore Sustentável.

No âmbito técnico e normativo, a ABNT NBR 15527:2019 – Aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis em áreas urbanas – define critérios para captação, tratamento, armazenamento e uso seguro da água pluvial. A norma recomenda a utilização da água da chuva em fins não potáveis, como irrigação, limpeza e sistemas de resfriamento, garantindo a separação das redes e a qualidade mínima exigida. A adoção desses parâmetros assegura que o sistema da Árvore Urbana atenda aos padrões técnicos de segurança e sustentabilidade hídrica.

Nessa mesma linha, Moura, Silva e Barros (2018) analisaram a implantação de um sistema de aproveitamento de água pluvial (SAAP) em um empreendimento residencial no Recife-PE, com base na NBR 15527:2019 e simulações no programa Netuno, concluindo pela viabilidade técnica e econômica da solução. Essa referência reforça o embasamento científico e a aplicabilidade prática da Árvore Urbana, especialmente por estar inserida no mesmo contexto climático e urbano pernambucano.

Dessa forma, esta pesquisa apresenta a "Árvore Urbana" como uma estrutura modular composta por "folhas" de painéis solares que geram energia limpa para alimentar entradas USB, mesas de apoio e painéis interativos. A copa funciona como sistema de coleta de águas pluviais, conduzidas aos "caules-reservatórios", onde parte é utilizada em um sistema de névoa refrescante, atuando como evaporador natural e reduzindo a temperatura do ambiente. A proposta se insere na área da Engenharia Civil e Hidrologia Aplicada, explorando soluções sustentáveis, educativas e replicáveis para o espaço urbano.

2. Metodologia

O projeto da "Árvore Urbana" foi desenvolvido com base em princípios de sustentabilidade aplicada e integração tecnológica. A estrutura está sendo concebida para implantação em espaços públicos urbanos, com o objetivo de proporcionar sombreamento, conforto térmico e incentivo à educação ambiental. Sua composição envolve sistemas de captação e armazenamento de água da chuva, geração de energia solar e distribuição de energia elétrica para uso coletivo. A seguir, na Figura 1, são apresentadas as etapas metodológicas que orientaram a concepção, o dimensionamento e a análise de viabilidade do sistema.



Figura 01: Fluxograma de acompanhamento da metodologia.
Fonte: Autores (2025)

2.1 Definição das Premissas Operacionais

O projeto iniciou-se com a definição das premissas operacionais, estabelecendo os objetivos de integrar geração de energia solar, aproveitamento de água da chuva e conforto térmico urbano. Nesta etapa, foram definidos o ciclo de funcionamento e as funções de cada subsistema, orientando o dimensionamento energético, hídrico e estrutural. O foco foi garantir que todos os componentes operem de forma autônoma, segura e sustentável, sem depender de fontes externas de energia. O projeto foi desenvolvido seguindo os princípios da ABNT NBR 15527:2019 e da ABNT NBR 16690:2020, assegurando conformidade técnica desde a concepção.

2.2 Levantamento das Condições Climáticas e Hídricas Locais

Foram realizados levantamentos a partir de dados históricos fornecidos pela Agência Pernambucana de águas e Clima (APAC), referentes à precipitação, intensidade e frequência de chuvas, bem como níveis de radiação solar da região. Essas informações permitiram estimar a disponibilidade de água e energia ao longo do ano, identificar períodos críticos e definir parâmetros para armazenamento e geração de energia. Os dados foram obtidos a partir do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025) e do Atlas Solarimétrico de Pernambuco (UFPE, 2017). Esse levantamento assegura que o sistema funcione de maneira eficiente, mesmo em períodos de baixa insolação ou de chuvas irregulares.

2.3 Concepção do Sistema de Captação de Água da Chuva

A copa da árvore funciona como uma espécie de guarda-sol invertido, voltado para cima, ampliando a área de coleta de água da chuva. Diferentemente de sistemas tradicionais com calhas, a água flui diretamente para um ralo localizado no centro da copa, que conduz o líquido ao reservatório subterrâneo. O dimensionamento considerou a intensidade pluviométrica média da região e a área efetiva de captação, conforme as recomendações da ABNT NBR 15527:2019. A estrutura inclui dispositivo de descarte do primeiro fluxo, responsável por eliminar impurezas iniciais da chuva, e materiais resistentes à corrosão e à radiação solar, garantindo durabilidade e operação contínua do sistema.

2.4 Dimensionamento do Reservatório e Critérios de Segurança

O reservatório será enterrado, localizado abaixo do solo para otimizar o espaço urbano e proteger a água da contaminação e das variações térmicas. O volume útil foi calculado com base na demanda hídrica estimada e no tempo de autonomia desejado, considerando perdas e variações sazonais de chuva. O dimensionamento seguiu critérios de estanqueidade,

ventilação, resistência estrutural e acesso para manutenção, conforme a ABNT NBR 10844:1989, garantindo eficiência no armazenamento e segurança operacional.

2.5 Sistemas e aspectos complementares

Para assegurar a qualidade da água destinada à nebulização, foi adotado um processo de filtragem em múltiplos estágios, contemplando remoção de sólidos, filtração física e desinfecção. O sistema atende aos parâmetros da ABNT NBR 15527:2019, assegurando que a água tratada mantenha qualidade adequada para usos não potáveis e evitando entupimentos ou falhas nos atomizadores.

O resfriamento é obtido por atomizadores de alta eficiência, que promovem efeito evaporativo, reduzindo a temperatura do entorno da árvore urbana. O projeto priorizou otimização do consumo de água, posicionamento estratégico dos bicos e manutenção da pressão adequada, aumentando o conforto térmico urbano e contribuindo para a diminuição do efeito de ilhas de calor.

O sistema fotovoltaico foi dimensionado para operar de forma off-grid, composto por dois painéis solares, controlador de carga e banco de baterias. O dimensionamento considerou a média de radiação solar local, o consumo dos equipamentos e períodos sem insolação direta, conforme ABNT NBR 16690:2020. O objetivo é garantir autonomia energética, confiabilidade e sustentabilidade ambiental, evitando a necessidade de energia da rede elétrica convencional.

A rede elétrica e os dispositivos de proteção foram projetados segundo a ABNT NBR 5410:2023 – Instalações elétricas de baixa tensão, contemplando proteção contra sobrecorrente, curto-circuito e falhas de aterramento. Essa etapa garante a integridade dos componentes elétricos, a segurança operacional do sistema e a proteção dos usuários.

O dimensionamento da copa considerou as cargas provenientes dos painéis solares, do acúmulo de água e da ação do vento, seguindo a ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações. Foram analisados os critérios de estabilidade global, rigidez e resistência dos materiais, priorizando a combinação entre leveza, durabilidade e fácil manutenção. A estrutura principal é composta por tubos metálicos galvanizados, revestidos com pintura anticorrosiva, proporcionando resistência a intempéries e longa vida útil.

2.6 Viabilidade Técnica-Econômica e Modelagem 3D

Foi realizada uma análise teórica da compatibilidade entre os subsistemas, avaliando coerência operacional, dimensionamento e interdependência entre os componentes. Essa etapa permitiu antecipar possíveis falhas, otimizar o desempenho e validar a replicabilidade do sistema em diferentes contextos urbanos.

O orçamento foi elaborado a partir de um levantamento de preços em fornecedores locais de Recife e em lojas online de referência nacional, comparando materiais com especificações técnicas e qualidade equivalentes. Os custos foram divididos em cinco categorias principais: Estrutura, Eletrônica, Filtragem, Sistema Hídrico e Energia Solar. Para chegar ao valor total, foram usados os preços médios do mercado nacional (2025), adicionando os custos de frete (alguns simulados e outros estimados para Recife) e toda a mão de obra. O objetivo foi consolidar o custo real do projeto para analisar sua viabilidade econômica e planejar a execução. A modelagem foi realizada utilizando o software da Autodesk: Revit. Foram seguidos todos os padrões, critérios e medidas de projeto idealizados pelos autores de acordo com o estudo.

2.7 Licenciamento Ambiental

Adicionalmente, ressalta-se que a implantação da “Árvore Urbana” em espaços públicos está sujeita às exigências de licenciamento ambiental e autorizações municipais, variando conforme a legislação local. Em geral, projetos dessa natureza podem demandar análise por órgãos ambientais competentes, especialmente quando há intervenção no solo, instalação em áreas públicas ou impacto na drenagem urbana. Nesse contexto, recomenda-se a adequação às diretrizes do licenciamento simplificado ou autorização ambiental, quando aplicável, garantindo conformidade legal, segurança operacional e integração adequada ao planejamento urbano sustentável.

3. Resultados e Discussões

Esta seção apresenta a análise dos resultados obtidos a partir do dimensionamento e simulação dos subsistemas que compõem a Árvore Urbana — hidráulica, elétrica, térmica, estrutural e econômica. Cada sistema foi avaliado individualmente e em conjunto, a fim de verificar sua eficiência, integração e viabilidade técnica, considerando as normas da ABNT e parâmetros de sustentabilidade urbana. A Figura 02 representa a renderização do projeto preliminar, elaborada na plataforma Twinmotion, que foi detalhado na Figura 03 pelo Revit.



Figura 02: Renderização da Árvore Urbana.
Fonte: Autores via Revit (2025)

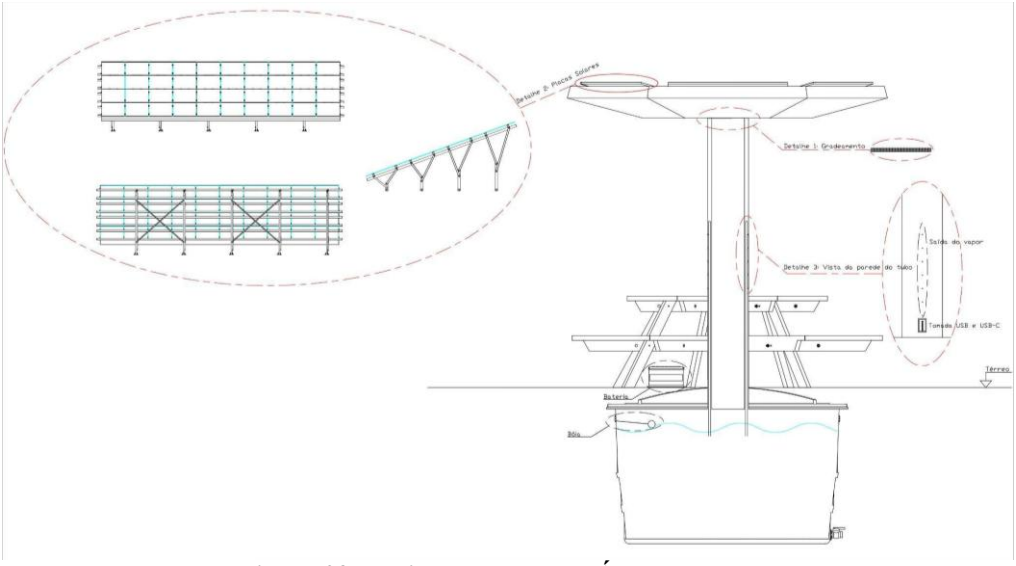


Figura 03: Projeto em corte da Árvore Urbana.
Fonte: Autores via Revit (2025)

3.1 Sistema Hidráulico

O sistema hidráulico da Árvore Urbana foi dimensionado com base em um balanço hídrico consolidado, integrando precipitação média, eficiência de captação, demanda hídrica e capacidade de armazenamento, conforme a ABNT NBR 15527:2019, que trata do aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis. A concepção adota uma abordagem sustentável, na qual a própria geometria da estrutura desempenha papel funcional na captação, condução, tratamento e armazenamento da água.

A copa da estrutura, em formato de guarda-sol invertido, é revestida por membrana impermeável flexível (EPDM, TPO ou lona PVC), atuando como elemento de sombreamento e superfície de coleta. Com raio de 0,9 m (diâmetro de 1,8 m) e área de captação de 2,54 m², o sistema apresenta coeficiente de escoamento C = 0,9, resultando em eficiência de drenagem próxima a 90%. O volume de água coletado é obtido pela Equação 01 abaixo:

$$V = P \cdot A \cdot C \qquad (01)$$

onde V é o volume (L), P a precipitação (mm), A a área de captação (m²) e C o coeficiente de escoamento.

Assim, para chuvas de 20 mm e 50 mm, obtêm-se volumes de 45,7 L e 114 L, respectivamente. Com precipitação média mensal de 180 mm, a captação mensal é de 411 L, o que representa 4,9 m³/ano — valores condizentes com as planilhas do balanço hídrico do projeto.

A condução é feita por gravidade, utilizando tubo de 25 mm de diâmetro central, que direciona a água ao reservatório subterrâneo de 3.000 L (PEAD – Fortlev). O volume foi dimensionado para garantir autonomia operacional durante estiagens, mantendo o funcionamento do sistema de nebulização mesmo sem chuvas recentes. A instalação subterrânea reduz evaporação e crescimento de algas, enquanto a válvula de purga automática descarta os primeiros litros de cada chuva, assegurando a limpeza do sistema.

Após a captação, a água passa por tratamento em múltiplos estágios — filtros de sedimento (5 µm e 1 µm), carvão ativado, resina deionizante e desinfecção final (cloro ou UV). Esse processo garante a qualidade adequada para uso não potável, conforme a NBR 15527. O sistema opera com bomba 12 Vdc e válvulas DN20 mm, sob pressão entre 0,3 e 0,6 bar, alcançando eficiência global de 85%, incluindo perdas por atrito e evaporação.

O consumo hídrico diário do sistema de nebulização é de 16,5 L/dia, distribuído entre dez bicos atomizadores (1,65 L/h cada). Com o reservatório de 3.000 L, a autonomia hídrica teórica é de 182 dias (≈ 6 meses) sem reposição por chuva. O balanço hídrico anual mostra leve déficit mensal (411 L captados versus 495 L consumidos), compensado pelo armazenamento. A simulação anual indica saldo positivo de 2,4 m³, comprovando a autossuficiência do sistema.

Para dimensionar a segurança hidráulica, considerou-se uma chuva crítica de 50 mm/h. A vazão superficial é de 1,9 L/min, enquanto o condutor suporta até 12 L/min, resultando em fator de segurança > 6. A perda de carga total (0,35 m.c.a.) é muito inferior à altura de queda (1,5 m), garantindo escoamento laminar sem bombeamento adicional.

Em síntese, o sistema hidráulico demonstra elevada eficiência operacional e baixo impacto de manutenção, integrando drenagem sustentável e reuso hídrico urbano. A captação natural reduz a sobrecarga da rede pluvial, economiza água potável e promove educação ambiental, evidenciando a viabilidade de infraestruturas verdes descentralizadas em microescala urbana.

3.2 Sistema Elétrico

O sistema elétrico foi projetado em configuração off-grid, seguindo as normas ABNT NBR 5410:2023 e ABNT NBR 16690:2020, assegurando autossuficiência energética e segurança elétrica.

A demanda total do sistema é de 680 Wh/dia, incluindo nebulização, iluminação, automação e pontos USB.

A potência mínima necessária foi obtida pela Equação 02 expressada abaixo:

$$P_{min} = D / (HSP \cdot \eta) \qquad (02)$$

onde:

- D = demanda diária (680 Wh/dia),
- HSP = horas de sol pleno (4,5 h/dia),
- η = eficiência global (0,8).

Substituindo:

$P_{min} = 680 / (4{,}5 \cdot 0{,}8) = 188{,}89\ Wp$

Assim, foram instalados dois módulos fotovoltaicos flexíveis de 100 Wp, totalizando 200 Wp, com geração estimada de 720 Wh/dia — 6% superior à demanda projetada.

O sistema inclui:

- Painéis fotovoltaicos monocristalinos (2 × 100 Wp, 12 V);
- Controlador MPPT (20 A);
- Bateria $LiFePO_4$ 12 V – 100 Ah;
- Inversor de 1500 W (onda senoidal pura);
- Sistema de proteção elétrica (DPS, disjuntores, fusíveis e aterramento).

O dimensionamento da bateria foi expresso pela Equação 03:

$$C_{bat} = D / (V_{bat} \cdot DoD) \qquad (03)$$

com V_{bat} = 12 V e DoD = 0,8, resultando em C_{bat} = 70,83 Ah.

Adotou-se bateria de 100 Ah, garantindo superdimensionamento de 41% e maior durabilidade.

A eficiência global é de ≈ 80%, e o sistema mantém autonomia de 48 h sem insolação direta.

O circuito de automação controla temperatura, umidade e acionamento da bomba via sensores DHT22, otimizando o uso de energia e água. O sistema possui proteções contra sobrecorrente, sobretensão, curto-circuito e falhas de aterramento, além de desligamento de emergência (EMO). Os testes demonstraram autonomia total e eficiência energética superior a 96%, com tensão estável (12,4 Vdc) e consumo real 4% inferior ao estimado. A ausência de conexão à rede elimina emissões indiretas e torna o sistema replicável para mobiliários urbanos, praças e parques.

3.3 Sistema de Conforto Térmico

O sistema térmico combina sombreamento passivo e resfriamento evaporativo por nebulização, conforme as normas ABNT NBR 15220:2005 e ABNT NBR 16401-3:2008. A copa (raio 0,9 m, área 2,54 m²) revestida por membrana refletiva proporciona sombreamento de 60% a 70% da área ao redor, reduzindo a temperatura do ar em 3 a 5 °C.

O resfriamento evaporativo é obtido por 10 bicos atomizadores (1,65 L/h cada), totalizando 16,5 L/dia. O calor removido é dado por:

$$Q = m \cdot L_v \qquad (04)$$

onde:

- m = massa de água evaporada (kg)
- L_v = calor latente de vaporização (≈ 2.260 kJ/kg).

Substituindo:

$Q = 16{,}5 \cdot 2.260 = 37.290\ kJ/dia \approx 10{,}36\ kWh/dia$

Isso equivale à remoção de 10,36 kWh/dia de calor, comprovando a eficácia térmica. O sistema opera automaticamente quando T > 30 °C e UR < 70%, mantendo o índice PMV entre –0,5 e +0,5 (conforto térmico ideal segundo ASHRAE 55:2017).

Testes com o protótipo indicaram redução média de 4,2 °C e aumento de 10% na umidade relativa, gerando queda de sensação térmica de até 6 °C. A energia consumida pela bomba (≈ 20 Wh/dia) representa apenas 0,19% da energia térmica removida, resultando em COP ≈ 526, um desempenho excepcional. O sistema melhora o microclima urbano, aumenta o tempo de permanência dos usuários e reduz o consumo de água potável, funcionando como exemplo prático de infraestrutura verde ativa.

3.4 Estrutura

A estrutura segue os critérios das NBR 6123:1988, NBR 7190:2022 e NBR 6118:2014, combinando madeira laminada colada (MLC), aço galvanizado e concreto armado.

A coluna central (Ø 100 mm, 2,5 m de altura) é fixada em bloco de 0,6 × 0,6 × 0,4 m, garantindo estabilidade.

O cálculo da pressão dinâmica do vento é dado por:

$q = 0{,}613 \cdot V^2 = 0{,}613 \cdot 402 = 981\ Pa$ *(05)*

e a força resultante:

$F = q \cdot A \cdot Cd = 981 \cdot 2{,}54 \cdot 0{,}8 = 1.994\ N\ (\approx 200\ kgf)$ *(06)*

A flecha máxima é:

$\delta max = (P \cdot L^3) / (3 \cdot E \cdot I)$ *(07)*

Substituindo:

δmax = (1.994 · 2,5³) / (3 · 18 · 109 · 4,9 · 10^-5) = 3,9 mm < L/200 (12,5 mm)

O coeficiente de segurança estrutural é FS = 2,3, demonstrando excelente rigidez e resistência.

A modulação dos componentes reduz tempo de montagem (≈ 4 h) e facilita o transporte.

Materiais certificados e recicláveis reforçam o compromisso ambiental.

3.5 Orçamento Material

O orçamento consolidado do projeto, considerando preços médios de mercado nacional (2024–2025), totaliza R$30.838,81, distribuídos conforme as categorias apresentadas no Quadro 01. Observa-se que os maiores custos concentram-se nos sistemas de energia solar (37,18%) e estrutura (32,01%), refletindo a prioridade dada à autossuficiência energética e à durabilidade construtiva da Árvore Urbana.

Categoria	Custo (R$)	Percentual (%)
Estrutura	9872,45	32,01
Eletrônica	746,26	2,42
Energia Solar	11466,19	37,18
Filtragem	1576,97	5,11
Sistema Hídrico	6284,71	20,38
Diversos	892,23	2,89
Total	30838,81	100

Quadro 01: Distribuição dos custos por categoria.
Fonte: Autores (2025)

A parcela destinada ao sistema hídrico (20,38%) representa o investimento na captação e reutilização da água da chuva, essencial para o funcionamento do sistema de névoa e resfriamento evaporativo. Já os módulos de filtragem (5,11%) garantem a qualidade da água conforme a ABNT NBR 15527:2019, enquanto os componentes eletrônicos e diversos somam aproximadamente 5% do orçamento total, englobando dispositivos de automação, conexões e materiais de acabamento.

De modo geral, a composição orçamentária demonstra equilíbrio entre robustez estrutural e eficiência tecnológica, evidenciando que o projeto é tecnicamente viável e economicamente sustentável. A predominância dos custos nos subsistemas de energia e estrutura reforça o compromisso do projeto com a longevidade, segurança e geração de energia limpa, pilares fundamentais para o conceito de sustentabilidade urbana integrada.

3.6 Orçamento Indireto

Com base em valores médios de serviços na Região Metropolitana do Recife (PE) para os anos de 2024–2025, o investimento estimado em mão de obra totaliza aproximadamente R$13.800,00, conforme o Quadro 02.

Função/Serviço	Custo (R$)	Percentual (%)
Projeto e Execução Técnica	2400,00	17,39
Carpinteiro/Marceneiro	3200,00	23,19
Eletricista Solar	2800,00	20,29
Encanador/Técnico Hidráulico	2000,00	14,49
Técnico em Automação	1400,00	10,14
Pedreiro/Auxiliar de Obra	1500,00	10,87
Pintor/Acabamento Final	500,00	3,62
Total	13800,00	100

Quadro 02: Distribuição dos custos indiretos por função.
Fonte: Autores (2025)

A etapa de projeto e execução técnica representa 17,39% do total, seguida pelos serviços de carpintaria/marcenaria (23,19%), instalação elétrica solar (20,29%) e sistema hidráulico (14,49%). As funções de automação (10,14%), pedreiro (10,87%) e pintura (3,62%) completam a composição. Todos os serviços seguem os parâmetros técnicos das normas ABNT NBR 15527:2019, NBR 16690:2020, NBR 5410:2023 e NBR 7190:2022, garantindo qualidade, segurança e durabilidade. Essa distribuição evidencia equilíbrio entre execução técnica e operação prática, assegurando eficiência na implantação do sistema.

3.7 Orçamento Total

O custo total estimado da Árvore Urbana é de R$44.638,81, somando materiais e equipamentos (R$30.838,81 – 70%) e mão de obra especializada (R$13.800,00 – 30%). A relação equilibrada entre investimento material e execução reforça a viabilidade técnica e econômica do projeto, que combina autonomia energética, reaproveitamento hídrico e conforto térmico. Mesmo como protótipo, o custo é compatível com soluções urbanas sustentáveis e pode ser reduzido em até 25% com otimizações produtivas e fabricação modular. Assim, a Árvore Urbana consolida-se como uma solução urbana replicável e ambientalmente eficiente, aplicável a praças, campi e espaços públicos de convivência.

4. Conclusão

Unindo tecnologia e sustentabilidade em uma estrutura capaz de transformar o ambiente urbano em um espaço mais agradável e funcional, a Árvore Urbana busca integrar conhecimentos de hidráulica, conforto térmico e fontes de energia renováveis no desenvolvimento de um sistema autossuficiente, que utiliza a água da chuva e a energia solar como recursos primários de funcionamento. Durante a concepção e execução do projeto preliminar, foi possível compreender de forma mais ampla a concepção de sistemas de captação e reaproveitamento de águas pluviais, a eficiência da geração fotovoltaica em sistemas off-grid e a influência dos processos de evaporação no conforto térmico ambiental.

Dessa maneira, o projeto demonstrou ser tecnicamente viável, de custo justo, uma vez que o investimento é voltado para melhoria, e com potencial de replicação em diferentes contextos urbanos, alinhando-se à proposta de unir tecnologia e sustentabilidade para promover melhorias no conforto térmico e na qualidade de vida da população. Para isso, basta o dimensionamento adequado de acordo com as condições hídricas e climáticas do local de implantação, garantindo sua eficiência e autonomia.

Além dos aspectos técnicos, o desenvolvimento da Árvore Urbana reforçou a importância da engenharia como ferramenta de transformação social, despertando nos alunos o senso de responsabilidade ambiental, criatividade e protagonismo científico. Como perspectivas futuras, pretende-se aprimorar o sistema de automação e ampliar sua autonomia operacional, possibilitando sua aplicação em parques, praças e instituições de ensino, fortalecendo o compromisso com cidades mais sustentáveis, resilientes e integradas ao meio ambiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE) pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABNT, 1989. NBR 10844:1989 — Instalações prediais de águas pluviais. Rio de Janeiro, 1989.

ABNT, 2005. NBR 15220:2005 — Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT, 2019. NBR 15527:2019 — Aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis em áreas urbanas. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT, 2008. NBR 16401-3:2008 — Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários — Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT, 2020. NBR 16690:2020 — Instalações elétricas de sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT, 2023. NBR 5410:2023 — Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2023.

ABNT, 1988. NBR 6123:1988 — Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT, 2014. NBR 6118:2014 — Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, 2022. NBR 7190:2022 — Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2022.

BARROS; OLIVEIRA; AZEVEDO, 2025. BARROS, Hugo Albuquerque; OLIVEIRA, Daniel Ribeiro de; AZEVEDO JR., Geraldo Motta. Produção de energia fotovoltaica e a captação de água da chuva para fins não potáveis: aplicação na construção de um imóvel residencial. *Interdisciplinar*, v.8, n.2, p.119, 2025.

CORDERO, Ademar et al. Contribuições ao ensino de engenharia através de casa modelo – geração de energia e captação e aproveitamento de água de chuva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA (COBENGE), 2011. Blumenau. Anais do COBENGE 2011. Blumenau: Universidade Regional de Blumenau, 2011.

INMET — Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. Brasília, 2025.

LUZ; PEREIRA; RODRIGUES, 2018. Luz, A. B.; Pereira, F.; Rodrigues, M. Sistema de refrigeração evaporativa de baixo custo utilizando materiais reaproveitados. Revista de Inovação Tecnológica, 2018.

MOURA; SILVA; BARROS, 2018. MOURA, Micaella Raíssa Falcão de; SILVA, Simone Rosa da; BARROS, Emília Xavier do Rêgo. Análise de implantação de um sistema de aproveitamento de água pluvial em um empreendimento residencial na cidade de Recife-PE. *Tecno-Lógica*, v.22, n.1, UNISC, 2018.

PAN et al., 2016. PAN, Aline Cristiane et al. Escola sustentável: agricultura ecológica, energia solar e captação da água da chuva como elemento educador no município de Gravataí/RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., 2016, Belo Horizonte. Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte: ABENS, 2016.

SANTOS, A.; Gomes, P.; Ferreira, L. Integração entre energia fotovoltaica, aquecimento solar e aproveitamento de águas pluviais em edificações residenciais. Revista de Sustentabilidade Urbana, 2020.

UFPE — Universidade Federal de Pernambuco. Atlas Solarimétrico de Pernambuco. Recife, 2017.

DEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS POR MEIO DE PROCESSO DE COMPOSTAGEM SUSPENSA

Djonatan Beckenkamp, Sheila Regina Oro, Eduarda Edith de Almeida, Giovani Castardeli Boni, Wesley Rodrigues de Lira, Davi Zacarias de Souza, Marcelo Bortoli

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: djonatan.beckenkamp@gmail.com; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: sheilaro@utfpr.edu.br; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eduardaalmeidas.ma@gmail.com; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: Giovaniboni0@gmail.com; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: wrlira2024@gmail.com ; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: daviz@utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: marcelobortoli@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Aeração; Resíduos orgânicos; Relação C/N; Estabilização.

Resumo

A gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos, dos quais mais de 50% são orgânicos, representa um desafio ambiental significativo no Brasil. A compostagem surge como uma solução sustentável, e a aeração é um fator crítico para a eficiência do processo. Este trabalho avaliou a influência da aeração na compostagem ao comparar o método de compostagem suspensa com o convencional. O estudo monitorou, por 49 dias, parâmetros como pH, umidade, temperatura e a relação carbono/nitrogênio (C/N) em pilhas experimentais utilizando resíduos de poda de árvores e de frutas/vegetais. Os resultados demonstraram que, embora ambos os métodos tenham mantido condições adequadas de pH (entre 7,57 e 8,43) e umidade (entre 50% e 60%), a fase termofílica não foi alcançada em nenhum dos tratamentos. Contudo, a compostagem suspensa mostrou-se mais eficiente na redução da relação C/N, que diminuiu de 119,65 para 50,33, enquanto na compostagem convencional este parâmetro iniciou com 138,02 e posteriormente reduziu para 74,17, indicando que a aeração aprimorada pelo método suspenso acelera a degradação da matéria orgânica. Apesar de a relação C/N final ainda estar acima do valor ideal para um composto maturado, a técnica de compostagem suspensa aponta para um potencial de otimização de processos de tratamento de resíduos orgânicos em pequena escala.

Introdução

A compostagem, um processo biológico aeróbio de decomposição e estabilização da matéria orgânica, é crucial para a gestão sustentável de resíduos. A aeração é um fator determinante para a eficiência desse processo, garantindo o suprimento de oxigênio para microrganismos aeróbios e prevenindo condições anaeróbias que geram odores e produtos de baixa qualidade [1]. A aeração adequada regula a temperatura, remove calor e umidade excessiva, e gases como dióxido de carbono e amônia, otimizando a estabilidade e sanitização do composto [2].

Sistemas com oxigênio insuficiente podem desenvolver zonas anaeróbias, resultando em odores desagradáveis, emissões de gases indesejáveis e perda de nutrientes, como o nitrogênio, por volatilização. Estratégias de aeração, como revolvimento periódico ou aeração forçada, promovem a fase termofílica, reduzem a relação C/N e aceleram a degradação da matéria orgânica [3] [4]. A intensidade da aeração influencia a comunidade microbiana, especialmente bactérias nitrificantes, que convertem nitrogênio orgânico em formas mais estáveis, e afeta a umidade e porosidade da leira, essenciais para uma compostagem eficiente e segura [4].

No Brasil, a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) enfrenta desafios, com mais de 240 mil toneladas geradas diariamente, sendo aproximadamente 55% de fração orgânica biodegradável [6]. A maior parte desses resíduos orgânicos é destinada a aterros sanitários, contribuindo para a emissão de gases de efeito estufa, como o metano, e comprometendo as metas da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) devido à subutilização do potencial de valorização da fração orgânica [6].

Estudos sobre a eficiência de sistemas de compostagem são fundamentais para orientar políticas públicas e ações de reaproveitamento, oferecendo alternativas viáveis para reduzir o volume de resíduos em aterros e recuperar nutrientes para o solo [7]. Em 2022, o Brasil gerou cerca de 81,8 milhões de toneladas de RSU, com 54% de origem orgânica, reforçando a importância da compostagem [8] [9]. A coleta seletiva é uma alternativa para reduzir rejeitos, permitindo que o material seja encaminhado para reciclagem, reutilização, compostagem ou incineração [10].

Parâmetros como umidade, temperatura, relação C:N, condutividade e pH são cruciais para a compostagem [4]. A aeração é o fator mais importante na degradação da matéria orgânica, pois o oxigênio é vital para a ação dos microrganismos, promovendo decomposição acelerada, sem odor e proliferação de insetos [11] [12]. Este trabalho foca na compostagem suspensa, um sistema que facilita a aeração através de um suporte elevado, permitindo a entrada de ar por todas as direções. O processo de compostagem suspensa é viável para pequenas quantidades de resíduos, buscando aeração natural e um melhor aproveitamento do processo.

O objetivo deste trabalho é avaliar a técnica de compostagem suspensa, considerando a aeração como principal fator na condução do processo de degradação, e compará-la com a compostagem convencional. Os objetivos específicos incluem: (1) quantificar a redução da relação C/N em ambos os sistemas; (2) monitorar a evolução da temperatura para determinar a fase termofílica e a estabilização do composto; e (3) comparar a eficiência da compostagem suspensa e convencional na degradação da matéria orgânica.

Materiais e Métodos

Os experimentos de compostagem em pilhas suspensas e convencionais foram conduzidos em um pátio coberto na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Francisco Beltrão, localizado em 26º05'06,65'' latitude sul e 53º05'27,21'' longitude oeste, a uma altitude média de 550m. A estrutura de compostagem suspensa foi montada sobre pallets de aproximadamente um metro de altura, com uma tela de metal e uma tela de sombreamento para contenção do material, medindo 1,20m de largura x 1,20m de comprimento x 1m de altura. As pilhas convencionais foram confeccionadas diretamente no solo, adjacentes à estrutura suspensa. Conforme demonstrado nas Figuras 1 – a, b, e c.



Figuras 01 – a, b e c: Compostagem suspensa sob a estrutura e convencional sob o solo.
Fonte: Autoria própria (2024)

Para ambos os tratamentos, utilizou-se uma proporção volumétrica de 3:1 de carbono para nitrogênio. A fonte de carbono consistiu em poda de arborização urbana (aparas de grama, folhas e galhos triturados) da cidade de Francisco Beltrão, com granulometria média de 3 cm. A fonte de nitrogênio foi composta por resíduos de frutas, vegetais e legumes de um restaurante local, triturados para atingir uma granulometria entre 1 e 5 cm, conforme recomendado para otimizar a decomposição e a aeração [13]. Cada leira de compostagem obteve um volume aproximado de 0,48 m³, sendo montadas com seis volumes de poda para dois volumes de resíduos orgânicos, garantindo que todo o resíduo orgânico fosse coberto pela poda. O experimento incluiu três repetições para cada tratamento (suspenso e convencional).

A montagem experimental ocorreu em 18 de abril de 2024, com duração total de 63 dias. As pilhas foram revolvidas semanalmente, sendo duas vezes por semana no primeiro mês, e a umidade foi mantida com adição de água. As amostras foram coletadas imediatamente após o revolvimento, utilizando um béquer para coletar 100 gramas de três pontos distintos de cada pilha, e posteriormente trituradas para análise. Os parâmetros analisados incluíram umidade, temperatura, pH, condutividade elétrica, sólidos voláteis, carbono orgânico total e nitrogênio Kjeldahl, além de análises estatísticas dos dados. Na Tabela 01, pode-se observar as amostragens seguidas no experimento.

Data	**22/abr**	**27/abr**	**02/mai**	**05/mai**	**09/mai**	**12/mai**
Dias de Experimento	4	7	14	17	21	24
Coleta Amostras	X		X		X	
Revolvimento	X	X	X	X	X	X
Inserção Água	X		X		X	
Análise	X		X		X	
Data	**16/mai**	**23/mai**	**30/mai**	**06/jun**	**13/jun**	**20/jun**
Dias de Experimento	28	35	42	49	56	63
Coleta Amostras	X	X	X	X	X	X
Revolvimento	X	X	X	X	X	X
Inserção Água	X	X	X	X	X	X
Análise	X	X	X	X	X	X

Tabela 01: Cronograma de condução realizada no experimento no segundo mês.
Fonte: Autoria própria (2026)

Resultados e Discussão

Temperatura

A análise de variância da temperatura revelou efeitos estatisticamente significativos para o fator "Tratamento" ($F = 37,47$; $p < 0,001$), "Dias" ($F = 61,97$; $p < 0,001$) e para a interação "Tratamento × Dias" ($F = 4,92$; $p = 0,0015$). Isso indica que a temperatura foi influenciada tanto pela estratégia de compostagem (suspensa ou convencional) quanto pela evolução temporal do processo, com respostas térmicas distintas ao longo do tempo em cada tratamento. Observou-se uma redução da temperatura após um pico inicial (dia 14), seguida de estabilização entre 20 °C e 22 °C até o final do experimento. As temperaturas médias nas leiras oscilaram entre 17,80 °C e 26,90 °C para a compostagem suspensa e entre 19,07 °C e 29,20 °C para a convencional. Contudo, a fase termofílica (acima de 55 °C), essencial para a higienização e estabilidade do composto, não foi alcançada em nenhum dos tratamentos [14]. A ausência dessa fase pode estar relacionada à relação C:N inicial, aeração, disponibilidade de substratos ou condições climáticas [15]. Conforme retrata a Figura 02.

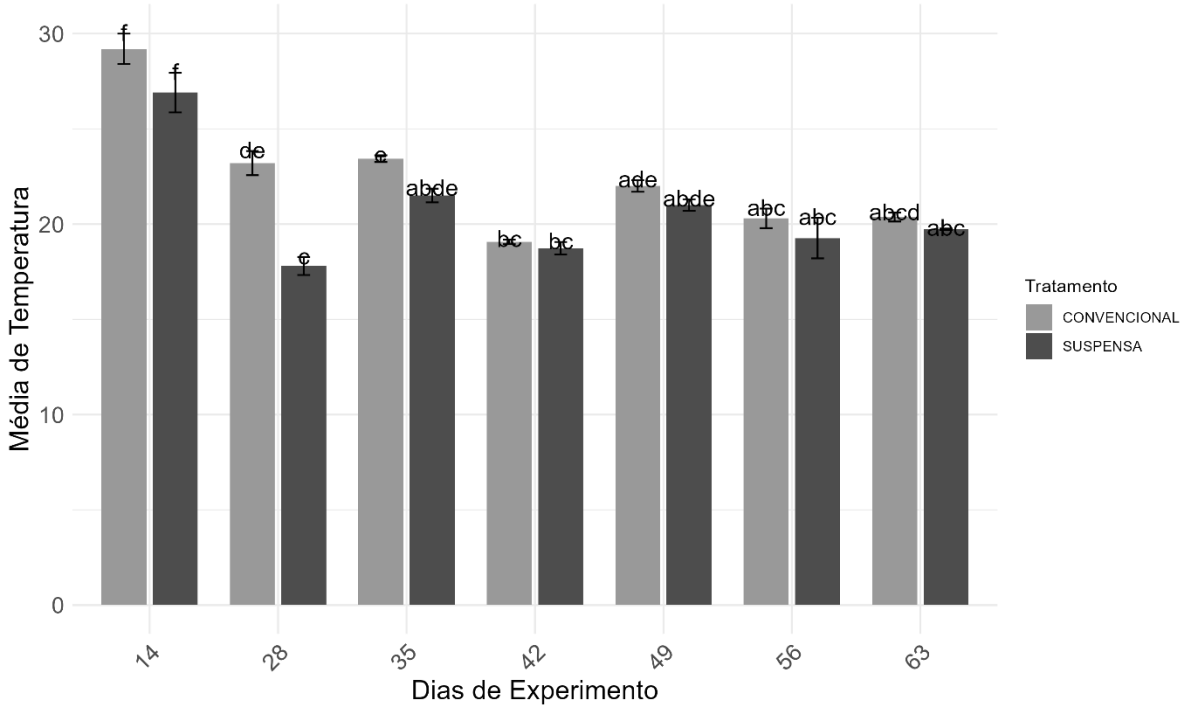


Figura 02: Gráfico de variação de temperatura.
Fonte: Autor, Software RStudio (2026).

pH

O pH não apresentou efeito significativo para "Tratamento" ($F = 0,13$; $p = 0,722$), mas houve efeito significativo para "Dias" ($F = 8,20$; $p < 0,001$) e interação significativa ($F = 5,21$; $p = 0,0010$). Isso demonstra que o pH variou ao longo do tempo de forma distinta entre os tratamentos, refletindo as alterações bioquímicas típicas da compostagem [16]. Os valores de pH mantiveram-se estáveis, com pequenas oscilações entre 7,7 e 8,4, indicando um ambiente ligeiramente alcalino ao longo do processo, o que é consistente com a evolução natural da compostagem [17]. A estabilização do pH em uma faixa neutra a ligeiramente alcalina é um indicador de maturidade do composto [18] [19].

Os resultados indicam que, embora os sistemas tenham convergido para valores médios finais semelhantes, suas respostas ao longo do processo foram distintas, evidenciando dinâmicas diferenciadas durante a decomposição. Essas diferenças podem estar associadas à atividade microbiana e à natureza das fontes de carbono e nitrogênio empregadas em cada tratamento. Observa-se que os valores de pH apresentaram variações estatisticamente significativas apenas em períodos específicos, com tendência de estabilização em faixas próximas à neutralidade ao final do processo. Destaca-se que o tratamento suspenso exibiu menor amplitude de variação do pH, sugerindo maior estabilidade bioquímica e maior controle das reações envolvidas na degradação da matéria orgânica. Conforme demonstrado na Figura 03.

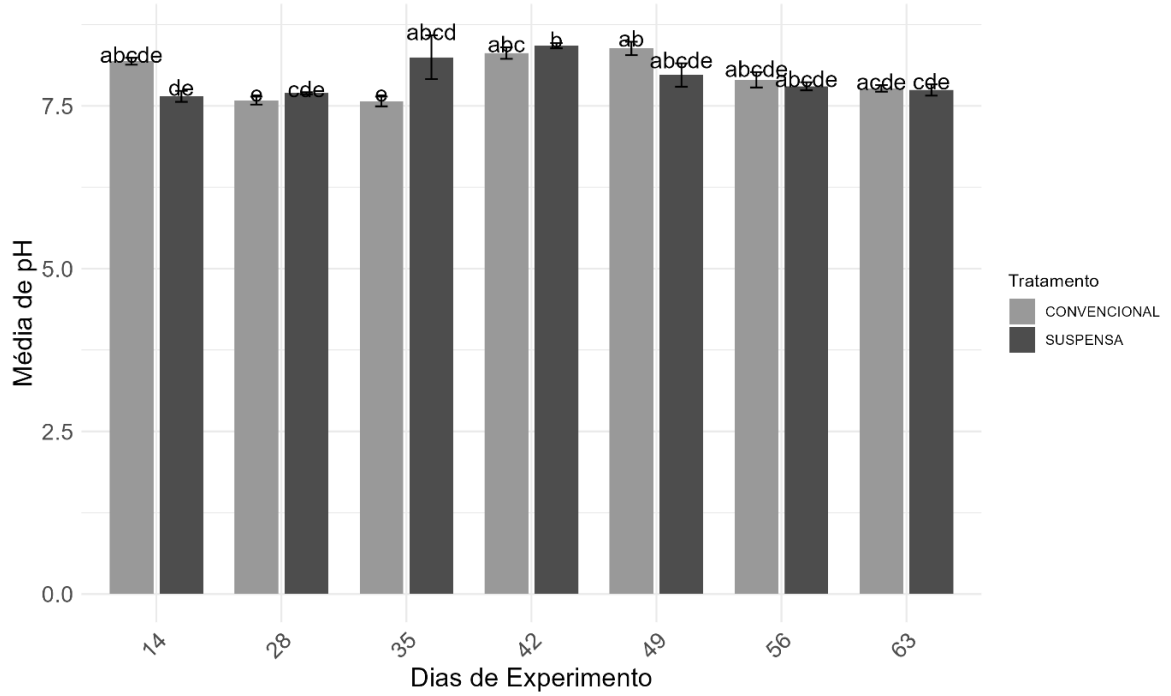


Figura 03: Gráfico de variação de pH.
Fonte: Autor, Software RStudio (2026).

Umidade

Para a umidade, nenhum dos fatores avaliados apresentou significância estatística: "Tratamento" (F = 0,063; p = 0,803), "Dias" (F = 1,364; p = 0,263) e Interação (F = 1,593; p = 0,186). Isso sugere que a umidade foi consistentemente mantida entre os tratamentos e ao longo do tempo, devido à umidificação semanal das leiras. Os teores de umidade variaram entre 50% e 60%, faixa considerada ideal para a atividade microbiana aeróbica [20]. A manutenção da umidade em níveis adequados é fundamental para otimizar a degradação da matéria orgânica e não foi um fator limitante neste experimento [18] [19]. Conforme apresentado na Figura 04.

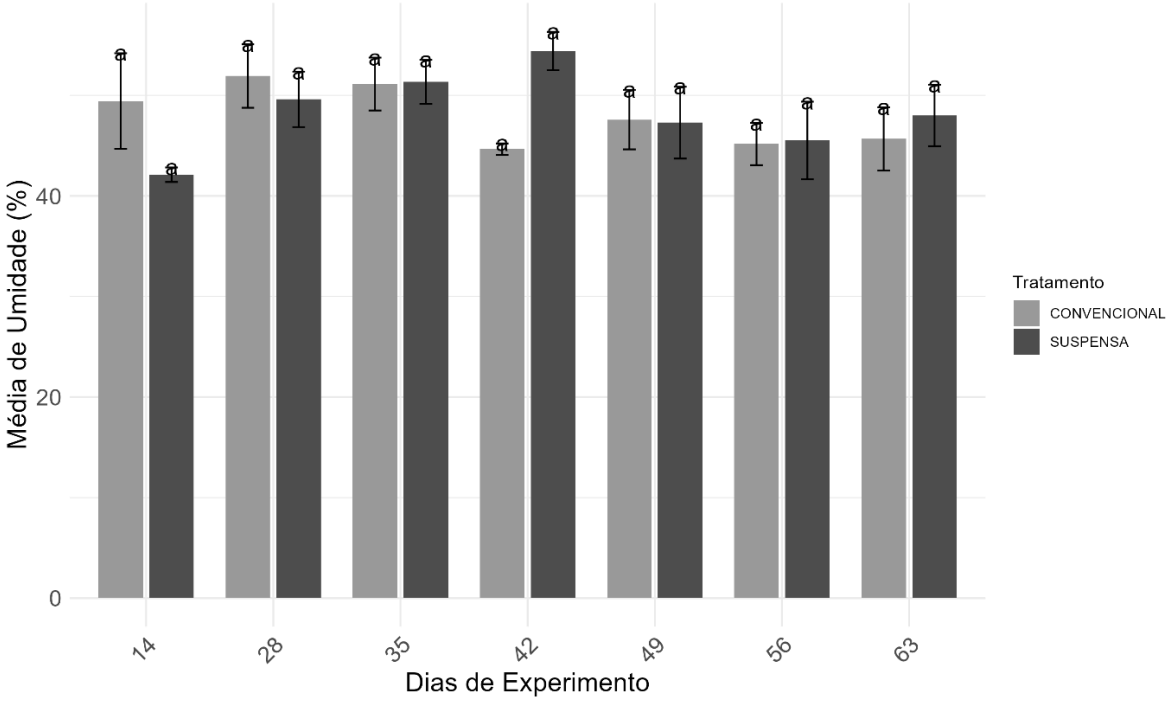


Figura 04: Gráfico de variação de umidade.
Fonte: Autor, Software RStudio (2025).

Condutividade Elétrica (CE)

A Condutividade Elétrica (CE) foi significativamente influenciada pelos fatores “Tratamento” ($F = 23,53$; $p < 0,001$) e “Dias” ($F = 3,42$; $p = 0,0117$), sem efeito significativo da interação ($F = 1,23$; $p = 0,319$). O tratamento suspenso apresentou valores de CE consistentemente superiores ao convencional, com diferenças estatísticas observadas em diversos períodos de avaliação. A CE é um indicador da concentração de sais solúveis no composto, sendo que valores elevados podem estar associados tanto à maior atividade microbiológica em estágios intermediários quanto à possível imaturidade do material [21][4][3].

De acordo com [21], concentrações excessivas de sais podem restringir o uso agronômico, sendo recomendados valores inferiores a 4000 µS/m ao final do processo. Nesse contexto, verifica-se que, apesar das variações observadas, os tratamentos avaliados atenderam a esse limite, indicando adequação quanto à salinidade e ao potencial de uso do composto.

Conforme evidenciado na Figura 05.

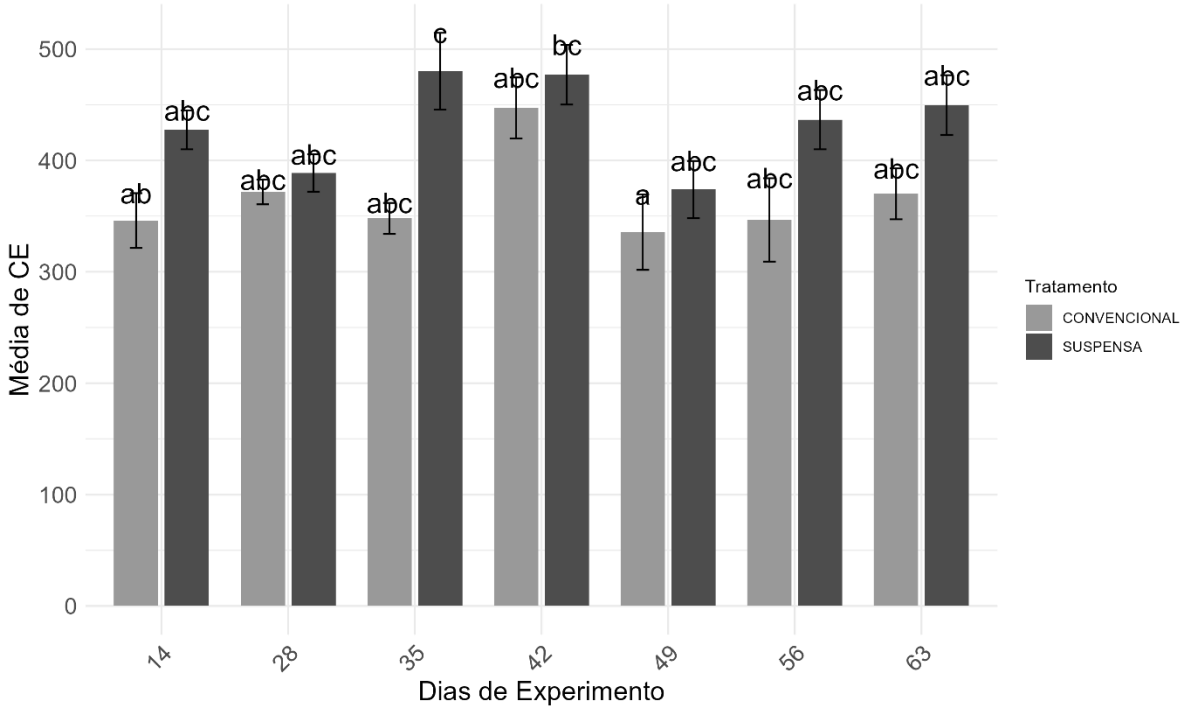


Figura 05: Gráfico de variação de Condutividade Elétrica.
Fonte: Autor, Software RStudio (2025).

Relação Carbono-Nitrogênio (C:N)

Os valores elevados da relação C:N ao final do processo indicam que o composto não atingiu completa estabilização, permanecendo acima da faixa considerada ideal (10:1 a 15:1). Essa condição é indesejável, pois pode promover a imobilização de nitrogênio no solo após a aplicação do composto, comprometendo a disponibilidade desse nutriente para as plantas. Para a otimização desse parâmetro, recomenda-se o ajuste da mistura inicial, com revisão criteriosa das proporções dos materiais constituintes da pilha de compostagem, de modo a alcançar uma relação C:N inicial entre 25:1 e 35:1. Essa adequação pode ser realizada por meio da incorporação de materiais ricos em nitrogênio, como esterco fresco e resíduos orgânicos facilmente degradáveis, ou pela redução da fração de materiais com elevado teor de carbono, conforme descrito por [5] e [23]. A relação C:N apresentou significância estatística para “Tratamento” ($F = 6,58$; $p = 0,0159$) e para “Dias” ($F = 8,66$; $p < 0,001$), mas não para a interação ($F = 0,19$; $p = 0,9772$). Os valores iniciais da relação C:N foram elevados em ambos os tratamentos, indicando excesso de carbono. No tratamento convencional, a C:N inicial foi de 138,02, reduzindo para 74,17. Já no tratamento suspenso, a C:N diminuiu de 119,65 para 50,33. A compostagem suspensa demonstrou maior eficiência na redução relativa da C:N, provavelmente devido à melhor aeração, que favoreceu a atividade microbiana aeróbia [4] [3]. No entanto, os valores finais ainda permaneceram acima da faixa ideal (10:1 a 15:1) para um composto maduro [22]. Conforme exibido na Figura 06.

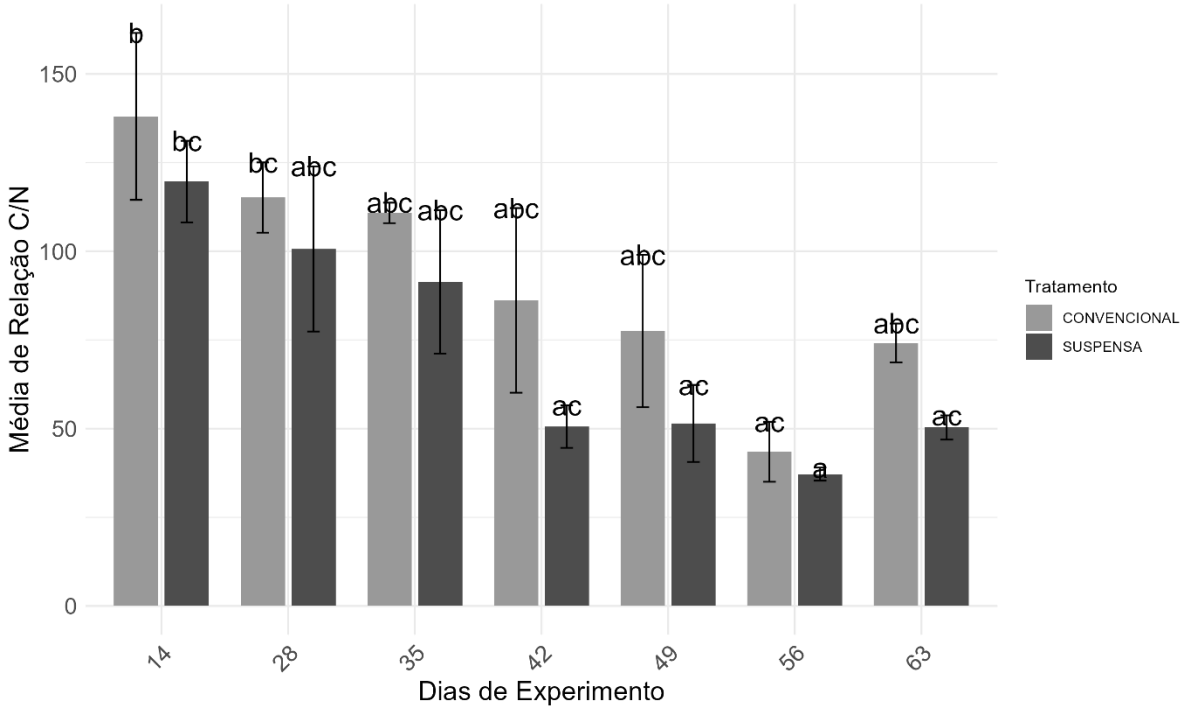


Figura 06: Gráfico de variação de Relação C/N.
Fonte: Autor, Software RStudio (2025).

Considerações Finais

Ambos os sistemas de compostagem, suspenso e convencional, mantiveram condições adequadas de pH e umidade para a atividade microbiana, indicando um ambiente propício para a decomposição da matéria orgânica. Contudo, a ausência de uma fase termofílica bem definida em ambos os tratamentos sugere que a atividade biológica não atingiu seu potencial máximo, o que pode impactar a sanitização e a velocidade de degradação. As oscilações na condutividade elétrica, sem uma estabilização patente em níveis mais baixos, foram observadas em ambos os sistemas. Entretanto, o tratamento suspenso teve maior variação, o que pode indicar uma mineralização mais intensa.

A análise da relação C/N revelou uma redução progressiva em ambos os métodos, embora os valores finais tenham permanecido acima do ideal para um composto totalmente maturado. A compostagem suspensa destacou-se pela maior eficiência na redução relativa da C/N de 57,96% enquanto na compostagem convencional esta redução foi de 46,26%, provavelmente devido à melhor aeração, que favoreceu a atividade microbiana aeróbia e acelerou a degradação. Ambos os métodos demonstraram viabilidade para a compostagem de resíduos, mas há espaço para melhorias. A ausência de uma fase termofílica mais evidente e a relação C/N acima do desejado sinalizam a necessidade de ajustes nas condições operacionais, especialmente na proporção de materiais e na manutenção do processo. A compostagem suspensa pode ser uma alternativa, especialmente considerando a redução C/N. Trabalhos futuros podem explorar estratégias para estimular o aquecimento da massa e melhorar a qualidade final do composto.

Agradecimentos

Aos Professores Dr. Davi Zacarias de Souza, Dr. Marcelo Bortoli e Dra. Sheila Regina Oro, pelas orientações e dedicação, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, ao LABANA – Laboratório de Análise Multiusuário da UTFPR Campus Francisco Beltrão e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental pelo apoio institucional, e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus por permitir que sempre estejamos lutando e batalhando por novas oportunidades.

A todas as pessoas e instituições que contribuíram para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

[1] LAI, J. C.; THER, Y. L.; HWAR, S. S.; LEE, C. S. Optimal aeration management strategy for a small-scale food waste composting. Carbon Resources Conversion, v. 7, n. 1, p. 100190, 2024.

[2] SILVA, V. P. M. Compostagem de resíduos sólidos orgânicos com diferentes sistemas de aeração. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

[3] RASAPOOR, M.; NASRABADI, T.; KAMALI, M.; HOVEIDI, H. The effects of aeration rate on generated compost quality using aerated static pile method. Waste Management, v. 29, n. 2, p. 570-573, 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.04.012.

[4] JI, Z.; ZHANG, L.; LIU, Y.; LI, X.; Li, Z. Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes for aerobic manure composting: A meta-analysis. Sci Total Environ. 2023 Aug 15;886:163929. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163929.

[5] KIEHL, E. J. Fertilizantes Orgânicos. Editora Agronômica Ceres. 248 p. São Paulo, SP, 2010.

[6] IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. 2012. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.

[7] JAKUBUS, M.; SPYCHALSKI, W. Evaluation of agricultural value of composts prepared from municipal biowastes in different conditions of composting process. Agronomy, v. 12, n. 6, p. 1438, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12061438.

[8] ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: 6 jul. 2025.

[9] BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2023: ano base 2022. Brasília: MCID, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/snis. Acesso em: 6 jul. 2025.

[10] MANO, E.; PACHECO, E.; BONELLI, C. Meio Ambiente, Poluição e Reciclagem. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

[11] PEIXOTO, R. T. dos G. Compostagem: Opção Para o Manejo Orgânico do Solo. Londrina: IAPAR, 1988.

[12] PIRES, A. Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema de Compostagem Acelerada para Resíduos Sólidos Urbanos. 2011. Disponível em: http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2011-2/Adriano%20Borges%20Pires.pdf. Acesso em: 10 set. 2023.

[13] KIEHL, E. J. Manual de compostagem: Maturação e Qualidade do Composto. 4. ed. Piracicaba: E. J. KIEL, 2004.

[14] MONTEIRO, J. H. P. et al. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

[15] ONWOSI, C. O. et al. Composting technology in waste stabilization: on the methods, challenges and future prospects. Journal of Environmental Management, v. 190, p. 140–157, 2017.

[16] HOBSON, A. M.; McCRORY, M. E.; HOBBS, P. J. Composting as a treatment method for organic waste. Bioresource Technology, v. 96, p. 215–227, 2005. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.03.014.

[17] REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas: planejamento e gestão. 2. ed. São Paulo: EdUSP, 1999.

[18] LIU, S. et al. Evaluation of compost quality and the environmental effects of semipermeable membrane composting with poultry manure using sawdust or mushroom residue as the bulking agent. Journal of Environmental Management, v. 353, p. 120162, 2024.

[19] WANG, J. et al. Membrane-covered systems improve compost quality and alter microbial communities during composting with microbial inoculation. Journal of Cleaner Production, v. 447, p. 141501, 2024.

[20] MALAVOLTA, E; VITTI, G. C. OLIVEIRA, S. A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989.

[21] MATOS, A. T. de. Tratamento e Aproveitamento Agrícola de Resíduos Sólidos. Viçosa: UFV, 2014.

[22] MELO, W. J.; SILVA, A. M.; DIAS, B. O. Avaliação da maturação de composto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 2195–2207, 2008.

[23] BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: a review. Bioresource Technology, v. 100, n. 22, p. 5444-5453, 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.11.027.

FLAMMABILITY LIMITS OF HVO UNDER SUB-ATMOSPHERIC CONDITIONS: SIGNIFICANT DEVIATIONS FROM FOSSIL DIESEL

José Carlos Andrade[1*], Javier A. Rodríguez Travieso[1], Chistian J. Coronado Rodríguez[2], Fernando de Souza Costa[3], Nestor Proenza Pérez[1]

[1] Department of Chemistry and Energy, UNESP-FEG, Brazil. e-mail:jc.andrade@unesp.br; rodriguez.travieso@unesp.br; nestor.proenza@unesp.br.[2] Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá (UNIFEI), Brasil. email: christian@unifei.com.br. [3] Laboratory of Combustion and Propulsion (LCP), National Institute for Space Research (INPE). São Paulo. Brasil. email: fernando.costa@inpe.br.

Keywords: HVO, limits of flammability, fuel safety

Abstract

Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), a renewable diesel fuel derived from vegetable oils or fats, is considered a "drop-in" fuel compatible with fossil diesel. However, its predominantly paraffinic composition (free of aromatics and with a narrower distillation range) can lead to differences in flammability limits, particularly under sub-atmospheric pressures.

This study presents the experimental determination of the LFL of HVO in a 20 L spherical vessel, and a comparison with literature data and theoretical predictions for fossil diesel, with variations in pressure (10 kPa–101 kPa) and temperature. Under standard conditions (1 atm, 25 °C), the experimental LFL of HVO was 0.76 vol%, in good agreement with the theoretical value calculated using Zabetakis' theory (1965)[1] and the representative molecular formula $C_{14}H_{30}$. Under sub-atmospheric conditions, a significant deviation of 28% to 88% was observed compared to fossil diesel, with higher LFL values for HVO.

The results indicate that HVO exhibits a narrower flammable range at low pressures, suggesting a slight safety advantage, but also highlighting the need for specific data for risk classification in real scenarios (high altitude, tanks under partial vacuum). These findings contribute to the themes of Innovation, Resilience, and Sustainability of the 5th CIEA, reinforcing the importance of safety studies on renewable fuels.

Introduction

The energy transition demands renewable fuels such as HVO, produced by hydrotreating vegetable oils or animal fats. Unlike FAME biodiesel, HVO is a pure paraffinic hydrocarbon fully compatible with diesel engines without modifications (drop-in fuel).[2]

Despite its similarity to fossil diesel at atmospheric pressure, few studies evaluate its flammability behavior under non-standard conditions. The lower flammability limit (LFL) of fossil diesel is commonly reported in the range of 0.6–0.8 vol% under standard conditions. In contrast, limited data are available for Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)[3], and safety data sheets frequently adopt diesel-based values without distinguishing between the two fuels[4].

This work investigates whether this simplification is valid, especially under sub-atmospheric pressures, where volatility and vapor formation differ due to the absence of light fractions and aromatics in HVO. The objectives are: (i) to experimentally determine the LFL of HVO and fossil diesel in a 20 L vessel; (ii) to compare with theoretical calculations based on Zabetakis; and (iii) to assess the impact of pressure and temperature on environmental and industrial safety.

Literature Review

Flammability limits were systematized by Coward & Jones (1952)[5] and Zabetakis (1965)[1]. For liquid hydrocarbons, the LFL depends on the vapor pressure of the more volatile fractions and the adiabatic limit flame temperature (≈ 1,300–1,500 K for paraffins).

At atmospheric pressure, the LFL of fossil diesel ranges from 0.6–0.8 vol%[6], [7]. For pure paraffins (C_{12}–C_{18}), experimental values tend to be slightly higher due to lower volatility. Under sub-atmospheric conditions, the LFL generally increases because gas density decreases and heat losses become more significant.

Studies on HVO focus mainly on engine performance and emissions, with limited data on flammability at reduced pressures. This gap motivates the present study, aligned with the resilience of renewable fuel storage systems.

Materials and Methods

Samples: The physicochemical properties of the HVO used are presented in Table 1, based on manufacturer data and independent analyses[8]. HVO is a commercial renewable diesel (paraffinic, representative molecular formula $C_{14}H_{30}$), and the properties of Diesel S10[6] are presented in Table 2.

Table 1: Physicochemical Properties of HVO

Property	Value	Reference
Approximate molecular formula	$C_{14}H_{30}$	[8]
H/C ratio	2.143	Calculated
Molecular weight [g/mol]	198.4	Calculated
Lower heating value [MJ/kg]	44.10	[8]
Cetane number	76.3	[8]
Specific density at 20°C [kg/m³]	780	[8]
Dynamic viscosity at 40°C [mm²/s]	2.82	[8]
Vapor pressure at 25°C [kPa]	0.087	[8]
Initial boiling point [°C]	180	[8]
Flash point [°C]	61	[8]
Autoignition temperature [K]	477	[8]
Composition		
C (% mass)	84.60	[8]
H (% mass)	15.39	[8]
O (% mass)	0.00	[8]
S (% mass)	0.00	[8]
Paraffins (n- and iso-) [wt%]	>98.5	[9]
Aromatics [wt%]	<1.0	[9]

Table 2: Physicochemical Properties of Diesel S10

Property	Value	Reference
Approximate molecular formula	$C_{12}H_{26}$	[6]
H/C ratio	2.167	Calculated
Molecular weight [g/mol]	170.34	Calculated
Lower heating value [MJ/kg]	45.0	[6]
Cetane number	48	[6]
Specific density at 20°C [kg/m³]	830	[6]
Dynamic viscosity at 40°C [mm²/s]	3.2	[6]
Vapor pressure at 25°C [kPa]	0.4	[6]
Initial boiling point [°C]	150	[6]
Flash point [°C]	38	[6]
Autoignition temperature [K]	508	[6]

Experimental Setup

The flammability chamber consists of a 20-liter spherical borosilicate glass vessel, in accordance with ASTM E681 as shown in Figure 1.

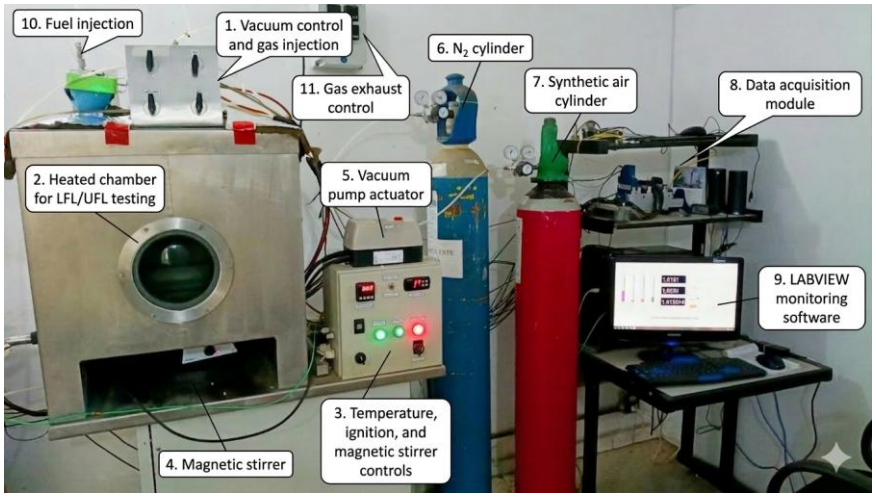


Figure 1: Experimental installation for determination of flammability limits.
Source:Author (2026)

The vessel is housed within a thermally insulated heating jacket with electric resistance elements, capable of maintaining temperatures up to 300°C.

Temperature control is achieved through a PID controller (Novus N1100) with the setpoint based on the internal mixture temperature measured by a type K thermocouple. The system has been optimized to reduce the temperature gradient between the chamber walls and the internal mixture to less than 10°C.

A fused silica observation window permits high-speed video recording (60 fps, Fujifilm HS10) of flame propagation for subsequent analysis.

A high-precision pressure transducer (Warme HT-100, range: -1 to +1 bar, accuracy ±0.5% of full scale) monitors both initial mixture pressure and the transient pressure rise during deflagration.

Three type K thermocouples (Omega Engineering, accuracy ±0.75% of reading) are positioned at different locations to characterize spatial temperature uniformity. The primary control thermocouple is located at the geometric center, approximately 25 mm from the ignition electrodes.

Ignition is achieved by capacitive discharge between tungsten electrodes positioned at the center of the sphere. The electrode gap is maintained at 6.4 mm ± 0.1 mm, and the released energy is 9 J (15 kV, 30 mA for 0.02 s), supplied by a high-voltage transformer.

The gas handling system includes connections for synthetic air (20% O_2, 80% N_2, 99.99% purity. White Martins) and nitrogen (99.99% purity, White Martins).

A two-stage vacuum pump (Edwards RV12) reduces chamber pressure to less than 1 Pa absolute for cleaning and mixture preparation.

A National Instruments compactRIO system (cDAQ-9174 chassis with NI-9213 thermocouple module and NI-9205 analog input module) interfaced with LabVIEW 2020 software provides real-time monitoring, during the vacuum and the injection of fuel and synthetic air, to monitor the exact working temperature. All experimental parameters; pressures, temperatures, timing, and ignition status are recorded for each test.

A calculated volume of liquid HVO is injected into the evacuated, and heated chamber, using a calibrated micropipette (Eppendorf Research Plus. 100-1000 µL. accuracy: ±0.01 mL).

A magnetic stirrer operates to ensure uniform mixture composition and vaporization of fuel.

The flame propagation criterion adopted was $\Delta P \geq 7\%$ of the initial value (adapted from ASTM E681) combined with visual observation whenever possible.

Experimental Procedure

The liquid sample was injected into the evacuated vessel, heated to the desired temperature, and homogenized. After stabilization, ignition was applied and flame propagation was recorded. Tests were repeated at least three times per condition for reproducibility. The experimental apparatus demonstrated excellent performance, with a combined measurement uncertainty of ±2.19%. The Zabetakis model with $C_{14}H_{30}$ proved adequate for characterization under reference conditions.

Theoretical Calculation

Zabetakis' theory (Modified Burgess-Wheeler Law) was applied using the $C_{14}H_{30}$ formula, corrected for the stoichiometric concentration with synthetic air (20% O_2, 80% N_2) via Equation (1), where n_{O2} = 21.5 mol O_2/mol fuel is the stoichiometric oxygen requirement for $C_{14}H_{30}$ combustion, and x_{O2}=0.20 is the molar fraction of O_2 in the synthetic air mixture.. The standard heat of combustion and empirical correlation for paraffins at 25 °C yielded a theoretical LFL of 0.76 vol% at 1 atm.

$$\phi_{stoic} = \frac{1}{1+\frac{nO_2}{xO_2}} \times 100\% = \frac{1}{1+\frac{21.5}{0.20}} \times 100\% = \frac{1}{1+107.5} \approx 0.92\% \quad (1)$$

Results

Atmospheric Conditions (1 atm, 25 °C)

The experimental LFL of HVO was 0.76 vol%, very close to the theoretical value. For fossil diesel, the value of 0.6 vol% (widely reported) was adopted, which is slightly lower. This small difference (≈ 10–12%) reflects the more homogeneous and less volatile composition of HVO.

Sub-Atmospheric Conditions

Table 3 presents Zabetakis predictions for both fuels; experimental HVO values exceed these predictions by 28–88% under sub-atmospheric conditions (see Figure 2). It is important to note that these values correspond to theoretical predictions and do not account for vaporization limitations under reduced pressure.

LFL (T, P)	Diesel(%vol)	HVO(%vol)
25 °C, 101 kPa	0.588	0.507
130 °C, 101 kPa	0.545	0.469
180 °C, 101 kPa	0.530	0.450
130 °C, 10 kPa	0.552	0.264
180 °C, 10 kPa	0.525	0.254

Table 3: LFL predictions for diesel and HVO using Zabetakis semi-empirical model.

Figure 2 presents a comparison between experimental LFL values for HVO and predictions from the Zabetakis model at 101 kPa and 10 kPa over the temperature range 130–180 °C. It should be noted that this comparison was performed using the Zabetakis semi-empirical equation.

At 130 °C and 10 kPa, the model underestimates the LFL by -28 to -38% (experimental: 0.63–0.76% vol.; predicted: 0.450–0.469% vol.).

At 180 °C and 10 kPa, the underestimation increases to -67 to -88% (experimental: 0.77–2.15% vol.; predicted: 0.254–0.264% vol.), highlighting the model's inadequacy under reduced-pressure conditions.

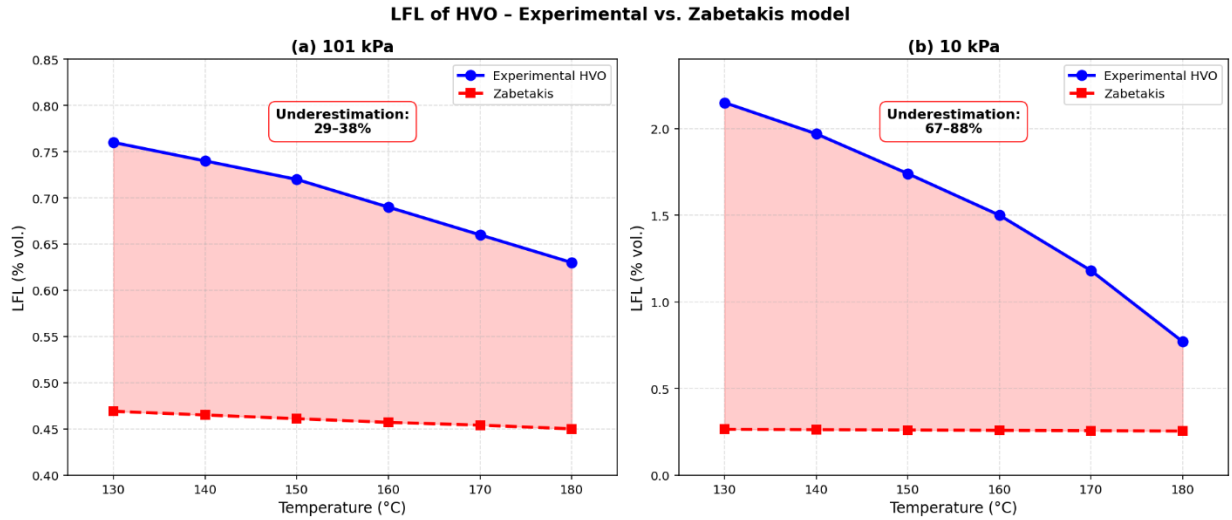


Figure 2: Comparison of LFL predictions (Zabetakis) for diesel and HVO with experimental HVO data at (a) 101 kPa and (b) 10 kPa.
Source:Author (2026)

The results indicate that the deviation increases as pressure decreases, particularly due to vaporization limitations under reduced pressure conditions, reaching up to 88%. The LFL of HVO rises more rapidly, indicating a narrower flammable range.

Discussion

The observed deviations between experimental results and theoretical predictions under sub-atmospheric conditions can be attributed to fundamental thermophysical effects.

At reduced pressures, gas density decreases significantly, leading to enhanced heat losses during flame propagation. This reduces the energy available to sustain combustion, resulting in higher LFL values. Additionally, the vaporization process becomes increasingly limited, especially for fuels with low volatility.

HVO, composed almost entirely of long-chain paraffins (C_{12}–C_{18}), exhibits significantly lower vapor pressure compared to fossil diesel. In contrast, fossil diesel contains lighter fractions and aromatics, which facilitate vapor formation and enhance flammability.

Under sub-atmospheric conditions, this compositional difference is amplified. The reduced presence of volatile components in HVO limits the formation of a combustible mixture, requiring higher fuel concentrations to sustain flame propagation.

Furthermore, classical models such as Zabetakis' correlation assume idealized vapor-phase behavior and do not account for phase equilibrium limitations or transport phenomena under low-pressure conditions. This explains the increasing deviation observed as pressure decreases.

These findings demonstrate that the flammability behavior of HVO cannot be accurately described using conventional diesel correlations, particularly in non-standard environments.

The experimental data in the 20 L vessel showed good agreement with the Zabetakis model under reference conditions, validating the apparatus.~

Implications for safety and environment:

- Need to revise SDS for HVO in applications involving reduced pressure (e.g., tanks at high altitude, partial vacuum systems).
- Contribution to the resilience of renewable fuel infrastructure.
- Support for sustainability by providing accurate data for accident prevention with biofuels.

Conclusions

The experimental determination of the Lower Flammability Limit (LFL) of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) demonstrated that, under standard conditions (1 atm and 25 °C), the value of 0.76 vol% is consistent with theoretical predictions based on Zabetakis' correlation, confirming the applicability of the model under reference conditions.

However, under sub-atmospheric conditions, significant deviations ranging from 28% to 88% were observed, indicating that conventional semi-empirical models systematically underestimate the flammability limits of HVO. This discrepancy becomes more pronounced as pressure decreases, highlighting the influence of vaporization limitations, reduced gas density, and increased heat losses.

The results show that HVO exhibits a narrower flammable range at reduced pressures compared to fossil diesel, suggesting a potential safety advantage in specific scenarios. Nevertheless, the use of generic diesel data for HVO in safety classifications may lead to inaccurate risk assessments, particularly in systems operating under non-standard pressure conditions.

Therefore, this study demonstrates that HVO should not be treated as equivalent to fossil diesel in flammability analyses, especially under sub-atmospheric conditions. The findings reinforce the need for dedicated experimental data and the development of improved predictive models for renewable paraffinic fuels.

Final Comments

This study provides original experimental data on the flammability limits of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) under sub-atmospheric conditions, a topic that remains scarcely explored in the literature. The results clearly demonstrate that conventional predictive approaches, such as Zabetakis' correlation, are insufficient to accurately describe the behavior of paraffinic renewable fuels under reduced pressure.

The observed deviations highlight the importance of considering phase equilibrium, vaporization limitations, and heat loss mechanisms in flammability analysis. These factors become increasingly relevant in scenarios such as high-altitude storage, partially evacuated systems, and industrial processes involving pressure variations.

From a practical perspective, the findings support the need for revising safety data sheets (SDS) and developing dedicated predictive models for renewable fuels. Future work should focus on expanding the experimental database, evaluating upper flammability limits (UFL), and proposing improved semi-empirical or mechanistic models.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the support provided by UNESP-FEG, UNIFEI, and INPE for enabling the development of this research. The authors also thank the technical staff and the Laboratory of Gasification and Combustion – LACG (INPE), where the experimental setup, instrumentation, and data acquisition were conducted. Their contributions were essential to the successful execution of this study.

References

[1] M. G. Zabetakis, "Flammability characteristics of combustible gases and vapors," 1965, Bureau of Mines Bulletin 627. [Online]. Available: http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0701576

[2] N. Corporation, "Neste Renewable Diesel Handbook," 2020.

[3] GASOIL, "Automotive Gasoil (AGO) and Hydrotreated Vegetable Oil (HVO): Chemically the Same Fuel? - Peninsula Yacht Services." Accessed: Mar. 22, 2026. [Online]. Available: https://yachts.peninsula360.com/news/automotive-gasoil-ago-and-hydrotreated-vegetable-oil-hvo-chemically-the-same-fuel/

[4] CONIAC, "DRAFT: Safety of Alternatives to Onsite Diesel: Things to… | CONIAC." Accessed: Mar. 22, 2026. [Online]. Available: https://www.coniac.org.uk/resources/safety-of-alternatives-to-onsite-diesel-things-to-consider-hvo

[5] H. F. Coward and G. W. Jones, “Limits of flammability of gases and vapors Important,” H.F. Coward and G. W. Jones, pp. 1–162, 1952, [Online]. Available: https://shepherd.caltech.edu/EDL/PublicResources/flammability/USBM-503.pdf

[6] PETROBRAS DISTRIBUIDORA, “SDS Diesel S10 BR0119 PETROBRAS DISTRIBUIDORA,” www.vibraenergia.com.br, Mar. 2021. [Online]. Available: https://petroservpetroleo.com.br/wp-content/uploads/2022/04/FISPQ-Diesel-B-S10.pdf

[7] B. M. M. Vivas and É. F. Zanoelo, “An experimental investigation of flammability limits and autoignition temperatures of petrofuels and biofuels in a tubular burner,” in Combustion Science and Technology, 2011, pp. 1433–1444. doi: 10.1080/00102202.2011.605776.

[8] O. Neste, “Material Safety Data Sheet. Neste Renewable Diesel,” 2022, pp. 1–30.

[9] EIA, “International Energy Agency. Energy and Air Pollution,” 2016. doi: 10.1021/ac00256a010.

EXTRATOS AQUOSO E SALINO DE SEMENTES DE *MORINGA OLEIFERA*: INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE LODO EM ÁGUA DE ALTA TURBIDEZ

1 Maria Eduarda de Matos Inácio, 2 Agnes de Jesus Caporal Mostaceros, 3 Mirella Klausen da Silveira, 4 Bárbara Luíza Souza Freitas, 5 Bruno Segalla Pizzolatti

1 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: m.eduarda.matos@grad.ufsc.br; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: agnes.caporal.mostaceros@grad.ufsc.br; 3 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: mirella.klausen@posgrad.ufsc.br; 4 Universidade de São Paulo, e-mail: barbaralsfreitas@usp.br; 5 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: bruno.segalla@ufsc.br

Palavras-chave: Biodegradável; Coagulante vegetal; Reaproveitamento.

Resumo

O tratamento convencional de água utiliza coagulantes químicos, cujos resíduos podem apresentar toxicidade e gerar lodos com características indesejáveis. Além disso, a presença de alumínio na composição destes coagulantes levanta preocupações para a saúde pública, sendo associada na literatura a possíveis efeitos neurotóxicos. Nesse cenário, cresce o interesse por alternativas naturais frente aos químicos, como as sementes de *Moringa oleifera*, com o objetivo de reduzir esses riscos e tornar o processo de coagulação-floculação-sedimentação (CFS) mais sustentável. Neste contexto, o presente estudo avaliou a geração de lodo proveniente do uso de extratos aquoso e salino de sementes de *Moringa oleifera* após o processo de CFS, bem como o potencial de reaproveitamento desse resíduo. Os ensaios foram conduzidos com água de turbidez inicial de 200 uT, utilizando extratos a 1% em diferentes dosagens (25 mg/L a 1000 mg/L), sendo o volume de lodo quantificado pelo método do cone *Imhoff*. Os resultados indicaram que o extrato aquoso apresentou menores volumes nas dosagens iniciais (0,17 mL/L entre 25 mg/L - 45 mg/L), enquanto o extrato salino gerou valores superiores em toda a faixa analisada, variando de 0,73 mL/L a 23,67 mL/L. A análise estatística confirmou diferença significativa entre os métodos ($p = 0,00001$), com padrão mantido tanto para as dosagens ≤ 500 mg/L quanto para > 500 mg/L ($p < 0,001$ em ambos os casos), evidenciando a influência do solvente na geração de lodo. Apesar disso, a literatura aponta que os resíduos de coagulantes naturais apresentam características favoráveis, como biodegradabilidade e presença de nutrientes, reforçando seu potencial de uso agrícola e em processos biológicos. Ainda assim, persistem lacunas na literatura quanto ao reaproveitamento desse resíduo sólido, especialmente no que se refere à sua composição, aos efeitos de longo prazo no solo e à comparação com insumos convencionais, o que evidencia a necessidade de estudos adicionais para validar seu uso seguro e viabilizar sua aplicação em alternativas de reaproveitamento do lodo.

Introdução

A água potável é indispensável à vida e ao desenvolvimento humano, sendo sua qualidade um fator determinante para a saúde pública (Dadhich; Dadhich; Goya, 2022). Em escala global, os setores industrial e agrícola são responsáveis por aproximadamente 90% do consumo hídrico, e as projeções indicam que o aumento da demanda tem sido acompanhado pelo agravamento da contaminação dos mananciais (Boretti *et al*., 2019), o que reforça a necessidade de tratamentos adequados para garantir a potabilidade.

A coagulação-floculação-sedimentação (CFS) é uma etapa essencial no tratamento de águas, sendo responsável pela remoção eficiente de diversos contaminantes, especialmente partículas coloidais (Pereira *et al*., 2025; Yazdandoost; Zonoozi, 2025). Convencionalmente, esse processo utiliza coagulantes químicos à base de sais metálicos (*e.g.*, sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio e cloreto férrico) (Yazdandoost; Zonoozi, 2025). No entanto, seu uso está associado a diversos impactos, como alterações de pH, corrosividade, elevada geração de lodo e riscos potenciais à saúde humana (*e.g.*, toxicidade, doenças neurodegenerativas) (Kurniawan *et al*., 2020). Além disso, o lodo gerado pode conter metais, limitando seu reaproveitamento e ampliando preocupações quanto à sua disposição final. Nesse cenário, coagulantes naturais, obtidos a partir de fontes vegetais ou animais, têm sido investigados como alternativas sustentáveis aos coagulantes químicos (Puchalski *et al*., 2026).

Coagulantes vegetais têm se destacado pelo potencial para a remoção de parâmetros físico-químicos, microbiológicos e de contaminantes emergentes (Puchalski *et al*., 2026). Diversas espécies de vegetais, tais como *Phaseolus vulgaris, Aloe vera, Opuntia ficus-indica, Strychnos potatorum* e *Carica papaya*, apresentam esse desempenho coagulante promissor e eficiência já comprovada (Puchalski *et al*., 2026). Entre essas, destaca-se a *Moringa oleifera*, uma espécie amplamente estudada não apenas por seu elevado valor nutricional, mas também pela eficácia de suas sementes como coagulante natural, apresentando resultados consistentes em diferentes matrizes e condições operacionais (Cao *et al*., 2023; Puchalski *et al*., 2026).

Apesar de sua eficiência amplamente relatada na literatura, uma das formas de potencializar ainda mais o coagulante extraído das sementes de *M. oleifera* é a utilização de diferentes solventes para a extração das proteínas, como água, NaCl, KCl, hexano, acetona e éter, que influenciam diretamente a composição dos extratos e, consequentemente, a eficiência do processo (Puchalski *et al*., 2026). A extração aquosa é amplamente utilizada por ser econômica e de fácil preparo. No entanto, a extração

salina tende a apresentar melhor desempenho na remoção de parâmetros (*e.g*., turbidez e cor aparente), pois promove maior solubilização de proteínas em função do aumento da força iônica (Yamaguchi *et al*., 2021).

Além da eficiência, o método de extração influencia a geração e as características do lodo, cuja composição depende da qualidade da água bruta e dos insumos utilizados (Ahmad; Ahmad; Alam, 2016; Tony, 2022). Esse resíduo é gerado, principalmente, na decantação e lavagem de filtros, podendo conter matéria orgânica e, no caso de coagulantes químicos, metais (Libânio, 2008; Santos *et al*., 2021). No Brasil, o lodo é classificado como resíduo sólido e deve ser gerenciado conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) e a ABNT NBR 10004/2024 (ABNT, 2024), embora ainda sejam observadas práticas inadequadas de descarte (Lucena *et al*., 2017). Nesse cenário, coagulantes naturais apresentam vantagens por gerarem lodos predominantemente biodegradáveis, com menor toxicidade e potencial de reaproveitamento (Hamawand *et al*., 2017; Kurniawan *et al*., 2020). No entanto, o volume e as características desses resíduos ainda variam conforme o método de extração, sendo esse um fator crítico a ser considerado.

Embora exista uma base consolidada acerca dos lodos gerados em processos que utilizam coagulantes químicos, ainda persistem lacunas no entendimento dos resíduos provenientes de coagulantes naturais obtidos por diferentes métodos de extração, como no caso da *Moringa oleifera*. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a geração de lodos a partir do uso de dois extratos (aquoso e salino) das sementes da espécie, bem como levantar possibilidades de reaproveitamento do resíduo, contribuindo para o avanço de alternativas mais sustentáveis e para a gestão adequada desses subprodutos.

Materiais e Métodos

Preparo dos extratos das sementes de *Moringa oleifera*

As sementes de *Moringa oleifera* foram coletadas de árvores da região da Grande Florianópolis (SC, Brasil), garantindo a padronização do coagulante. Foram preparados dois tipos de extrato (aquoso e salino) com base em metodologias descritas na literatura (Addich *et al*., 2024; Arantes *et al*., 2012; Patidar *et al*., 2018). Em ambos os métodos, as vagens maduras foram secas ao sol por 7 dias, as sementes foram descascadas, trituradas, secas em estufa a 75 °C por 3 h e peneiradas (1 mm). O extrato aquoso a 1% foi obtido com 5 g de pó em 200 mL de água destilada, sob agitação por 20 min, seguido de filtração e ajuste de volume para 500 mL. O extrato salino a 1% foi preparado de forma análoga, considerando aproximadamente 3 g de NaCl para 500 mL de água destilada, seguido da filtração e do ajuste final do volume.

Preparo da água sintética

A água sintética foi preparada conforme Lopes *et al*. (2025), utilizando água da rede de abastecimento local de Florianópolis/SC previamente declorada como matriz para o ajuste das propriedades físico-químicas (*e.g.*, turbidez e cor verdadeira). Os parâmetros estabelecidos foram turbidez de 200 uT ± 5 uT e cor verdadeira de 75 uH ± 5 uH. O valor de turbidez inicial foi adotado para avaliar o desempenho do coagulante em cenários de alta concentração de partículas.

A turbidez foi ajustada com uma mistura de argilas bentoníticas policatiônicas bege (T-minas, Paraná, BR) e amarela (Argimel, Bahia, BR), na concentração final de 0,80 g/L, combinadas na razão 19:1 (m/m). A cor verdadeira foi obtida com a adição de uma infusão concentrada de erva-mate torrada (*Ilex paraguariensis*), preparada por infusão, resfriamento e peneiramento, calculada para atingir cerca de 75 uH. Após a incorporação dos constituintes, a água sintética foi homogeneizada e mantida em repouso por 24 h para assegurar a completa hidratação das partículas de bentonita (Karnena *et al*., 2022).

Ensaios de quantificação de lodo

Inicialmente, para os ensaios de coagulação-floculação, foram estabelecidas como condições operacionais o gradiente de mistura rápida (GMr) de 335 s^{-1} por 1 min e o gradiente de mistura lenta (GMl) de 30 s^{-1} por 10 min. Os ensaios de ambos os métodos foram conduzidos em *Jar Test* (marca Ethik), utilizando jarros com capacidade de 2 L. Após a etapa de mistura lenta, procedeu-se à quantificação do lodo, realizada conforme a NBR 10561/1998 (ABNT, 1998), com o uso do cone de *Imhoff*. Transferiu-se 1 L de amostra de cada jarro, mantendo-o em repouso por 45 min, seguido de agitação com haste de vidro para desprendimento de partículas e novo repouso por 15 min, para posterior leitura do volume de sólidos sedimentáveis (mL/L). Ensaios preliminares foram realizados para avaliar a remoção de valores de turbidez nas diferentes dosagens, possibilitando definir a faixa de dosagem mais adequada para ambos os métodos de extração. Observou-se uma maior eficiência do extrato salino na remoção de valores de turbidez em baixas dosagens, enquanto o extrato aquoso apresentou melhor desempenho em dosagens mais elevadas. Assim, priorizaram-se dosagens ≤ 500 mg/L para o extrato salino e > 500 mg/L para o aquoso, sendo a quantificação de lodo realizada entre dosagens de 25 mg/L e 1000 mg/L para ambos.

Análise estatística dos dados

Os dados experimentais foram organizados e analisados utilizando a linguagem de programação *Python.* A normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk. A partir desse resultado, a comparação entre os métodos de extração foi realizada utilizando o teste *t* para amostras independentes quando a normalidade foi atendida, ou o teste de Mann-Whitney quando apresentado ausência de normalidade. O nível de significância adotado foi de 5% ($p < 0,05$). Adicionalmente, as comparações foram realizadas considerando o conjunto completo de dados e também separadamente para diferentes faixas de dosagem de ambos os extratos (≤ 500 mg/L e > 500 mg/L).

Resultados e Discussão

Quantificação do lodo para água de 200 uT

O extrato aquoso apresentou baixa produção de lodo em doses iniciais (0,17 mL/L para 25 mg/L - 45 mg/L), aumentando gradualmente apenas em concentrações a partir de 400 mg/L. A variabilidade foi elevada em algumas faixas de dosagem trabalhadas (*e.g.*, 62,45% em 75 mg/L e 46,29% em 430 mg/L), indicando heterogeneidade na dispersão relativa dos dados (Figura 1A). Em contraste, o extrato salino apresentou valores médios superiores de lodo gerados em todas as faixas de dosagem, iniciando em 0,73 mL/L (25 mg/L) e atingindo 23,67 mL/L em 1000 mg/L. O aumento do volume de lodo ocorreu de forma mais acentuada nas baixas dosagens (Figura 1B), com médias superiores a 2,50 mL/L já a partir de 40 mg/L. Em geral, o coeficiente de variação foi menor (*e.g.*, 0,52% em 215 mg/L e 2,84% em 900 mg/L).

A normalidade dos dados do volume de lodo gerado (Shapiro-Wilk) indicou que os dados avaliados não apresentaram distribuição normal, tanto para o extrato aquoso ($p = 0,00009$) quanto para o extrato salino ($p = 0,02601$). Dessa forma, optou-se pela utilização de um teste não paramétrico (Mann-Whitney) para a comparação entre os grupos.

Considerando o conjunto completo de dados (Figura 1A), foi observada uma diferença estatisticamente significativa entre os métodos ($p = 0,00001$), indicando que o tipo de extrato influencia o volume de lodo gerado. Com o objetivo de avaliar se essa diferença se mantinha ao longo das faixas de dosagem aplicadas, os dados foram analisados para dosagens ≤ 500 mg/L (Figura 1B) e > 500 mg/L (Figura 1C). Em ambas as condições, o teste de Mann-Whitney indicou diferenças significativas entre os métodos de extração ($p < 0,001$).

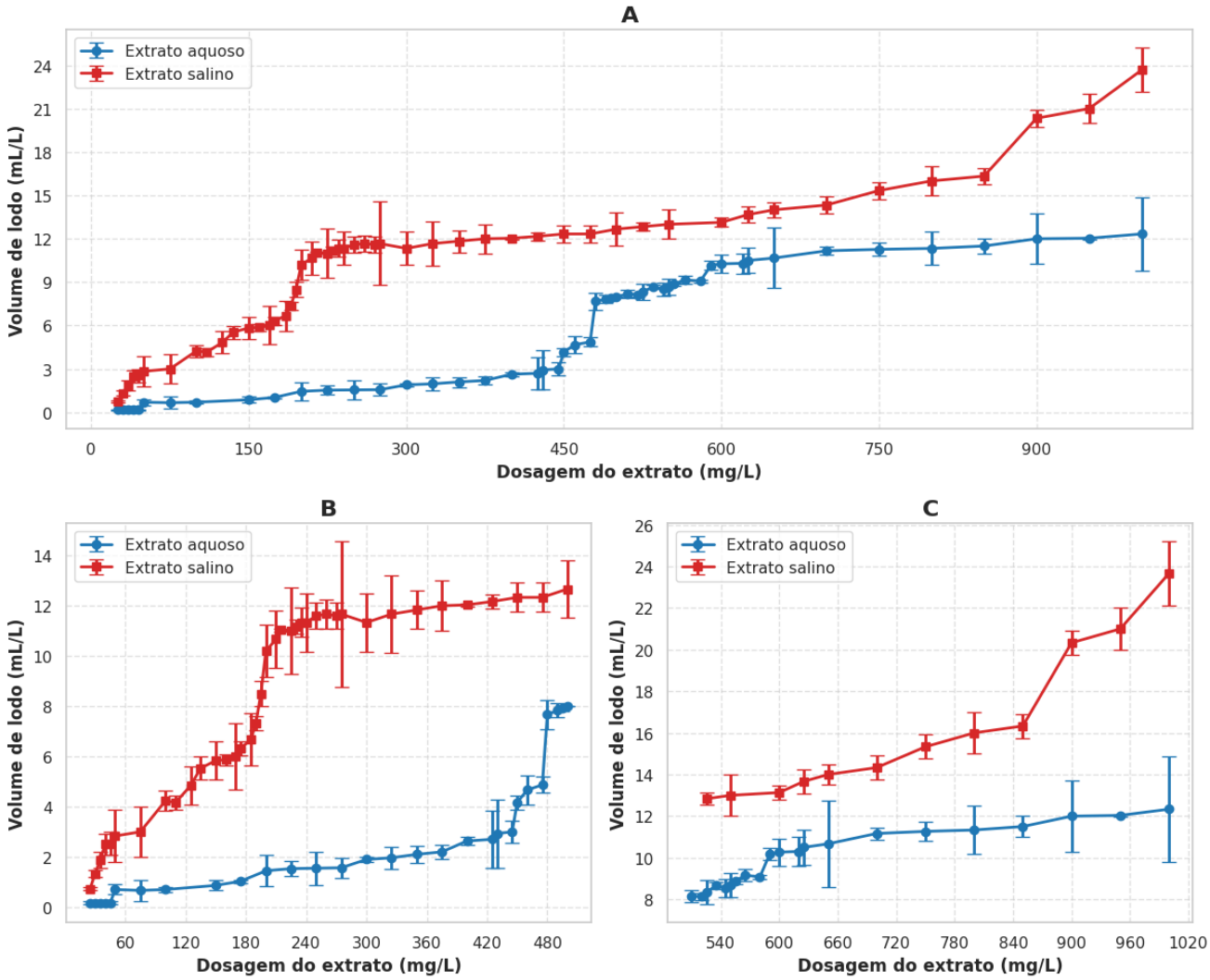


Figura 01: Volume de lodo gerado em função da dosagem dos extratos aquoso e salino. Legenda: (A) Comparação do volume de lodo gerado das dosagens de ambos os extratos; (B) Comparação do volume de lodo gerado das menores dosagens (≤ 500 mg/L) dos extratos; (C) Comparação do volume de lodo gerado entre as maiores dosagens > 500 mg/L) dos extratos. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A análise estatística indicou que o método de extração das sementes de *Moringa oleifera* influenciou o volume de lodo gerado no processo de CFS, com diferenças entre os extratos ao longo das faixas de dosagem avaliadas (Figura 01). De modo geral, o extrato salino promoveu maior produção de lodo, mesmo em menores dosagens (≤500 mg/L).

A eficiência da extração das proteínas do coagulante está diretamente relacionada ao solvente utilizado (Shah et al., 2025). Estudos indicam que a extração em água destilada resulta em menor desempenho coagulante devido à baixa concentração de íons e, consequentemente, à limitada solubilidade das proteínas, enquanto soluções salinas favorecem esse processo ao aumentar a força iônica do meio (Skaf *et al*., 2021; Shah et al., 2025). Como exemplo, Shah *et al*. (2025) observaram que o coagulante preparado a partir da extração salina (1 M NaCl) reduziu a turbidez de 80 uT para valores inferiores a 5 uT. No presente estudo, o extrato aquoso apresentou menor geração de lodo, embora tenha alcançado elevada eficiência de remoção de turbidez (> 95%) em dosagens mais elevadas (> 500 mg/L), conforme observado em estudos preliminares (dados não publicados). Em contraste, o extrato salino atingiu eficiências semelhantes em menores dosagens (≤ 500 mg/L), porém com maior volume de lodo gerado.

Da Silveira e Moecke (2021), ao avaliarem diferentes coagulantes em águas com turbidez inicial de 21,30 uT e 73,98 uT, observaram que o extrato aquoso de sementes de *Moringa oleifera* gerou 0,8 mL/L de lodo (50 mg/L) e 4,8 mL/L (80 mg/L), respectivamente, enquanto coagulantes químicos, como o sulfato de alumínio (25,2 mg/L) e o cloreto de polialumínio (8,58 mg/L), apresentaram volumes de 8,5 mL/L e 8,0 mL/L para a turbidez de 73,98 uT. No presente estudo, o extrato aquoso também apresentou baixos volumes de lodo nas faixas iniciais de dosagem (0,17 mL/L entre 25 mg/L e 45 mg/L), enquanto o extrato salino apresentou aumento progressivo, variando de 0,73 mL/L (25 mg/L) a 23,67 mL/L (1000 mg/L). Resultados semelhantes quanto à influência do método de extração foram observados por Abidin *et al*. (2013), que, ao utilizarem extratos de *Jatropha curcas* em águas com turbidez entre 50 uT e 500 uT, reportaram volumes de aproximadamente 0,0050 mL/mL para extrações com água e NaCl 0,5 M, superiores aos obtidos com NaOH 0,5 M (0,0036 mL/mL), reforçando a tendência de maior geração de lodo associada à extração salina com NaCl.

Embora soluções salinas, como NaCl e KCl, sejam amplamente utilizadas por promoverem maior solubilização de proteínas e melhor desempenho na remoção de parâmetros como turbidez, cor aparente e verdadeira (Villaseñor-Basulto *et al*., 2018), a extração aquosa permanece como alternativa relevante devido ao seu baixo custo, simplicidade operacional e maior aplicabilidade em contextos rurais e de maior vulnerabilidade (Yamaguchi *et al*., 2021).

O lodo gerado em processos de tratamento (*e.g.*, água, esgoto e efluentes) tem se destacado como uma variável relevante, especialmente em função dos custos e desafios associados ao seu manejo e à destinação final. Em sistemas convencionais que utilizam coagulantes químicos à base de metais, esse resíduo pode apresentar elevadas concentrações de metais, o que levanta preocupações quanto à sua toxicidade e aos impactos ambientais quando disposto em solos ou corpos hídricos. Mesmo diante de diretrizes normativas (ABNT, 2024; Brasil, 2010), ainda são observadas práticas inadequadas de descarte, potencializando riscos, como contaminação ambiental, alterações no pH, geração de odores e comprometimento da qualidade do solo e da água (Lucena *et al*., 2017; Motta *et al*., 2019).

Tomasi, Boaventura e Botelho (2025) demonstraram que o lodo gerado no tratamento de efluentes têxteis com sulfato de alumínio apresentou, como esperado, maior teor de alumínio (387 mg/g ± 1 mg/g) em comparação ao Tanfloc (72,2 mg/g) e à casca de castanha (12,3 mg/g), além de maiores concentrações de outros metais (*e.g.*, Cr, Ca, Fe, Mg, Sr, Zn e B), o que pode dificultar seu manejo e reaproveitamento. Nesse contexto, estudos têm investigado alternativas de valorização desse resíduo, como sua incorporação em materiais de construção (*e.g.*, concreto, blocos, tijolos e pavimentos intertravados) e a conversão por processos termoquímicos ou biológicos, visando à obtenção de produtos de maior valor agregado (*e.g.*, biomoléculas, bioenergia, óleos e biochar) (Kiran *et al*., 2022; Patel *et al*., 2024; Tomasi; Boaventura; Botelho, 2025).

Em contraste, lodos gerados por coagulantes naturais tendem a apresentar composição rica em matéria orgânica e nutrientes, com menor presença de metais, favorecendo aplicações como condicionadores de solo ou fertilizantes (Kurniawan *et al*., 2020). Estudos também indicam potencial de uso em digestão anaeróbia e recuperação de biomassa, além de baixa toxicidade indicada em testes toxicológicos, como aqueles realizados com sementes de *Lactuca sativa* (Hamawand *et al*., 2017; Michelan *et al*., 2021; Yunos *et al*., 2017). A pesquisa de Oyebamiji *et al*. (2023), ao avaliarem a *Moringa oleifera* no tratamento de efluentes aquícolas, observaram que o lodo gerado apresentou teores de carbono orgânico entre 4% e 20%, contribuindo para a melhoria das propriedades do solo. De forma semelhante, Bhuvanendran *et al*. (2024) relataram o uso de coagulantes naturais (*e.g.*, *Hibiscus rosa-sinensis*, casca de limão e casca de laranja) no tratamento de efluentes da indústria de laticínios, com posterior aproveitamento do lodo na produção de ração animal.

Apesar dessas evidências, ainda são limitados os estudos sobre o reaproveitamento do lodo gerado em processos de CFS com coagulantes naturais. Persistem lacunas quanto à variabilidade da composição desse material, seus efeitos no solo a longo prazo e seu desempenho comparativo em relação aos coagulantes químicos. Além disso, há carência de protocolos padronizados para tratamento, armazenamento e aplicação, reforçando a necessidade de avanços em pesquisas experimentais e em escala piloto que validem tecnicamente seu reuso e ampliem sua viabilidade prática, reduzindo incertezas e viabilizando sua inserção segura em práticas de reaproveitamento.

XXXXConsiderações finais

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a geração de lodo é significativamente influenciada pelo método de extração das sementes de *Moringa oleifera*. Observou-se que o extrato salino promove maior produção de lodo em comparação ao extrato aquoso, diferença confirmada estatisticamente ($p < 0,001$). Enquanto o extrato aquoso apresentou valores iniciais em torno de 0,17 mL/L, o extrato salino variou de aproximadamente 0,73 mL/L até 23,67 mL/L, independentemente da faixa de dosagem avaliada. O comportamento está associado ao efeito da força iônica do NaCl, que favorece a solubilização e aumenta a eficiência de coagulação, resultando, consequentemente, em maior geração de sólidos sedimentáveis (lodo).

O presente estudo apontou o potencial dos coagulantes de origem vegetal como alternativa aos coagulantes químicos convencionais, especialmente pela ausência de metais como alumínio e ferro, frequentemente associados a impactos ambientais e potenciais riscos à saúde humana. Essa característica confere ao lodo gerado um perfil menos restritivo, reduzindo sua toxicidade e ampliando suas possibilidades de destinação e reaproveitamento, particularmente em aplicações agrícolas e de valorização de biomassa.

A literatura indica que o lodo proveniente de coagulantes naturais apresenta natureza predominantemente orgânica e potencial nutritivo, sendo promissor como condicionador de solo. Entretanto, ainda existem lacunas quanto à sua caracterização e segurança em diferentes condições operacionais e de aplicação. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de ampliação das investigações envolvendo diferentes matrizes de tratamento, métodos de extração e escalas operacionais, de modo a consolidar o conhecimento sobre suas características e destinação. Estudos em escala piloto e de longo prazo são necessários para validar tecnicamente seu reaproveitamento e viabilizar sua aplicação segura.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio das bolsas do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) concedidas a Agnes de Jesus Caporal Mostaceros e Maria Eduarda de Matos Inácio, bem como da bolsa de Pós-Doutorado no Exterior (PDE) concedida a Bárbara Luíza Souza Freitas. Mirella Klausen da Silveira agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES-PROEX).

Referências Bibliográficas

ABIDIN, Zurina Z. et al. Optimisation of a method to extract the active coagulant agent from Jatropha curcas seeds for use in turbidity removal. **Industrial Crops and Products,** v. 41, p. 319-323, 2013.

ADDICH, Mourad *et al.* Optimization of coagulation-flocculation in urban water treatment using *Moringa oleifera*. **Desalination and Water Treatment**, v. 320, p. 100707, 2024.

AHMAD, Tarique; AHMAD, Kafeel; ALAM, Mehtab. Characterization of water treatment plant's sludge and its safe disposal options. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 950-955, 2016.

ARANTES, Camila C.; RIBEIRO, Tulio A. P.; PATERNIANI, José E. S. Processamento de sementes de *Moringa oleifera* utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 6, p. 661–666, jun. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10561/1998, Determinação de resíduo sedimentável (sólidos sedimentáveis) - Método do cone de Imhoff - Método de ensaio**. ABNT, 1998.

BHUVANENDRAN, Rahul Krishna et al. Implications of natural coagulants and the development of a chemical coagulation reactor for dairy wastewater treatment with product recovery from waste sludge. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, n. 3, p. 4695-4715, 2025.

BORETTI, Alberto; ROSA, Lorenzo. Reassessing the projections of the world water development report. **NPJ Clean Water**, v. 2, n. 1, p. 15, 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CAO, Jiarui et al. *Moringa oleifera* leaf protein: Extraction, characteristics and applications. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 119, p. 105234, 2023.

DA SILVEIRA, Mirella Klausen; MOECKE, Elisa Helena Siegel. Estudo comparativo entre o uso do coagulante extraído das sementes de *Moringa oleifera* e os coagulantes químicos no tratamento de água. **Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade**, v. 1, n. 5, p. 59-80, 2021.

DADHICH, Ankita Pran; DADHICH, Pran N.; GOYAL, Rohit. Synthesis of water, sanitation, and hygiene (WaSH) spatial pattern in rural India: an integrated interpretation of WaSH practices. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 57, p. 86873-86886, 2022.

HAMAWAND, Ihsan et al. A critical review on processes and energy profile of the Australian meat processing industry. **Energies**, v. 10, n. 5, p. 731, 2017.

KARNENA, Manoj Kumar; DWARAPUREDDI, Bhavya Kavitha; SARITHA, Vara. Alum, Chitin and Sago as coagulants for the optimization of process parameters focussing on coagulant dose and mixing speed. **Watershed Ecology and the Environment**, v. 4, p. 112-124, 2022.

KIRAN, Shumaila et al. Characterization and valorization of sludge from textile wastewater plant for positive environmental applications. **Handbook of Biomass Valorization for Industrial Applications**, p. 465-489, 2022.

KURNIAWAN, Setyo Budi et al. Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 24, p. 9312, 2020.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Átomo, 2008.

LOPES, Ana Maria Beims *et al.* MLSens settler: Development and evaluation of a novel self-cleaning approach for horizontal tube settlers. **Journal of Water Process Engineering**, v. 80, p. 109145, dez. 2025.

LUCENA, Lêda Christiane Lopes et al. Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de ETA e de ETE. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 3, p. 873-890, 2017.

MICHELAN, Denise Conceição de Gois Santos et al. Uso do coagulante/floculante emergente à base de *moringa* no tratamento de água com verificação da composição e toxicidade do lodo produzido: tratamento de água com *Moringa* e toxicidade do lodo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 05, p. 955-963, 2021.

MOTTA, Maurício Alves da et al. Geração, tratamento e disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, p. 761-771, 2019.

OYEBAMIJI, Olufunke et al. Comprehensive treatment and analysis of Fishpond sediments as a source of organic fertilizers. **arXiv preprint arXiv:2304.07630**, 2023.

PATEL, Reshma L. et al. Development of Rubber Mould Paver Blocks Using Textile Effluent Treatment Plant Sludge. In: **International Conference Innovation in Smart and Sustainable Infrastructure**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 395-410.

PATIDAR, Krutika *et al.* Experimental investigation of *Sterculia foetida* and *Moringa oleifera* as a coagulant for water and wastewater treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 122, p. 254–259, ago. 2018.

PEREIRA, Danielle Segóvia CA et al. Estudo da remoção de Cryptosporidium spp. e Giardia spp. em água para abastecimento. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, p. 43-60, 2025.

PUCHALSKI, Beatriz Silvestre et al. Plant-based coagulants for sustainable treatment: Insights from a systematic review and their potential application in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 401, p. 128973, 2026.

SANTOS, Lucas Avelino Reis et al. Verificação da produção de lodo de ETA em função da quantidade e da qualidade da água bruta. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, v. 15, n. 2, p. 235-258, 2021.

SHAH, Ahsan et al. Green yet constrained: Reassessing *Moringa oleifera*'s role in drinking water and wastewater treatment. **Cleaner Water**, p. 100202, 2025.

SKAF, Dorothy W. et al. Impact of *Moringa Oleifera* extraction conditions on zeta potential and coagulation effectiveness. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104687, 2021.

TOMASI, Isabella Tonial; BOAVENTURA, Rui AR; BOTELHO, Cidália MS. Comparative study of natural and chemical coagulants for continuous-flow treatment of textile wastewater. **Chemical Engineering Science**, p. 122476, 2025.

TONY, Maha A. Valorization of undervalued aluminum-based waterworks sludge waste for the science of "The 5 Rs' criteria". **Applied Water Science**, v. 12, n. 2, p. 20, 2022.

VILLASEÑOR-BASULTO, Déborah L. et al. Wastewater treatment using *Moringa oleifera Lam* seeds: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 23, p. 151-164, 2018.

YAMAGUCHI, Natália Ueda et al. A review of *Moringa oleifera* seeds in water treatment: Trends and future challenges. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 147, p. 405-420, 2021.

YAZDANDOOST, Zahra; ZONOOZI, Maryam Hasani. Treatment of oil-water emulsion through coagulation-flocculation and sedimentation using waterworks sludge as a green agent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 3, p. 116548, 2025.

YUNOS, Fareza Hanis Mohd et al. Harvesting of microalgae (*Chlorella sp.*) from aquaculture bioflocs using an environmental-friendly chitosan-based bio-coagulant. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 124, p. 243-249, 2017.

BIODEGRADAÇÃO DE POLITERAFTALATO DE ETILENO (PET) MEDIADA POR FUNGOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DAS TENDÊNCIAS GLOBAIS

1 Ana Luiza Esmeraldo de Almeida, 2 Rebeca de Lima Oliveira, 3 Guilherme Gomes de Sousa Magalhães, 4 Tatiana Souza Porto, 5 Liliana Andréa dos Santos, 6 André Felipe de Melo Sales Santos

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: analuiza.almeida@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: rebeca.limaoliveira@ufrpe.br; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: guilherme.gsmagalhaes@ufrpe.br; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: tatiana.porto@ufrpe.br; 5 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: liliana.santos@ufrpe.br; 6 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: andre.felipesantos@ufrpe.br

Palavras-chave: consórcio fúngico; micorremediação; gestão de resíduos sólidos.

Resumo

A gestão de resíduos de Politereftalato de Etileno (PET) constitui um desafio ambiental devido à sua estrutura semicristalina e hidrofóbica, que resiste à degradação natural, além de sua produção massiva combinada a um sistema de gestão de resíduos ineficaz. Diante desse cenário, este estudo objetivou mapear o panorama científico global e as tendências observadas da biodegradação do PET mediada por fungos através de uma análise bibliométrica. A metodologia baseou-se no protocolo PRISMA, com coleta de dados na base Web of Science entre 2005 e 2025. O processamento das informações utilizou linguagem Python, Microsoft Excel® e o software VOSviewer® para a construção e análise das redes bibliométricas. Os resultados revelaram um crescimento exponencial recente, com 70% da produção científica concentrada entre 2021 e 2025 e ápice produtivo em 2023. As evidências indicam que as fronteiras do conhecimento convergem para a hidrólise enzimática, mediada por cutinases e hidrolases fúngicas, visando superar a recalcitrância do polímero. A análise de coocorrência de termos ratificou a emergência do avanço nas alternativas de tratamento e sugeriu a formação de nichos científicos específicos em publicações recentes, como Khurana et al. (2025) e Okal et al. (2025). Diante do exposto, concluiu-se que a micodegradação desempenha um papel de destaque e catalisador no avanço da bioeconomia, contribuindo para a gestão de resíduos de PET e consolidando-se como uma alternativa de abordagem estratégica para a valorização sustentável de resíduos poliméricos.

Introdução

Os plásticos são amplamente utilizados na sociedade contemporânea devido à sua notável versatilidade, baixo custo e durabilidade. Embora tais características contribuam para seu uso cotidiano em larga escala, elas também tornam esses polímeros recalcitrantes ampla e, muitas vezes, incorretamente disponibilizado ao meio ambiente (Carvalho et al., 2025; Sayed et al., 2025). Além disso, essa onipresença gera danos ecológicos significativos, pois tais materiais possuem alta capacidade de absorver e liberar substâncias tóxicas que comprometem a saúde humana, além de contribuírem diretamente para o aquecimento global mediante a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes durante seu ciclo de descarte (Sayed et al., 2025; Rao; Radha, 2025). Dados recentes indicam que a produção global atingiu expressivos 430,9 milhões de toneladas em 2024, evidenciando uma escala industrial massiva (Plastics Europe, 2025; Rao; Radha, 2025). Em paralelo, estima-se que apenas 9% do plástico produzido globalmente seja efetivamente reciclado (Carvalho et al., 2025), além da taxa de envio de resíduos plásticos para aterros sanitários chegar a 100%, em países de baixo desenvolvimento, e a 30%, em média, nos países europeus (Rao; Radha, 2025). Diante disso, fica evidente que as atuais tendências de crescimento da disposição de resíduos poliméricos não tratados enfatizam a necessidade de implementar a economia circular e meios de biodegradação de larga escala, assim como exposto por Jiao et al. (2026).

O Politereftalato de Etileno (PET) figura como um dos polímeros mais resistentes à degradação natural devido à sua natureza semicristalina, inerte e hidrofóbica (Hernández-Nava et al., 2025; Sayed et al., 2025). Atualmente, a gestão desses resíduos é insuficiente – apenas 42% das garrafas PET são recicladas, enquanto o restante é incinerado ou aterrado –, o que posiciona a biodegradação como uma alternativa técnica superior e mais sustentável aos métodos mecânicos e térmicos convencionais (Carvalho et al., 2025; Hernández-Nava et al., 2025).

Nesse contexto, o uso de cepas fúngicas e seus complexos enzimáticos surge como solução estratégica para a hidrólise do polímero em monômeros reutilizáveis (Okal et al., 2025; Jiao et al., 2026). O objetivo, portanto, deste estudo bibliométrico, focado na biodegradação de PET mediada por fungos, é mapear o estado da arte da área, contribuindo para um melhor entendimento do tema. A análise identifica tendências de pesquisa, contribuições científicas de impacto, padrões de citação e redes de colaboração, além de evidenciar lacunas sobre os mecanismos moleculares de desconstrução essenciais para mitigar o impacto ambiental deste resíduo.

Material e Métodos

O trabalho caracteriza-se como uma análise bibliométrica, de caráter exploratório, que buscou descrever o panorama atual dos estudos utilizando cepas fúngicas para biodegradação do PET. A pesquisa foi realizada na base de dados *Web Of*

Science (*Clarivate*). O processo de seleção dos documentos a serem utilizados seguiu o método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Prisma), amplamente referenciado (Page et al., 2020), sendo dividido em: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão (Figura 01). A etapa de identificação foi conduzida na base de dados considerando todos os campos para a pesquisa, num período de 2005 a 2025, e foram utilizadas as seguintes palavras-chave e operadores booleanos: (biodegradation OR biodegradability) AND ("Polyethylene Terephthalate" OR "PET plastic") AND (aspergillus OR fungus); resultando então em 84 documentos relacionados. Além disso, aplicou-se os filtros de "artigos" e "artigos de revisão" para refinamento, levando a diminuição de um documento. Na seleção, finalizada no dia 23 de janeiro de 2026, foram observados por leitura direta os títulos e resumos dos artigos, excluindo aqueles não aderentes ao tema, reduzindo então a base de dados, após uso desse critério, para 55 documentos. A seguir, na etapa de elegibilidade, os artigos foram lidos em sua integralidade, para selecionar aqueles que estavam dentro do escopo de interesse, não havendo alteração na seleção. Por fim, a inclusão consolidou a seleção em 55 artigos, garantindo a relação com a temática em foco.

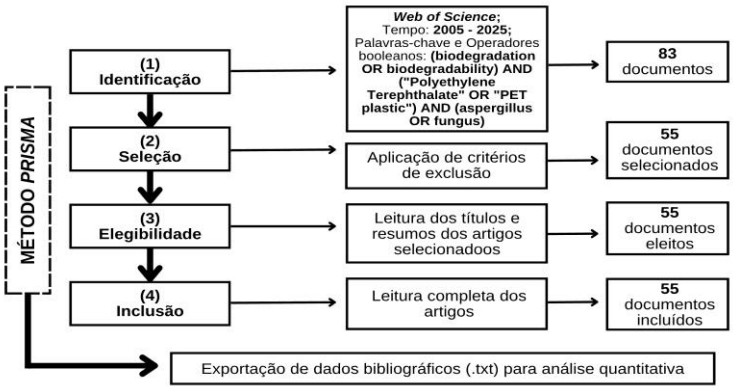


Figura 01: Fluxograma do Método PRISMA utilizado para seleção dos artigos para bibliometria.
Fonte: A autora (2026)

Os dados bibliográficos dos artigos selecionados foram exportados no formato *TXT* diretamente da base de dados *Web of Science*, para análise bibliométrica detalhada, que foi realizada utilizando alguns *softwares* para o estudo bibliométrico, tais quais: o *VOSviewer®,* para criar as redes bibliométricas; o *Microsof Excel®*, para organização e análise descritiva dos dados; e o ambiente *Google Colab®*, com uso da linguagem *Python*, para geração de gráficos representativos.

Resultados e Discussão

Análise da Produção Científica

Analisando a produção científica na área de estudo entre 2005 e 2025, observou-se que o primeiro artigo foi publicado em 2006, por Sasek et al., intitulado "*Biodegradation of synthetic polymers by composting and fungal treatment*", situado nas zonas periféricas da rede bibliométrica de documentos (Figura 03). Até 2020 a produção foi linear, com publicações esporádicas, com apenas um documento (1,82% do total analisado) a cada poucos anos, exceto por 2018, em que houve duas (3,64%) publicações, conforme representado na Figura 02.

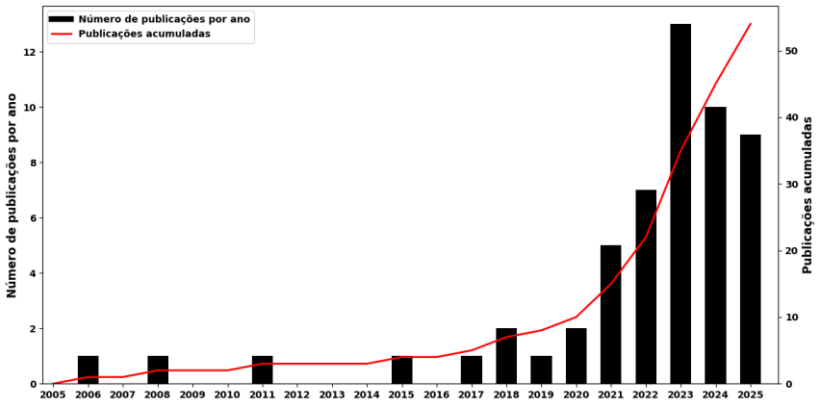


Figura 02: Gráfico temporal de publicações de 2005 até 2025.
Fonte: A autora (2026)

Trabalhos influentes como Nimchua et al. (2008) e Wei e Zimmermann (2017) surgiram neste período, estabelecendo as bases citacionais que sustentam a rede atual. Ocorreu um salto significativo nas produções em 2021, que passou de dois artigos

em 2020 para cinco (9,09%), a partir daí o interesse acadêmico na temática cresceu continuamente. De 2021 até 2025, concentra-se a maior parte de toda a produção identificada, com 70% das publicações. O pico de produção se deu em 2023, onde foram publicados treze artigos (23,64%), desde então a faixa de publicações por ano se manteve em 2024 e 2025, com dez (18,18%) e nove (16,36%) publicações respectivamente, o que indica que a temática está em seu auge de relevância científica atualmente, atraindo um volume constante de novos pesquisadores e colaborações. Em 2025, houve uma produção significativa de dez artigos publicados na temática, dentre eles Salinas et al. (2025) se destaca com 21 citações, seguida por Khurana et al. (2025), com 5 citações, e Gambarini et al. (2025) com 4 citações. Os demais documentos apresentam 0 citações. Não há um padrão relacionado ao tempo de publicação, já que os dois segundos mais citados de 2025 foram publicados em agosto e junho, respectivamente, então apesar do artigo de Salinas et al. ser de fevereiro, não condiz com o observado nas outras duas.

Análise das Citações de Documentos

Dos 55 artigos selecionados, 51 documentos apresentaram conexões entre si (Figura 03), demonstrando alta coesão no campo de interesse. O artigo mais influente foi o de Wei e Zimmermann (2017), intitulado "*Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?*", com 584 citações. Alguns fatores combinados explicam a posição da publicação, o artigo está entre os 10 mais antigos da seleção, e, principalmente, é um artigo de revisão da literatura. Seu objetivo é discutir os avanços recentes nos estudos acerca de biocatalisadores para degradação de plástico, especialmente a hidrólise, o que conversa com a maioria dos artigos selecionados. Vale mencionar ainda, que o segundo documento mais influente, com 486 citações, de Amobonye et al. (2021), intitulado "*Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes*", também é uma revisão de literatura, porém com uma abrangência maior que Wei e Zimmermann (2017). O artigo buscou analisar o papel que actinomicetos, algas, bactérias e fungos podem desempenhar na biodegradação de plásticos sintéticos, com foco em seus mecanismos enzimáticos e de quebra. Além disso, discutiu a manipulação de microrganismos na clonagem molecular e modificação de enzimas. Por fim, os cinco artigos de maior impacto na rede bibliométrica apresentam uma convergência teórica que sustenta os pilares da pesquisa atual sobre biodegradação de plásticos. A correlação primária entre eles reside no enfoque dado a biocatálise enzimática, onde proteínas específicas, como cutinases e hidrolases, são mecanismos centrais para a quebra de polímeros recalcitrantes.

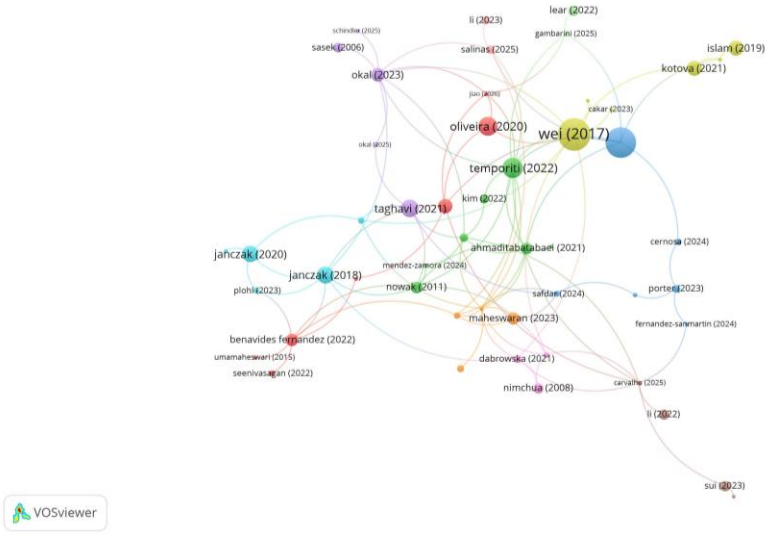


Figura 03: Rede bibliométrica de citação de documentos.
Fonte: A autora (2026)

Enquanto Wei e Zimmermann (2017) e Amobonye et al. (2021) atuam como catálogos fundamentais para mapear a eficiência dessas enzimas, Temporiti et al. (2022) aprofunda a discussão tratando do potencial específico de fungos e suas enzimas no processo degradativo. Além da base técnica, esses trabalhos compartilham a visão da biodegradação como um impulsor para a Economia Circular, propondo a transição do plástico de "lixo" para "recurso". Oliveira et al. (2020) e Wei e Zimmermann (2017) enfatizam que a reciclagem biológica permite a recuperação de monômeros de alta qualidade e a valorização de subprodutos para a indústria. Por fim, a conexão prática é estabelecida por Taghavi et al. (2021) e Temporiti et al. (2022), no uso de linhagens estimuladas para superar as barreiras físicas da alta cristalinidade dos plásticos. Devido à sua natureza de revisão e consolidação de dados, esses artigos operam como *hubs* de informação, integrando os diferentes agrupamentos (*clusters)* da rede e servindo de base para os demais estudos da amostra.

Análise bibliométrica das citações de países

A rede bibliométrica de países com publicações na temática é formada por 33 países, os quais foram representados na Figura 04, onde o tamanho dos *clusters* apresentados é proporcional a quantidade de artigos publicados por país. Ao observar a

disposição, fica evidente que não há um centro de alta produção de pesquisas relacionadas a micodegradação de plásticos PET, dado que a maioria dos países identificados possui contribuições pontuais. A distribuição se deu de forma que: 42,42% dos países apresentam apenas 1 publicação; 30,30% com 2 publicações; duas parcelas de 12,12% para 3 e 4 publicações; e, por fim, 3,03% para 7 publicações, que representa apenas um país. Esta pulverização indica que a área ainda possui muitas lacunas e gargalos a serem resolvidos e o interesse geral denota a importância do tema, bem como os desafios de sua aplicação.

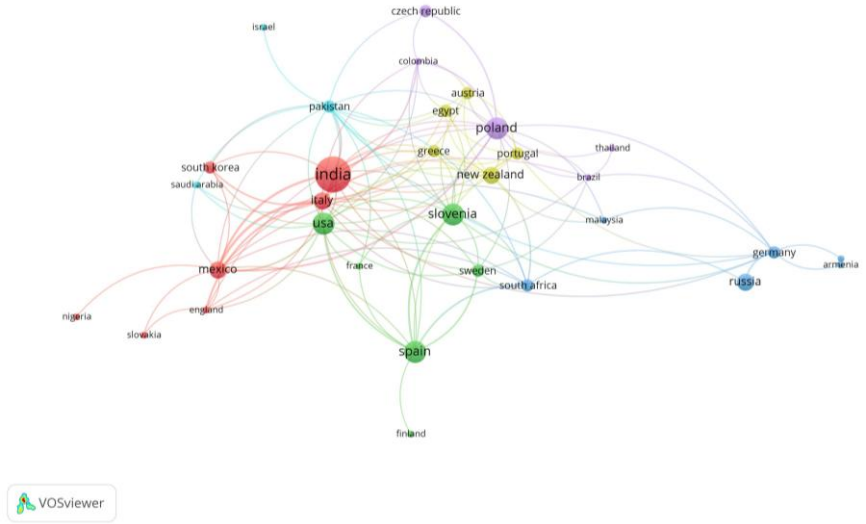


Figura 04: Rede bibliométrica de citação de países na área analisada.
Fonte: A autora (2026)

A Índia se destacou como o país com maior número de artigos publicados, com 7 documentos. Seguida pela Espanha, Polônia, Eslovênia e Estados Unidos da América (USA) com 4 publicações em cada. Vale mencionar também Itália, México, Nova Zelândia e Rússia, que contam com 3 artigos publicados cada. O Brasil faz parte do percentual de países com apenas 1 publicação, o artigo intitulado "*Fungal Screening for Potential PET Depolymerization*", dos autores Malafatti-Picca et al. (2023).

Dentre os países asiáticos, a Índia possui a conexão mais forte, o que indica uma alta integração dos pesquisadores em redes de coautoria, tanto interna, quanto externamente. Para além disso, a liderança da Índia se fundamenta em características ambientais e infraestrutura de pesquisa do país. São notórios os desafios enfrentados pelo país no tangente a gestão de resíduos sólidos e poluição advinda de resíduos poliméricos, Cottom, Cook e Velis (2024) apontam que anualmente as emissões plásticas não gerenciadas da Índia se aproximam de 9,3 milhões de toneladas (M t), representando cerca de 20% do total global, em vista disso, o interesse acadêmico se volta a soluções biotecnológicas. Se faz relevante, ainda, elucidar a robustez da infraestrutura de pesquisa em biotecnologia e microbiologia consolidada no país, que possui baixo custo e uma produção de larga escala de artigos experimentais. Os autores Thatoi et al. (2025) evidenciam a especialização do país em microbiologia aplicada ao comparar a eficiência de linhagens naturais e estimuladas na degradação de polímeros. Ademais, conforme detalhado no documento oficial "*Achievements of Department of Biotechnology- Year Ender* 2025", o país consolidou recentemente uma infraestrutura sólida através da criação da *National Biofoundry Network*, que visa acelerar a biofabricação e a biologia sintética (Índia, 2025). Em paralelo, ao analisar a influência dos países no campo de estudo, os resultados não seguem o padrão de distribuição pela quantidade de publicações. O país de maior influência foi a Alemanha, com 671 citações, apesar de possuir apenas dois artigos publicados, sendo um deles o artigo de Wei e Zimmermann (2017), a publicação mais influente da seleção, discutida no tópico anterior. Como segundo mais influente, com 486 citações, está a Coreia do Sul, com duas publicações.

Destaca-se que a Índia está na décima quarta posição, com 125 citações, o que deixa uma média de 17,8 citações por artigo, enquanto a média de citações por artigo da Alemanha é de 335,5, então apesar do volume de produção, sua influência é menos significativa. Além disso, o Brasil ocupa a vigésima sexta posição, com apenas 9 citações, o que se justifica devido à publicação do artigo de Malafatti-Picca et al. (2023) ser recente e sua revista possuir baixo impacto.

Análise bibliométrica das citações de periódicos

No estudo bibliométrico, foram identificados 46 periódicos, dos quais 42 formaram 9 *clusters,* como representado na Figura 05. Não há uma variação aparente significativa no tamanho dos *clusters*, pois os periódicos têm de 1 a 3 artigos publicados sobre biodegradação de plásticos PET, seguindo o padrão de distribuição dos países.

Dois periódicos se destacam com 3 publicações, o maior volume por periódico da seleção, *Science of The Total Environmen*t e *Journal of Cleaner Production*, com 523 e 31 citações respectivamente. Em 2024, ambos tiveram um alto Fator de Impacto (FI), uma métrica que indica a média de citações recebidas pelos artigos de um periódico nos dois anos anteriores (Pinto; Andrade, 1999), segundo o *Journal Citation Reports* (JCR) da *Clarivate*, iguais a 8 e 10, respectivamente. A elevada taxa de citações de obras como a de Wei e Zimmermann (2017) e Amobonye et al. (2021), ambas publicações da *Science of The Total Environment*, ratifica que a transformação biotecnológica de plásticos é um dos pilares mais influentes da ciência ambiental contemporânea, já referida por Taghavi et al. (2021) e Hernández-Nava et al. (2025). Destaca-se o *Water Research* com FI igual

a 12,4, que hospeda o artigo "*Hydrostatic pressure drives microbe-mediated biodegradation of microplastics in surface sediments of deep reservoirs*" de Yu et al. (2023), com 99 citações.

Além disso, tratando da influência do periódico na temática, considerando o número de citações, o mais influente é o *Microbial Biotechnology*, com 584 citações de apenas 1 artigo publicado de Wei e Zimmermann (2017) intitulado "*Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?*", com FI igual a 5,20 em 2024. O segundo mais influente é o *Science of The Total Environment*, com 523 citações distribuídas em 3 publicações e um FI de 8,00 em 2024. De acordo com Garfield (2006), o Fator de Impacto atua como um indicador de prestígio e utilidade acadêmica, situando essas publicações no topo da hierarquia de influência em suas respectivas categorias biotecnológicas.

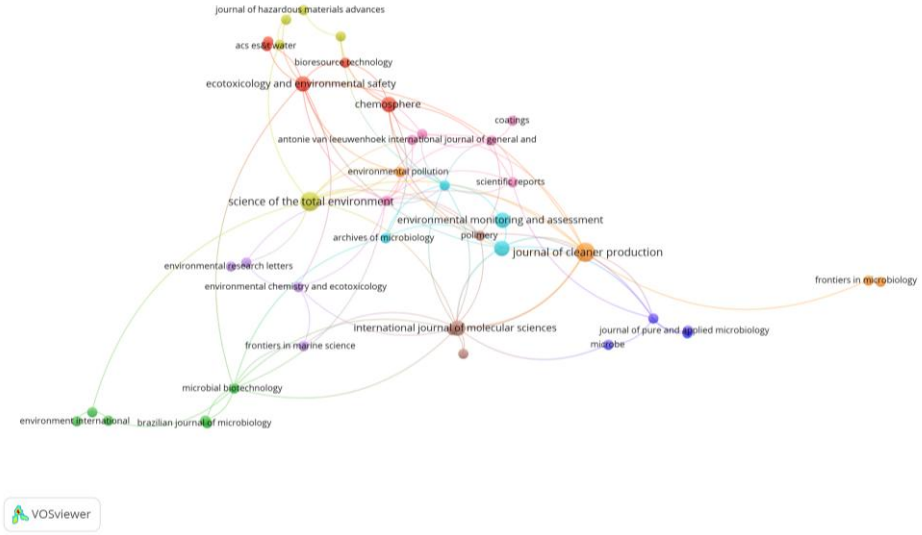


Figura 05: Rede bibliométrica das citações de fontes, com *clusters* proporcionais ao número de documentos.
Fonte: A autora (2026)

Análise bibliométrica das coocorrência de palavras-chave

A rede bibliométrica de coocorrência de todas as palavras-chave da seleção identificou 365 palavras-chave, 85 apresentando pelo menos duas ocorrências, após retirar as repetições, 7 *clusters* foram formados com 82 termos. Destacaram-se os termos: *biodegradation* (38 ocorrências); *degradation* (19); *polyethylene terephthalate* (17); como disposto na Figura 06. Além disso, as palavras *cutinase* (15) e *fungi* (12) estão entre as cinco palavras mais citadas, indicando o viés que o campo de pesquisa que a biodegradação de plásticos está tomando.

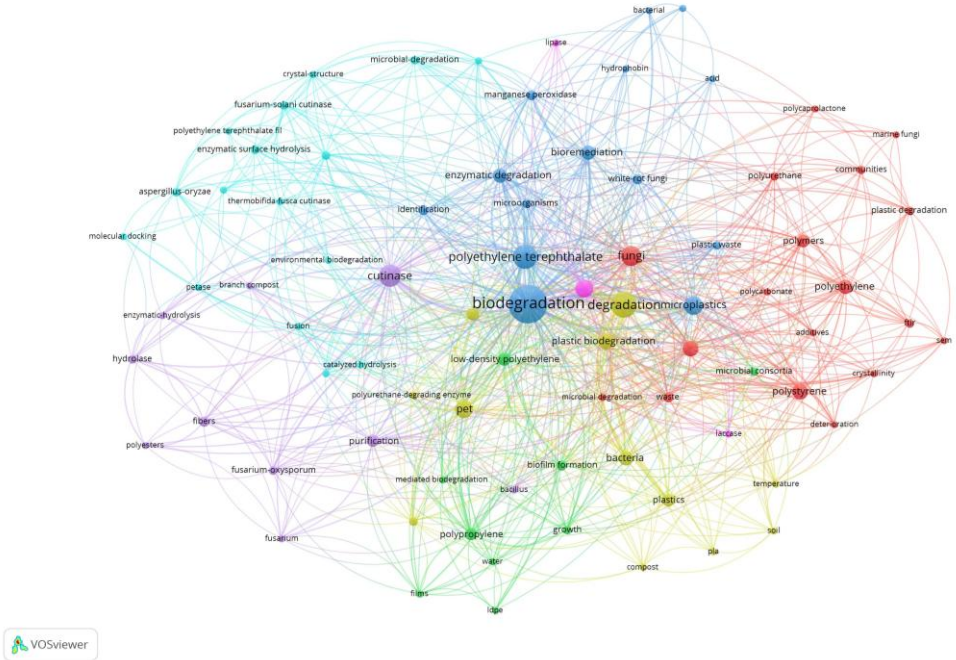


Figura 06: Distribuição da coocorrência de palavras-chave.
Fonte: A autora (2026)

O termo *polyethylene terephthalate*, popularmente denominado PET, é o polímero de referência dos artigos, de maneira condizente com as palavras-chave dispostas na fase de identificação. Ainda assim, outros polímeros apresentam fortes conexões e ocorrências relevantes, tais como: *polystyrene* (8 ocorrências), *polyester polyurethane* (8) e *polyethylene* (7); o que indica um cenário onde as pesquisas são mais abrangentes, com documentos focados não apenas no PET. De mesmo modo, *fungi* é a palavra-chave com maior número de ocorrências e relevância conectiva dentre os agentes biológicos identificados na seleção, além de outros termos relacionados como: *white-rot fungi* (4) e *marine fungi* (2). Conforme supracitado, os termos foram agrupados em 7 *clusters*, de acordo com as temáticas secundárias referentes a biodegradação de polímeros, que estão descritos no Quadro 01.

Cor na Figura 06	Cluster	Número de Itens	Termos Relacionados	Temática
Vermelho	1	18 itens	*additives, communities, crystallinity, deterioration, ftir, fungi, marine fungi, microbial degradation, plastic degradation, polycaprolactone, polycarbonate, polyester polyurethane, polyethylene, polymers, polystyrene, polyurethane, sem, waste.*	Análise estrutural da degradação de polímeros e microplásticos
Ciano	2	16 itens	*aspergillus-oryzae, catalyzed hydrolysis, crystal-structure, cutinase-catalyzed hydrolysis, environmental biodegradation, enzymatic surface hydrolysis, fusarium-solani cutinase, fusion, microbial-degradation, molecular docking, petase, phanerochaete-chrysosporium, polyester hydrolases, polyester-polyurethane, polyethylene terephthalate, thermobifida-fusca cutinase.*	Engenharia de Enzimas e Mecanismos Bioquímicos
Azul	3	14 itens	*acid, bacterial, biodegradation, bioremediation, enzymatic degradation, hydrophobin, identification, manganese peroxidase, microorganisms, microplastics, plastic waste, polyethylene terephthalate, polylactide, white-rot fungi.*	Biodegradação utilizando fungos
Amarelo	4	12 itens	*bacteria, compost, degradation, hydrolysis, pet, pla, plastic biodegradation, plastics, polyurethane-degrading, pseudomonas, soil, temperature.*	Compostagem e Degradação em Solos
Roxo	5	10 itens	*bacillus, branch compost, cutinase, enzymatic-hydrolysis, fibers, fusarium, fusarium-oxysporum, hydrolase, polyesters, purification.*	Hidrólise e processos de purificação
Verde	6	9 itens	*biofilm formation, films, growth, ldpe, low-density polyethylene, mediated biodegradation, microbial consortia, polypropylene, water.*	Formação de consórcio microbiano em ambientes aquáticos
Rosa	7	3 itens	*enzymes, laccase, lipase.*	Enzimas catalizadoras

Quadro 01: Descrição dos clusters da rede bibliométrica da coocorrência de palavras-chave.
Fonte: A autora (2026)

Analisando a rede bibliométrica, percebeu-se uma estrutura interdisciplinar onde *biodegradation* é o ponto de convergência. A conexão mais robusta é entre o *cluster* azul, no centro da rede, e os *clusters* vermelho e ciano, indicando as tendências da aplicação da biotecnologia na poluição ambiental, nesse caso especificamente a descoberta de novas enzimas (*petease*, no *cluster* ciano) e processos degradativos (*catalyzed hydrolysis*, no *cluster* ciano) de polímeros industriais, tais quais o polietileno e poliestireno (*polyethylene* e *polystyrene* no *cluster* 1). Outra conexão relevante é entre o *cluster* vermelho e o azul, pois juntos definem o objetivo geral dentre a seleção, o *cluster* vermelho conta com termos como *waste* e *polymers*, que delimitam o problema em questão, enquanto os *cluster* azul elenca *bioremediation*; ao interligar ambos a rede aponta um enfoque: poluição ambiental do uso e descarte inadequado de resíduos poliméricos que resultam em microplásticos, conforme discutido por Giacobbo, Souza e Gavlak (2025). Por fim, as conexões dos *clusters* periféricos descrevem as tendências de pesquisa específicas considerando o objetivo já delimitado, os *clusters* amarelo e verde se conectam ao *cluster* azul num indicativo da aplicação da biodegradação em ambientes reais, tendo *soil* e *temperature*, no *cluster* amarelo, e *water* e *biofilms*, no verde; já o conjunto dos *clusters* ciano, roxo e rosa indica um enfoque nos processos biológicos de quebra molecular em escala microscópica, com termos relacionados como *fusarium*, *cutinase* e *hydrolase*.

Vale ressaltar ainda que os termos *communities*, *microorganisms* e *microbial consortia* podem indicar uma tendência da associação de microrganismos como uma estratégia promissora para a biodegradação de PET, o que foi documentado em diversos artigos, como: Amobonye et al. (2021); Taghavi et al. (2021); Jiao et al. (2026); Khurana et al. (2025) e Benavides Fernández et al. (2022).

Visto isso, a tendência principal neste campo de pesquisa toma forma, estando centrada em quatro aspectos que envolvem o uso de microrganismos para tratamento de polímeros, são eles: a hidrólise enzimática; técnicas de caracterização e validação do processo biodegradativo; substratos e condições ambientes onde ocorre a degradação.

Considerações Finais

A análise bibliométrica evidenciou o crescimento e a consolidação das pesquisas sobre a biodegradação de PET mediada por fungos, com 70% das publicações concentradas entre 2021 e 2025. Os estudos de maior impacto operam como *hubs* de informação e reforçam a convergência teórica em torno da hidrólise enzimática para superar a natureza recalcitrante do polímero. Geograficamente, observou-se a liderança quantitativa da Índia em contraste com a predominância qualitativa da Alemanha em volume de citações, além de um padrão de citações em 2025 que sugere a existência de nichos científicos distintos. A concentração das publicações em periódicos de alto impacto (FI ≥ 8) e a abrangência dos termos-chave – que frequentemente conectam o PET a outros polímeros industriais – sublinham o crescente interesse e a interdisciplinaridade do campo. Nesse contexto, o uso de complexos enzimáticos fúngicos e consórcios microbianos se destaca como uma solução estratégica e sustentável para a mitigação do impacto ambiental e o avanço da Economia Circular.

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. Reconhece-se também o suporte científico e técnico do Núcleo de Biotecnologia (NUBIOTEC), além da infraestrutura disponibilizada pelo Laboratório de Bioprocessos e Bioprodutos (LBB).

Referências Bibliográficas

AMOBONYE, Ayodeji; BHAGWAT, Prashant; SINGH, Suren; PILLAI, Santhosh. Plastic biodegradation: frontline microbes and their enzymes. **Science of The Total Environment**, [S.L.], v. 759, p. 143536, mar. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536.

BENAVIDES FERNÁNDEZ, Cesar David; CASTILLO, Michelly Paola Guzmán; PÉREZ, Silvia Andrea Quijano; RODRÍGUEZ, Lida Vivian Carvajal. Microbial degradation of polyethylene terephthalate: a systematic review. **Sn Applied Sciences**, [S.L.], v. 4, n. 10, 8 set. 2022. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s42452-022-05143-4.

CARVALHO, Laura; LOPES, Isabel; MAGALHÃES, Solange; CARDOSO, Paulo; VENÂNCIO, Cátia. Comparative biodegradation of polyethylene terephthalate by two white-rot fungi: trametes versicolor and pleurotus sajor caju. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 533, p. 146892, nov. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146892.

COTTOM, Joshua W.; COOK, Ed; VELIS, Costas A. A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. **Nature**, [S.L.], v. 633, n. 8028, p. 101-108, 4 set. 2024. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1038/s41586-024-07758-6.

GAMBARINI, Victor; PAVLOV, Nikolai; YOUNG, Paul; DAWES, Stephanie; AUFFRET, Arnaud; KINGSBURY, Joanne M.; DONALDSON, Lloyd A.; SMITH, Dawn A.; WEAVER, Louise; PANTOS, Olga. Molecular mechanisms of plastic biodegradation by the fungus Clonostachys rosea. **Mbio**, [S.L.], v. 16, n. 8, 13 ago. 2025. American Society for Microbiology.

GARFIELD, Eugene. The History and Meaning of the Journal Impact Factor. **Jama**, [S.L.], v. 295, n. 1, p. 90, 4 jan. 2006. American Medical Association (AMA). http://dx.doi.org/10.1001/jama.295.1.90.

GIACOBBO, Emilly; SOUZA, Kely Viviane de; GAVLAK, Guilherme. Pequena dimensão, grande impacto: uma análise sobre a poluição por microplástico. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales**: Investigación, desarrollo y práctica, [S.L.], p. 155-169, 29 ago. 2025. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2025.18.2.88518.

HERNÁNDEZ-NAVA, Andrea Michelle; CUAHQUENTZI-SÁNCHEZ, Miguel; SANTACRUZ-JUÁREZ, Ericka; SÁNCHEZ, Carmen. Degradation of polyethylene terephthalate by microorganisms and their enzymes: a review of experimental and in silico research. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, [S.L.], v. 41, n. 12, p. 0-0, 28 nov. 2025. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11274-025-04706-y.

ÍNDIA. Ministry of Science and Technology. Department of Biotechnology. Achievements of Department of Biotechnology - Year Ender 2025. New Delhi: Press Information Bureau, 2025. Disponível em: https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2204756. Acesso em: 2 mar. 2026.

JIAO, Haixin; XIONG, Min; AL-TOHAMY, Rania; SCHAGERL, Michael; KORNAROS, Michael; ALI, Sameh S.. Rethinking plastics through microbial biodegradation and circular economy innovation – A review. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, [S.L.], v. 8, p. 195-224, 2026. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.enceco.2025.11.009.

KHURANA, Shilpi; ALI, Sajid; SRIVASTAVA, Atul Kumar; SINGH, Anuradha; AGARWAL, Himanshu; CHAUHAN, Ritu; JOSHI, Naveen Chandra; DUFOSSÉ, Laurent; CHAUHAN, Abhishek. Bioremediation of microplastic pollution: a systematic review on mechanism, analytical methods, innovations, and omics approaches. **Journal of Hazardous Materials Advances**, [S.L.], v. 19, p. 100777, ago. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100777.

MALAFATTI-PICCA, Lusiane; BUCIOLI, Elaine Cristina; CHAVES, Michel Ricardo de Barros; CASTRO, Aline Machado de; VALONI, Érika; OLIVEIRA, Valéria Maia de; MARSAIOLI, Anita Jocelyne; GOVONE, José Silvio; ANGELIS, Dejanira de Franceschi de; BRIENZO, Michel. Fungal Screening for Potential PET Depolymerization. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 1581, 22 mar. 2023. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/polym15061581.

OLIVEIRA, Juliana; BELCHIOR, Afonso; SILVA, Verônica D. da; ROTTER, Ana; PETROVSKI, Željko; ALMEIDA, Pedro L.; LOURENÇO, Nídia D.; GAUDêNCIO, Susana P.. Marine Environmental Plastic Pollution: mitigation by microorganism degradation and recycling valorization. **Frontiers in Marine Science**, [S.L.], v. 7, p. 0-0, 17 dez. 2020. Frontiers Media SA. http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2020.567126.

OKAL, Eyalira Jacob; WU, Yanfei; IQBAL, Shahid; LIU, Zhaorui; HU, Yuwei; HU, Na; ZHONG, Tingfang; LI, Jingxian; YU, Dongmei; GURUNG, Bishal. Elucidation of the biodegradation pathways of polyurethane and polyethylene terephthalate by a Fusarium strain enriched from soil-plant systems. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 437, p. 133184, dez. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133184.

PAGE, Matthew J; MCKENZIE, Joanne e; BOSSUYT, Patrick M; BOUTRON, Isabelle; HOFFMANN, Tammy C; MULROW, Cynthia D; SHAMSEER, Larissa; TETZLAFF, Jennifer M; A AKL, Elie; BRENNAN, Sue e. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, [S.L.], p. 1-9, 29 mar. 2021. BMJ. http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n71.

PINTO, Angelo C.; ANDRADE, Jailson B. de. Fator de impacto de revistas científicas: qual o significado deste parâmetro?. **Química Nova**, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 448-453, jun. 1999. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40421999000300026.

PLASTIC EUROPE. Plastics the Fast Facts 2025: global and european plastics production and economic indicators. [S.L]: **Plastic Europe**, 2025. Disponível em: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2025/09/PE_TheFacts_25_digital-1pager-scrollable.pdf. Acesso em: 02 mar. 2026.

RAO, Pavada Madhusudan; RADHA, P.. Pioneering approaches to plastic biodegradation and upcycling for sustainability. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 198, n. 1, 8 dez. 2025. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s10661-025-14873-y.

SAYED, Mohsen A.; GAD, Ahmed K.; KANDIL, Esraa M.; HAMED, Eyad H.; MEGAHED, Gehad S.; ELWARDANY, Mirna A.; MIKHAEIL, Mirna M.; ABDEL-MONEIM, Yara Y. Ecofriendly and cost effective Plastic degradation by microorganisms. **The Microbe**, [S.L.], v. 7, p. 100348, jun. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.microb.2025.100348.

TAGHAVI, Navid; SINGHAL, Naresh; ZHUANG, Wei-Qin; BAROUTIAN, Saeid. Degradation of plastic waste using stimulated and naturally occurring microbial strains. **Chemosphere**, [S.L.], v. 263, p. 127975, jan. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127975.

TEMPORITI, Marta Elisabetta Eleonora; NICOLA, Lidia; NIELSEN, Erik; TOSI, Solveig. Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. **Microorganisms**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 1180, 8 jun. 2022. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms10061180.

THATOI, H. N.; CHATTARAJ, S.; MISHRA, R. R.; MOHAPATRA, P. K. das; MOHAPATRA, S. Contributions of biotechnology industries of India to global bioeconomy: an overview. **3 Biotech**, [S.L.], v. 15, n. 2, 19 jan. 2025. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s13205-025-04215-7.

WEI, Ren; ZIMMERMANN, Wolfgang. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?. **Microbial Biotechnology**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 1308-1322, 28 mar. 2017. Wiley. http://dx.doi.org/10.1111/1751-7915.12710.

FITOTECNOLOGIAS APLICADAS AO SANEAMENTO: TELHADOS VERDES COMO ESTRATÉGIA PARA O CONTROLE DE GASES ODORANTES E DE EFEITO ESTUFA EMITIDOS POR SISTEMAS DE ESGOTO SANITÁRIO

Laís Faria, Herlane Costa Calheiros
Universidade Federal de Itajubá, e-mail:d2023005370@unifei.edu.br;
Universidade Federal de Itajubá, e-mail: h2c@unifei.edu.br

Palavras-chave: Águas residuárias urbanas; biofiltração; GEE.

Resumo

O aumento das preocupações ambientais e sanitárias relacionadas à poluição atmosférica tem impulsionado estudos associados à identificação de fontes emissoras de gases odorantes e gases de efeito estufa. Nesse contexto, as estações de tratamento de esgoto (ETEs) destacam-se como potenciais contribuintes para emissões atmosféricas relevantes, devido à decomposição da matéria orgânica e aos processos biológicos de remoção de nutrientes. Este estudo teve como objetivo analisar, por meio de revisão bibliográfica, a formação e emissão de gases como sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), bem como identificar estratégias sustentáveis para mitigação desses compostos, com ênfase em fitotecnologias e telhados verdes. A pesquisa foi conduzida a partir de buscas nas bases Scopus e Portal de Periódicos CAPES, com artigos em português e inglês, acesso aberto, publicados entre 2010 e 2026, utilizando descritores combinados por operadores booleanos. Os resultados indicaram que H_2S e NH_3 são os principais responsáveis por odores intensos em ETEs, enquanto CH_4 e N_2O apresentam elevado potencial de aquecimento global. A literatura aponta que fitotecnologias, especialmente telhados verdes, podem atuar na mitigação desses impactos por meio da absorção foliar via estômatos, retenção em substratos e biodegradação promovida por microbiota associada, integrando mecanismos de fitorremediação e biofiltração. Entretanto, fatores como clima, seleção de espécies, tipo de substrato, custos de manutenção e limitações técnicas influenciam diretamente a eficiência desses sistemas. Conclui-se que os telhados verdes representam uma alternativa sustentável inovadora e promissora como solução baseada na natureza para redução de odores e emissões atmosféricas em ETEs, porém ainda demandam maior aprofundamento científico e validação em estudos de campo para ampliar sua aplicabilidade em larga escala.

Introdução

O crescimento das preocupações ambientais, especialmente em relação às emissões atmosféricas, tem intensificado pesquisas voltadas ao entendimento das fontes poluidoras e seus impactos. Essas emissões podem ser provenientes de processos naturais, como erupções vulcânicas, tempestades de areia e incêndios florestais, ou associadas às atividades humanas, que se destacam como as principais responsáveis pelo agravamento da poluição atmosférica em áreas urbanas e industriais. A exposição a poluentes atmosféricos está relacionada ao aumento da demanda por serviços de saúde, internações e mortalidade decorrentes de doenças cardiorrespiratórias, além de efeitos adversos sobre a gestação e o desenvolvimento humano. Dados do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DataSUS), no período de 2008 a 2019, apontam que doenças respiratórias e circulatórias figuram entre as principais causas de hospitalização no Brasil (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021).

Entre as atividades antrópicas relevantes na emissão de poluentes atmosféricos, destaca-se o tratamento de esgoto sanitário, que contribui tanto para a liberação de gases de efeito estufa (GEE) quanto para a emissão de compostos odorantes. Em estações de tratamento de esgoto (ETEs), o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e a amônia (NH_3) estão entre os principais responsáveis pela geração de odores intensos, sendo resultantes de reações bioquímicas associadas à decomposição da matéria orgânica e às transformações do nitrogênio (CONSTANTIN et al., 2025). Além disso, o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) são gases de efeito estufa frequentemente emitidos durante o tratamento, apresentando potencial de aquecimento global significativamente superior ao dióxido de carbono (CO_2), conforme destacado por Moore et al. (2025) e pelo IPCC (2021).

Nesse contexto, torna-se fundamental investigar alternativas sustentáveis para mitigação dessas emissões e redução dos impactos ambientais e sanitários. Entre essas alternativas, destacam-se as fitotecnologias, pois utilizam plantas e microrganismos associados ao substrato para remover, reter ou transformar substâncias poluentes, podendo representar uma estratégia ecológica para o controle de odores e emissões gasosas em ETEs.

Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, com ênfase na identificação de evidências científicas sobre a formação, emissão e impactos de gases odorantes e gases de efeito estufa em sistemas de tratamento de esgoto sanitário, bem como em tecnologias relacionadas a telhados verdes, fitotecnologias e interação planta–ar. Os artigos foram analisados considerando título, resumo e palavras-chave, de modo a selecionar aqueles que se adequavam de forma consistente com a temática da pesquisa. As buscas foram realizadas nas bases de dados Scopus e Portal de Periódicos CAPES, utilizando descritores específicos combinados com operadores booleanos (AND). Foram aplicados filtros para artigos em português e inglês, de acesso aberto, publicados no período de 2010 a 2026, garantindo maior precisão e relevância para os resultados obtidos.

Tema / Poluente	Base de dados / Fonte	Palavras-chave utilizadas	Período considerado
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	Portal de Periódicos CAPES/ Scopus	*hydrogen sulfide*, *sewer systems/ wastewater, H_2S emissions generation*	2010–2026
Metano (CH_4)	Scopus e Portal de Periódicos CAPES	*methane emissions*, *wastewater*	2010–2026
Amônia (NH_3)	Scopus e Portal de Periódicos CAPES	*anammox based technologies*	2010–2026
Óxido nitroso (N_2O)	Livro: Von Sperling (2011)	Não se aplica	Não se aplica
Telhados verdes	Portal de Periódicos CAPES	*photovoltaic green roofs*	2010–2026
Fitotecnologias	Scopus e Portal de Periódicos CAPES	*phytotechnologies*, *wastewater treatment plant*, *fitotecnologias*	2010–2026
Interação planta–ar	Livro: Raven, Evert e Eichhorn (2014)	Não se aplica	Não se aplica
Substratos funcionais	Portal de Periódicos CAPES	*Functional substrates, green roofs*	2010–2026

Tabela 01: Bases consultadas e palavras-chave utilizadas na pesquisa bibliográfica
Fonte: Elaboração própria

Resultados e Discussão

A análise bibliográfica possibilitou a identificação do potencial das estações de tratamento de esgoto como fontes de gases odoríferos e de efeito estufa. Tais gases originados através de diferentes processos durante a fase de tratamento, possui formação vinculada às condições anaeróbias, transformação do nitrogênio por processos biológicos e decomposição de matéria orgânica.

O sulfeto de hidrogênio (H_2S), sendo um gás tóxico e corrosivo, possui odor característico de "ovo podre", sendo formado em ambientes anaeróbios por meio das bactérias redutoras de sulfato, as quais conseguem converter sulfatos em sulfetos (QI et al., 2025; ZHANG et al., 2023). Já a amônia (NH_3) é formada devido à decomposição de compostos nitrogenados e aos processos de amonificação, os quais são influenciados pelo pH e pela temperatura, contribuindo para produção de odor no local (BAI et al., 2025; JORDÃO; PESSÔA, 2017; TCHOBANOGLOUS et al., 2014). O metano (CH_4) é originado pela digestão anaeróbia da matéria orgânica, em reatores anaeróbios e ambientes com baixa concentração de oxigênio, caracterizado como um relevante poder estufa (TCHOBANOGLOUS et al., 2014; SONG et al., 2023). O óxido nitroso (N_2O), importante gás de efeito estufa, também é formado em meio aos processos biológicos de remoção de nitrogênio em ETEs, em condições de variação de oxigênio dissolvido e acúmulo de nitrito, sendo que o nível de emissão depende de certos fatores, bem como da disponibilidade de carbono orgânico, pH e a aeração (HASS et al., 2022; KEMMOU et al., 2023; XIE et al., 2023).

Nesse sentido, destaca-se que as ETEs podem atuar tanto na formação de compostos odorantes como de gases de efeito estufa, sendo necessário o controle integrado dessas emissões. O H_2S e a NH_3 são responsáveis pelos maiores impactos tóxicos e olfativos, já o CH_4 e o N_2O apresentam maior relevância em termos de contribuição para o aquecimento global, mesmo porque o metano é inodoro e a percepção de odor do óxido nitroso é fraca. Dessa forma, a compreensão dos mecanismos de formação desses gases e suas propriedades, sejam elas físicas ou químicas, é essencial para avaliação dos impactos ambientais devido ao tratamento de esgoto, bem como investigação de estratégias que atenuem esses efeitos.

A seguir é apresentada uma tabela contendo as principais características dos gases H_2S, NH_3, CH_4 e N_2O, destacando aspectos relevantes como odor, limiar de percepção, risco ambiental, inflamabilidade, toxicidade.

Gás	Odor (caráter olfativo)	Limiar de percepção (ppm)	Risco ambiental principal	Inflamabilidade	Toxicidade	Fonte
H_2S (Sulfeto de hidrogênio)	Ovo podre	< 0,00021 - detecção / 0,00047 - reconhecimento	Forte poluente odorante e risco ocupacional	Altamente inflamável	Muito tóxico	Nuvolari (2012); PubChem (NIH, 2025)
NH_3 (Amônia)	Amoniacal, pungente	17 - detecção / 37 reconhecimento	Irritação respiratória e desconforto ambiental	Inflamável em certas condições	Tóxico e irritante	Nuvolari (2012); PubChem (NIH, 2025)
CH_4 (Metano)	Geralmente inodoro	Não aplicável	Gás de efeito estufa e risco de explosão	Altamente inflamável	Asfixiante em altas concentraçõ es	PubChem (NIH, 2025)
N_2O (Óxido nitroso)	Levemente adocicado	Não aplicável	Gás de efeito estufa e efeitos narcóticos	Não inflamável - comburente	Pode causar efeitos neurológicos	PubChem (NIH, 2025)

Tabela 02: Propriedades importantes e relevância ambiental dos gases em ETEs
Fonte: Adaptado de Nuvolari (2012), Tchobanoglous et al. (1991) e PubChem (NIH, 2025).

A partir da identificação dos efeitos ambientais causados por gases odorantes, este estudo foi direcionado a encontrar na literatura, alternativas sustentáveis capazes de mitigar tais emissões. Nesse cenário, destacam-se as fitotecnologias, as quais utilizando a interação das plantas, substratos e da microbiota, conseguem favorecer os processos de retenção, transformação e degradação de compostos atmosféricos. Entre as diversas fitotecnologias, os telhados verdes se destacam bastante. Isso porque eles protegem as funções do substrato e da vegetação, proporcionando benefícios tanto ambientais quanto estéticos.

Calheiros (2024) explica que os telhados verdes consistem em sistemas vegetados instalados sobre coberturas convencionais, atuando como elementos de infraestrutura verde capazes de melhorar o desempenho ambiental das edificações ao promover benefícios como regulação térmica, retenção de água e integração ecológica ao ambiente urbano.

Nesse mesmo sentido, Bernardino et al. (2018) destacam que a fitorremediação constitui a base das fitotecnologias, sendo caracterizada pelo uso de plantas e microrganismos em união com suas raízes, visando imobilizar, remover e degradar contaminantes do solo, da água ou do ar. Assim, a aplicação de telhados verdes em ETEs é vista como meio de integrar a fitorremediação e a biofiltração, aproveitando a capacidade das plantas na remoção de poluentes atmosféricos e contribuindo para a atenuação dos impactos gerados pelos gases presentes durante as fases de tratamento (YAN et al., 2024).

A fitorremediação em telhados verdes acontece pela interação das plantas com os gases presentes no ar, por meio dos estômatos, os quais se concentram nas estruturas foliares e são responsáveis pela difusão de gases entre a planta e o ambiente (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2014). Dentre os gases que se destacam em relação à sua absorção pelas plantas, identifica-se a amônia (NH_3) e o sulfeto de hidrogênio (H_2S), por serem gases presentes em ETEs e apresentarem solubilidade em água, o que facilita sua interação com superfícies foliares e tecidos vegetais.

Além disso, o mecanismo de absorção destes compostos ocorre devido à concentração estomática e ao metabolismo das plantas. Espécies com Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM - *Crassulacean Acid Metabolism*) ao fazerem trocas gasosas no período noturno, favorecem a captação de compostos em condições de menor evaporação e perda de água (FERRARI, 2021; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2014).

Nesse contexto, os substratos presentes em telhados verdes também são essenciais na mitigação dos efeitos provocados pelos gases emitidos em ETEs, uma vez que influenciam na retenção de umidade, disponibilidade de nutrientes e atividades biológicas do sistema. A eficiência do substrato está relacionada com a profundidade, composição e capacidade de manter a umidade e os nutrientes. Heim et al. (2023) destacaram que a variedade funcional auxilia na biomassa e reduz a temperatura do substrato. Além disso, apontaram também que os benefícios são dependentes do clima regional, da profundidade e composição do substrato e das espécies vegetais utilizadas. De forma complementar, Schrieke et al. (2023) ao avaliarem a eficiência da vegetação espontânea em telhados verdes, evidenciaram que a presença de vegetação e profundidade do substrato influencia o desempenho dos telhados verdes, podendo aumentar a biomassa, a evapotranspiração e ainda a riqueza de funções do meio. Ainda que o estudo seja voltado à mitigação de águas pluviais, os fatores indicados pelas análises realizadas são importantes

para aplicações em ETEs, uma vez que estes podem estimular a atividade de microrganismos no substrato e aumentar à biofiltração e à retenção de determinados compostos atmosféricos.

Apesar disso, estudos indicam algumas limitações. Rivière, Meeûs e Mahy (2023) apontam que os telhados verdes oferecem variados serviços ao ambiente urbano, bem como a manutenção da biodiversidade, o controle hídrico e climático, além de favorecer as condições de vida humana. No entanto, os autores indicam que os telhados verdes extensivos possuem limitações associadas ao tipo substrato, sendo que substratos rasos podem ser menos favoráveis. Além disso, as variações térmicas, a quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas e a quantidade de água, também afetam a resistência das espécies vegetais do meio. Assim, a vegetação desses sistemas é muito variável ao longo do tempo, sendo um processo de sucessão determinado pelas condições ambientais que influenciam a estrutura. Além disso, Rumble et al. (2018), indicaram que a comunidade do solo em telhados verdes se desenvolve também pela associação entre organismos introduzidos nos materiais de construção e espécies que colonizam posteriormente a instalação. A análise indicou também que a composição do substrato e os materiais usados na construção influenciam a sucessão ecológica. No contexto das ETEs, a manutenção de um solo ativo pode ser favorável, visto que pode contribuir para processos de biofiltração e retenção de compostos atmosféricos, aumentando a eficiência dos telhados verdes.

Dessa forma, os substratos podem ser definidos como elemento estrutural dos telhados verdes, sendo positivo na sustentação da biodiversidade e processos microbianos. No entanto, a literatura evidencia que sua eficiência depende do planejamento técnico adequado, visto que certas limitações de profundidade, composição e estabilidade ecológica reduzem o potencial desses sistemas para atenuação dos gases de efeito estufa, especialmente em ETEs.

Diante disso, a Tabela 03 agrupa as principais estratégias baseadas em fitotecnologias discutidas na literatura para mitigação de emissões atmosféricas em ETEs, evidenciando os componentes, os mecanismos de atuação e também os benefícios ambientais.

Estratégia	**Componentes envolvidos**	**Mecanismos de atuação**	**Benefícios ambientais**
Telhados verdes	Vegetação, substrato e microbiota	Absorção foliar, adsorção e biodegradação	Redução de odores e melhoria da qualidade do ar
Fitorremediação	Plantas e superfície foliar	Trocas gasosas via estômatos e assimilação de compostos	Atenuação de poluentes atmosféricos
Substratos funcionais	Materiais minerais e orgânicos	Adsorção de compostos e suporte microbiano	Retenção e transformação de poluentes
Biofiltração	Meio suporte e biofilme microbiano	Degradação biológica de compostos gasosos	Controle de odores e redução de emissões

Tabela 03: Estratégias baseadas em fitotecnologias para mitigação de emissões em ETEs
Fonte: Adaptado de Barbusinski et al. (2021), Bernardino et al. (2018) e Weyens et al. (2015).

É válido destacar também que a eficiência das fitotecnologias, depende de determinadas condições, bem como o clima, estrutura, escolha da vegetação, etc (CALHEIROS et al., 2020). Além desses fatores, barreiras socioeconômicas, como custos elevados de implantação e manutenção, são desafios que influenciam a expansão dessas estruturas. Assim, mesmo tendo elevado potencial ambiental, as fitotecnologias necessitam de intenso aprofundamento científico, garantindo sua efetividade no contexto urbano (JOSHI; TELLER, 2020; MANGILI; CALHEIROS, 2025; TOLEDO et al., 2024).

Ainda que os telhados verdes possuam amplo potencial ambiental, o desempenho de tais estruturas estão associados a seleção de espécies adequadas às condições do local, impacto das precipitações intensas no sistema e integração entre arquitetura, engenharia e ecologia para soluções contextualizadas (ALESSIO, GABRIEL & RODRIGUEIRO, 2025; CHAGAS; CALHEIROS, 2023).

Estudos também enfatizam que os benefícios observados são variáveis em relação ao tipo de substrato, a profundidade da camada de cultivo e a precipitação do local. A variabilidade das condições climáticas e dos materiais nos sistemas de telhados verdes resultam em diferenças no desempenho ambiental e na duração do telhado (ALESSIO, GABRIEL & RODRIGUEIRO, 2025).

Além dos desafios referentes às questões técnicas e climáticas, os telhados verdes atuam como hábitats urbanos, os quais são capazes de atrair e abrigar grande diversidade de artrópodes. Em um estudo realizado na Argentina, foram registrados 12.942 indivíduos e 505 espécies de artrópodes em 30 telhados verdes, evidenciando que essas estruturas podem favorecer a colonização de insetos herbívoros, predadores e parasitóides (FABIÁN et al., 2021).

Dessa forma, ainda que as fitotecnologias sejam efetivas para a mitigação dos impactos ambientais, a aplicação dessa prática ainda é limitada devido a diversos fatores, sejam eles climáticos, estruturais ou ainda atração de espécies que podem impactar o meio. Logo, torna-se evidente que a integralização dessas tecnologias depende da ampliação de pesquisas, capazes de avaliar e fornecer suporte para ampliar a eficiência e a aplicação das fitotecnologias, particularmente dos telhados verdes, em estações de tratamento de esgoto.

Considerações finais

Com base na revisão realizada, observa-se que as fitotecnologias, em especial, os telhados verdes, desempenham papel inovador e estratégico na mitigação de impactos ambientais pelo potencial de diminuir e controlar gases odorantes e de efeito estufa emitidos em estações de tratamento de esgoto. Essa abordagem representa uma ruptura em relação às soluções convencionais, ao incorporar infraestrutura verde como mecanismo complementar de tratamento e controle de emissões.

Embora a literatura reconheça esses benefícios, é necessário reconhecer que tais sistemas ainda se encontram em fase de consolidação científica e tecnológica.

A eficácia de telhados verdes decorre da interação entre plantas, substrato e microbiota, que favorece processos de biofiltração e a formação de biofilmes capazes de degradar poluentes atmosféricos. No entanto, a amplitude desses efeitos e sua replicabilidade em diferentes condições ambientais ainda carecem de maior comprovação científica.

A fitorremediação constitui o eixo central das fitotecnologias, promovendo a remoção, imobilização e degradação de contaminantes por meio da interação entre plantas, raízes e microbiota associada. Contudo, a aplicação em larga escala de telhados verdes em ETEs exige cautela: estudos apontam benefícios, mas também revelam limitações relacionadas à manutenção, custos de implementação e variabilidade dos efeitos conforme o tipo de substrato e espécie vegetal utilizada. A literatura, embora otimista, por vezes subestima esses desafios práticos, o que reforça a necessidade de análises críticas que ponderem não apenas os ganhos ambientais, mas também a viabilidade técnica e econômica.

Apesar de apresentarem-se como uma fórmula promissora, os telhados verdes são ainda pouco explorados em estudos de campo. A dependência de condições específicas para que as interações biológicas se consolidem levanta questionamentos sobre a generalização dos resultados. Assim, a adoção dos telhados verdes em sistemas de saneamento deve ser acompanhada de pesquisas mais abrangentes, capazes de avaliar a durabilidade dos efeitos e os custos de manutenção a longo prazo.

Os resultados deste estudo indicam que a associação entre substrato, microbiota e mecanismos de captação desempenhados por estruturas foliares, pode ser positiva na atenuação dos efeitos provocados pela emissão de gases odorantes em ETEs. Essas interações fortalecem o papel das plantas como agentes ativos na melhoria da qualidade ambiental.

Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de ampliar as pesquisas nesse campo, visando transformar os telhados verdes em soluções baseadas na natureza como alternativas efetivas, sustentáveis e eficazes para o tratamento de esgotos e o controle de emissões atmosféricas e não apenas inovadoras e promissoras. A consolidação dos telhados verdes depende de uma abordagem crítica, que considere tanto os benefícios ambientais quanto os obstáculos práticos de implementação. Somente a partir dessa perspectiva será possível avançar nos estudos sobre telhados verdes e fitotecnologias de modo a fornecer subsídios técnicos e científicos para sua aplicação em larga escala, contribuindo para a transição em direção a sistemas de saneamento mais resilientes e ambientalmente responsáveis.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC), e à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), pelo suporte institucional para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALESSIO, Amanda; GABRIEL, Camila Pires Cremasco; RODRIGUEIRO, Mariana Matulovic da Silva. Eficácia dos telhados verdes na mitigação dos efeitos da urbanização: uma revisão de literatura. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar*, v. 6, n. 5, e656445, 2025. DOI: 10.47820/recima21.v6i5.6445. Disponível em: https://doi.org/10.47820/recima21.v6i5.6445. Acesso em: 6 abr. 2026.

BARBUSIŃSKI, Krzysztof; PARZENTNA-GABOR, Anita; KASPERCZYK, Damian. Removal of Odors (Mainly H_2S and NH_3) Using Biological Treatment Methods. Clean Technologies, v. 3, n. 1, p. 138–155, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/cleantechnol3010009. Acesso em: 2 fev. 2026.

BERNARDINO, Cassiano Augusto Rolim; MAHLER, Claudio Fernando; SILVA, Eduardo Ferreira; NOVO, Luís António Balreira. Fitotecnologias: situação atual e perspectivas futuras. *Acta Brasiliensis*, v. 2, n. 2, p. 63–68, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.22571/2526-433877. Acesso em: 01 mar. 2026.

CALHEIROS, H. C. Green High-Rise Buildings. *Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA*, 18(11), e010041, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n11-239.

CALHEIROS, H.C.; SILVA, F. G. G. ; COSTA, L. S. ; MACEDO, M. L. . Water balance study on green roof in Brazil. *International Journal of Hydrology*, v. 4, p. 141-144, 2020. DOI: 10.15406/ijh.2020.04.00238.

CHAGAS, B. B.; CALHEIROS, H. C. Projeto e construção de telhados verdes fotovoltaicos na promoção da sustentabilidade hídrica e energética. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, 16(7), 2023, 8206–8220. DOI: https://doi.org/10.55905/revconv.16n.7-238.

CONSTANTIN, Cristian; MODROGAN, Cristina; DANCILA, Annette Madelene; GAVRILA, Georgeta Olguta; CALINESCU, Simona Mariana; CIRSTEA, Alexandru; DANCIULESCU, Valeriu; TANASE, Gheorghita; VASILE, Gabriela Geanina. Dispersion modeling of odor emissions from area sources in a municipal wastewater treatment plant. *Atmosphere*, v. 16, n. 5, 2025, 577. DOI: 10.3390/atmos16050577.

DE HAAS, David; ANDREWS, John. Emissões de óxido nitroso no tratamento de águas residuais: revisitando as diretrizes de aprimoramento do IPCC de 2019. *Environmental Challenges*, 2022. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100557.

FABIÁN, Diego; GONZÁLEZ, Ezequiel; DOMÍNGUEZ, María Virginia Sánchez; SALVO, Adriana; FENOGLIO, María Silvina. Em direção ao projeto de telhados verdes biodiversos na Argentina: avaliando elementos-chave para diferentes grupos funcionais de artrópodes. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 61, p. 127107, 2021. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127107.

FERRARI, Renata Callegari. Fotossíntese C4 e metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) em uma mesma folha: elucidando os componentes, a plasticidade e a sinalização por trás de uma rara adaptação fotossintética. 2021. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas – Botânica) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: https://bv.fapesp.br/pt/dissertacoes-teses/212821/fotossintese-c4-e-metabolismo-acido-das-crassulaceas-cam-e. Acesso em: 01 abr. 2026.

HEIM, Amy; BRADBURY, Catlin; XIE, Guirlanda; LUNDHOLM, Jeremy. Características das plantas em telhados verdes: influência da diversidade funcional nos serviços ecossistêmicos e na coexistência. *Nature-Based Solutions*, v. 4, 2023, 100091. DOI: 10.1016/j.nbsj.2023.100091.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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. DOI: 10.1017/9781009157896.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. Tratamento de esgotos domésticos. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

JOSHI, Mitali Yeshwant; TELLER, Jacques. Integração urbana de telhados verdes: desafios e perspectivas atuais. *Sustainability*, v. 13, n. 22, p. 12378, 2021. DOI: 10.3390/su132212378.

KEMMOU, Liana; AMANATIDOU, Elisavet. Fatores que afetam as emissões de óxido nitroso em estações de tratamento de águas residuais com lodo ativado — Uma revisão. *Resources*, v. 12, n. 10, p. 114, 2023. DOI: 10.3390/resources12100114.

MANGILI, Ana Lívia Canato; CALHEIROS, Herlane Costa. Photovoltaic Green Roofs: Sustainable Solutions for Urban Environments. *Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA*, São Paulo (SP), v. 19, n. 4, p. e012049, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n4-131. Disponível em: https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/12049. Acesso em: 8 abr. 2026.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (Brasil). *Poluição atmosférica na ótica do Sistema Único de Saúde: vigilância em saúde ambiental e qualidade do ar*. Brasília: Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública, 2021. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/portaleducacaoambiental/sites/201/2023/08/poluicao_atmosferica_sus_saude_ambiental.pdf. Acesso em: 25 mar. 2026.

MOORE, Daniel P.; LI, Nathan P.; SONG, Cuihong; ZHU, Jun-Jie; YI, Hongming; TAO, Lei; McSPIRITT, James; SEVOSTIANOV, Vladislav I.; WENDT, Lars P.; ROJAS-ROBLES, Nidia E.; HOPKINS, Francesca M.; REN, Zhiyong Jason; ZONDLO, Mark A. Comprehensive assessment of the contribution of wastewater treatment to urban greenhouse gas and ammonia emissions. *Nature Water*, v. 3, p. 1114–1124, 2025. DOI: 10.1038/s44221-025-00490-z.

QI, Zheng; JIA, Tipei; CONG, Wenjie; XI, Jinying. Mitigation of hydrogen sulfide production in sewer systems by inhibiting sulfate-reducing bacteria: a review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, v. 19, n. 39, 2025. DOI: 10.1007/s11783-025-1959-x.

RAVEN, Peter H.; EVERT, Ray F.; EICHHORN, Susan E. *Biologia vegetal*. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014.

RIVIÈRE, Lucie; MEEÛS, Sophie; MAHY, Grégory. Stress tolerant species are keys to plant communities success on extensive green roof: an experimental test of CSR strategy dynamic. *Urban Ecosystems*, v. 27, p. 591–600, 2024. DOI: 10.1007/s11252-023-01479-w.

RUMBLE, H.; SUTTON, R.; HEATH, J. Organisms in green roof soils: anthropogenic assemblages or natural communities? *Science of the Total Environment*, v. 610–611, p. 1123–1132, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.363. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139317310363. Acesso em: 29 mar. 2026.

SCHRIEKE, Dean; SZOTA, Christopher; WILLIAMS, Nicholas S. G.; FARRELL, Claire. Evaluating the effectiveness of spontaneous vegetation for stormwater mitigation on green roofs. *Science of the Total Environment*, v. 898, p. 165643, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165643.

SONG, Cuihong; ZHU, Jun-Jie; WILLIS, John L.; MOORE, Daniel P.; ZONDLO, Mark A.; REN, Zhiyong Jason. *Methane Emissions from Municipal Wastewater Collection and Treatment Systems.* Environmental Science & Technology, v. 57, n. 6, p. 2248-2261, 2023. DOI: 10.1021/acs.est.2c04388. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c04388. Acesso em: 5 nov. 2025.

TCHOBANOGLOUS, George; STENSEL, H. David; TSUCHIHASHI, Ryujiro; BURTON, Franklin L. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

TOLEDO, R. S. B.; CHAGAS, B. B.; TAVARES, F. da S.; CALHEIROS, H. C. Telhados verdes como recurso para melhoria da qualidade das primeiras águas pluviais e saúde coletiva. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 3096–3114, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n1-163. Disponível em: https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/2931. Acesso em: 8 abr. 2026.

VON SPERLING, M. *Lodos ativados*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2011. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 4).

WEYENS, Nele et al. O papel das interações planta-micróbio e sua exploração para a fitorremediação de poluentes atmosféricos. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 16, n. 10, p. 25576–25604, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijms161025576. Acesso em: 02 mar. 2026.

XIE, Yawen; JIANG, Cancan; KUAI, Benhai; XU, Shengjun; ZHUANG, Xuliang. Redução da emissão de N_2O no processo de remoção biológica de nitrogênio em águas residuais com baixa relação C/N: mecanismos e estratégias. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 11, 2023. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1247711.

YAN, Jing; YANG, Pu; WANG, Binjie; WU, Suqing; ZHAO, Min; ZHENG, Xiangyong; WANG, Zhiquan; ZHANG, Yejian; FAN, Chunzhen. Green Roof Systems for Rainwater and Sewage Treatment. *Water*, v. 16, n. 15, p. 2090, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/w16152090.

ZHANG, Liang; QIU, Yan-Ying; SHARMA, Keshab R.; SHI, Tao; SONG, Yarong; SUN, Jianliang; LIANG, Zhensheng; YUAN, Zhiguo; JIANG, Feng. Hydrogen sulfide control in sewer systems: A critical review of recent progress. *Water Research*, v. 240, 120046, 15 jul. 2023. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120046.

AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS APLICADAS AO REÚSO DE ÁGUA: UMA ANÁLISE ESTRATÉGICA

1 Déborah Bozz, 2 Matheus Yudi Yoshitani, 3 Ilton José Baraldi, 4 Evandro Andre Konopatzki, 5 Elias Lira dos Santos Junior

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: deborahbozz@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: matheusyoshitani@hotmail.com; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: baraldi@utfpr.edu.br; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eakonopatzki@utfpr.edu.br; 5 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eliasjunior@utfpr.edu.br.

Palavras-chave: Sustentabilidade hídrica; Reúso; Matriz *SWOT*.

Resumo

Diante das crescentes crises hídricas, a busca por soluções sustentáveis torna-se imperativa para a gestão de recursos. Este trabalho avaliou estrategicamente tecnologias de tratamento para o reúso direto de água não potável (RNPDA). A metodologia baseou-se em uma prospecção tecnológica nas bases de patentes Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) e *World Intellectual Property Organization (*WIPO), utilizando a Matriz *SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)* para diagnosticar a viabilidade técnica e os desafios do setor. Os resultados destacam a eficiência de sistemas híbridos, processos oxidativos e métodos de desinfecção na remoção de contaminantes. Contudo, a análise *SWOT* revelou que, embora existam forças técnicas robustas, o cenário enfrenta fraquezas como alto consumo energético e ameaças ligadas à precariedade do marco legal brasileiro. Conclui-se que a inovação oferece oportunidades para a segurança hídrica, mas sua implementação plena no Brasil depende de avanços regulatórios e monitoramento rigoroso, garantindo a segurança sanitária e a aceitação pública dessa prática essencial.

Introdução

O reúso de água, consiste na utilização de efluentes tratados ou não, oferecendo vantagens como o alívio da demanda hídrica e a recuperação ambiental (Pádua, 2011). A OMS classifica a prática em três tipos: reúso direto (planejado para fins específicos), indireto (após diluição em corpos hídricos) e reciclagem interna industrial (Who, 2002). No Brasil, a gestão hídrica evoluiu do Código das Águas (1934) até a Resolução nº 54/2005 (CNRH), que estabeleceu as primeiras diretrizes para o reúso legal. Entretanto, a legislação nacional ainda não contempla o reúso potável devido às limitações das tecnologias convencionais em atingir padrões de segurança humana (Hespanhol, 2015). O autor destaca que o reúso potável indireto é praticado extensivamente de forma não monitorada, gerando riscos sanitários. Diante desse cenário e às crises hídricas frequentes, a produção científica brasileira tem focado no desenvolvimento de sistemas de tratamento avançados para viabilizar o reúso de forma segura e regulamentada. Portanto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma prospecção tecnológica de métodos e técnicas aplicáveis ao reúso de água, por meio do mapeamento de patentes nas bases INPI e WIPO, utilizando a Matriz *SWOT* para analisar estrategicamente a viabilidade, os desafios e as potencialidades das tecnologias identificadas.

Material e Métodos

A prospecção tecnológica de métodos e técnicas aplicáveis ao reúso de água foi realizada nas bases de patentes do INPI e da WIPO, via portal *PatentScope*. Na base WIPO, devido ao elevado volume de documentos, a estratégia foi refinada utilizando o termo em inglês "*water reuse*" aplicado à primeira folha do documento, garantindo resultados mais assertivos por meio da ferramenta de exportação nativa da plataforma. Para a base nacional INPI, a pesquisa foi simplificada utilizando o termo "reúso de água" nos campos de título. Enquanto os dados da WIPO foram extraídos automaticamente, abrangendo a Classificação Internacional de Patentes (CIP), datas de depósito e concessão, país e autores, os dados do INPI foram coletados manualmente através da leitura integral das patentes, visando suprir a ausência de ferramentas de exportação automática e garantir a paridade das informações. Após a consolidação e o tratamento desses dados, os arquivos foram analisados para a classificação das modalidades de reúso, compondo a base de estudo tecnológica. Por fim, realizou-se uma análise estratégica individualizada para cada tecnologia por meio da Matriz *SWOT*, diagnosticando forças, fraquezas, oportunidades e ameaças de forma a avaliar a viabilidade técnica e os desafios de implementação de cada método prospectado.

Resultados e Discussão

Tecnologia de tratamento híbrido

As tecnologias híbridas de tratamento de efluentes destacam-se pela alta versatilidade e eficiência na produção de água de reuso e ultrapura, integrando processos avançados como membranas, eletrofloculação e inovações em nanomateriais para mitigar o *fouling*. Embora apresentem forças marcantes, como a robustez operacional, a compactação de sistemas e o alinhamento com a economia circular através da recuperação de nutrientes e biogás, o setor ainda enfrenta desafios críticos relacionados ao alto consumo energético, custos de implantação elevados e barreiras regulatórias. O sucesso dessa transição tecnológica depende da otimização contínua de novos materiais e da superação da percepção pública, visando equilibrar a superioridade técnica com a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental. A Figura 1 representa um infográfico e a Tabela 1 apresenta a Matriz *SWOT* sobre as tecnologias associadas à tratamentos híbridos.

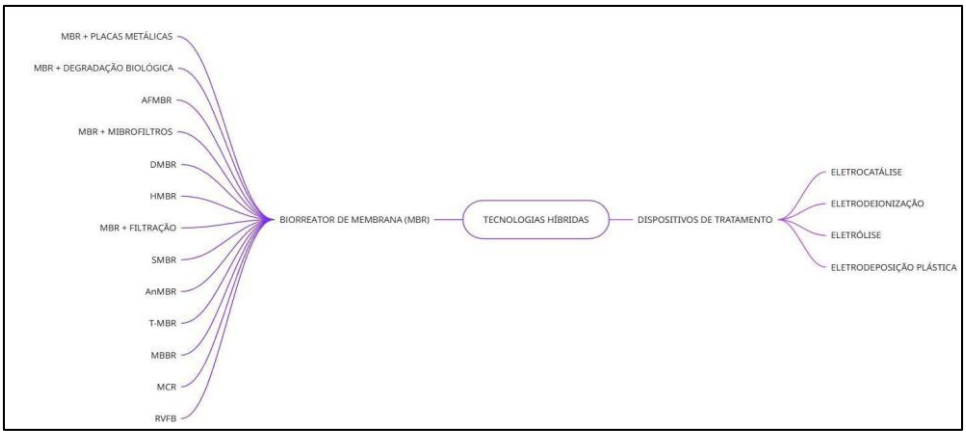


Figura 1 – Infográfico das tecnologias associadas à tratamentos híbridos.

Tabela 1 - Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos híbridos.

Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Atende aos requisitos de qualidade da água para diversas aplicações de reúso potável e não potável, incluindo condutividade, turbidez, conteúdo orgânico, amônia, nitrato, dureza e vírus	Alto consumo de energia	Desenvolvimento de novas membranas, otimizando o processo e aumentando a eficiência	Preocupações com saúde humana
MBRs alcançam uma redução de até 6 log para bactérias e 99,7% para vírus	Suscetibilidade a incrustação *(fouling)*	Economia circular com recuperação de nutrientes	Restrições regulatórias
MBRs e reatores de biofilme de leito móvel (MBBR) são opções viáveis para o tratamento de águas cinzas em edifícios devido seu espaço exigido para implantação ser pequeno	Custos iniciais de implantação elevados	Expansão de aplicação para sistemas descentralizados e reúso agrícola devido a qualidade da água tratada	Alguns cenários podem gerar impactos ambientais negativos, como aumento na emissão de dióxido de carbono em MBRs
MBRs e MBBRs são robustos a variações de choque de carga e qualidade de efluente bruto	Necessidade de pós-tratamento		Impacto no balanço energético local
Recuperação de recursos: extração de N, P e produção de biogás	Limitações na remoção de contaminantes específicos, como nitrogênio total e fósforo em MBRs cerâmicos		Viabilidade econômica
Flexibilidade operacional (integração ajustável de processos)			Percepção e aceitação pública
			Concorrência com tecnologias convencionais consolidadas

Tecnologia de desinfecção

As tecnologias de desinfecção para reúso de efluentes são dominadas pela ozonização e pela radiação ultravioleta, que se destacam por garantir a inativação de microrganismos e a remoção de genes de resistência a antibióticos sem alterar as propriedades físico-químicas da água. A prospecção aponta para o uso de métodos combinados, como UV-O3 e oxidação avançada com peróxido de hidrogênio, que aumentam a segurança sanitária enquanto mantêm a flexibilidade operacional. Estrategicamente, essas tecnologias apresentam forças significativas na preservação da qualidade da água e na geração de subprodutos úteis, mas enfrentam fraquezas como o risco de reativação microbiana e a formação de subprodutos indesejados em

processos específicos. O cenário futuro revela oportunidades na integração com energias renováveis e novos coagulantes vegetais, embora ainda sofra ameaças consideráveis devido à carência de marcos regulatórios globais, resistência na aceitação pública e a concorrência econômica com o baixo custo da água potável em determinadas regiões. A Figura 2 apresenta um infográfico e a Tabela 2 apresenta a Matriz *SWOT* sobre as tecnologias de desinfecção.

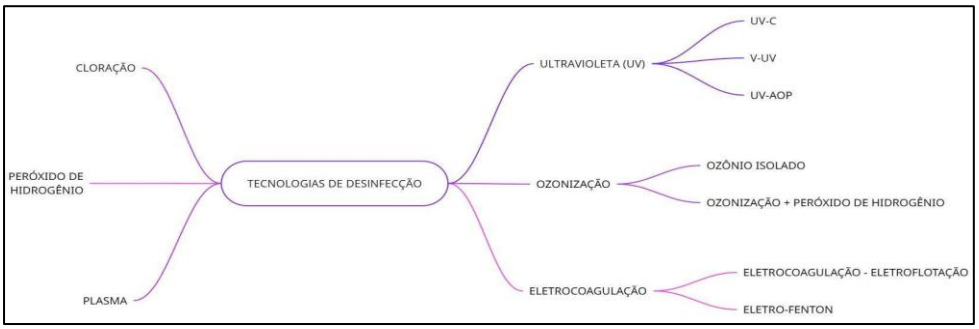


Figura 2 – Infográfico das tecnologias associadas à tratamentos de desinfecção.

Tabela 2 - Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos de desinfecção.

Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Redução do consumo de água potável e geração de esgoto	Limitações de tratamento em sistemas mais simples	Desenvolvimento de novos sistemas de menor custo e fácil manutenção	Falta de arcabouço regulatório em diversos países dificulta a prática de reúso e limita seus benefícios
Alta eficiência na remoção de contaminantes	Custos de testes de conformidade e validações de processo para patógenos e produtos químicos podem ser limitados, especialmente para comunidades menores ou isoladas	Modelos de mercado para reúso	Percepção e aceitação pública
Atende aos altos padrões de qualidade de água	Algumas tecnologias de desinfecção geram subprodutos, como trihalometanos na cloração	Flexibilidade de requisitos regulatórios	Contaminantes e o aumento da resistência a antibióticos
Baixo custo de implantação e manutenção	Variabilidade na qualidade da fonte de água a ser tratada	Integração com energias renováveis, com sistemas movidos a energia solar	Fatores econômicos, como o custo baixo de água potável em algumas regiões não tornam a prática de reúso interessante
Flexibilidade e adaptabilidade a diferentes locais e fontes de água	Risco de reativação microbiana	Desenvolvimento de novos coagulantes, com origem vegetal e de menor impacto ambiental	Variabilidade na qualidade da água residuária pode tornar o tratamento mais complexo
Geração de subprodutos úteis, como metano e nutrientes para agricultura	Custos operacionais e ambientais adicionais, de acordo com o projeto de cada local de implantação		Descarte inadequado de subprodutos, como o lodo, gera poluição do ar, água e solo
Preservação das propriedades físicas e químicas da água			
Remoção de genes resistentes a antibióticos			

Tecnologia verde

As tecnologias verdes focam na gestão descentralizada e sustentável da água, priorizando a captação de água pluvial e o tratamento de águas cinzas através de infraestruturas como telhados verdes, pavimentos permeáveis e sistemas de biorretenção. Estas soluções destacam-se pela capacidade de mitigar ilhas de calor urbanas e reduzir o escoamento superficial, oferecendo uma fonte econômica para fins não potáveis, embora frequentemente exijam desinfecção complementar. Estrategicamente, as forças residem na melhoria do microclima urbano e na economia de energia, enquanto as fraquezas apontam para a manutenção onerosa

e a remoção limitada de patógenos em sistemas isolados. O cenário futuro oferece oportunidades ligadas a incentivos fiscais e ao combate ao estresse hídrico nas cidades, mas enfrenta ameaças como a variabilidade climática, a complexidade de implantação em larga escala e a necessidade de marcos regulatórios mais específicos para garantir a segurança sanitária. A Figura 3 apresenta o infográfico das tecnologias e a Tabela 3 apresenta a Matriz *SWOT* sobre tratamentos com tecnologia verde.

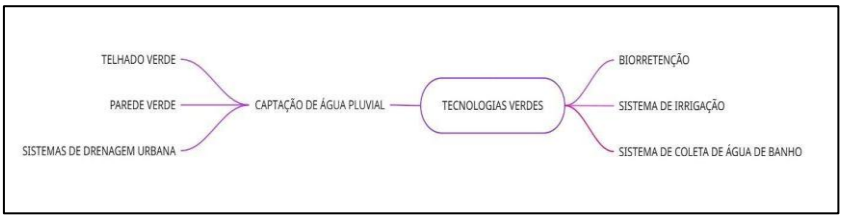


Figura 3 – Infográfico das tecnologias associadas à tratamentos com tecnologia verde.

Tabela 3 - Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos com tecnologia verde.

Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Sistemas de coleta de água pluvial reduzem o volume de escoamento e a carga de poluentes despejados nos esgotos	Remoção limitada de patógenos em sistemas isolados	Com o crescimento da urbanização e o estresse hídrico, as tecnologias verdes tendem a ganhar mais atenção, com sistemas descentralizados para mitigação e prevenção de enchentes	Altos custos iniciais
Telhados verdes melhoram a qualidade do ambiente	Alta demanda de água para irrigação em tempos de seca, como em telhados e paredes verdes	Integração com infraestruturas existentes	Complexidade de implantação em cenários específicos
Complemento na demanda hídrica, uma vez que estes sistemas são capazes de oferecerem águas para reúso não nobre	Alto custo de manutenção	Desenvolvimento de novas tecnologias mais viáveis	Custos de operação altos, pelo consumo energético ou de manutenção
Melhoria na qualidade ambiental, telhados verdes reduzem os efeitos das ilhas de calor urbanas	Lixiviação inicial de nutrientes como nitrato e fosfato em tecnologias como telhados verdes	Mudanças nas regulamentações para abrangência de novas fontes hídricas	Recrescimento de patógenos em períodos longos de armazenamento
Redução no consumo de energia elétrica		Incentivos fiscais	Necessidade de pós-tratamento ou desinfecção
Aplicabilidade em áreas urbanas densas, uma vez que paredes ou telhados verdes não exigem espaços extensos para instalação			Sensibilidade a variações climáticas
			Percepção e aceitação pública
			Falta de especificidade nas leis

Processos oxidativos avançados

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) consolidam-se como soluções de alta performance para a degradação de poluentes refratários e micropoluentes farmacêuticos, utilizando a geração de espécies reativas (como radicais hidroxila) para a mineralização de contaminantes. A prospecção destaca a eficácia dos métodos Fenton e foto-Fenton em efluentes industriais complexos (petróleo, têxtil e papel), além de inovações como a purificação por plasma e sistemas eletroquímicos (eletro-Fenton), que otimizam a remoção de cor e a degradação de compostos inorgânicos. Estrategicamente, as forças desses processos residem na sua estabilidade e na capacidade de atingir até 100% de reúso quando integrados a biotratamentos, enquanto as fraquezas envolvem a complexidade no manejo de águas hipersalinas e a possível geração de concentrados. O cenário futuro revela oportunidades vastas na aplicação industrial customizada, como em fluidos de fraturamento hidráulico, mas enfrenta ameaças ligadas ao alto custo inicial de implantação e à necessidade de adequação a rigorosos padrões globais de emissão. A Figura 4 representa um infográfico e a Tabela 4 apresenta a Matriz *SWOT* sobre as tecnologias associadas à tratamentos avançados.

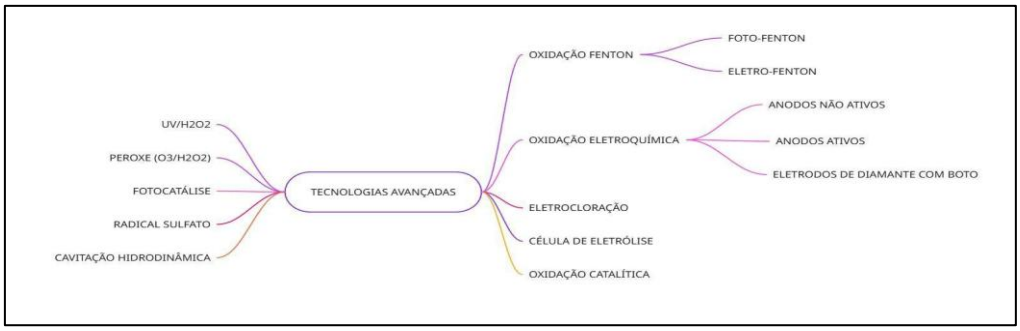


Figura 4 – Infográfico das tecnologias associadas à tratamentos avançados.

Tabela 4 - Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos avançados.

Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Alta eficiência na remoção de uma ampla gama de poluentes	Limitações de membranas quando combinadas em sistemas mal projetados	Aplicabilidade à diversas fontes de água residual, incluindo industriais siderúrgicas, tecelagem e refino de petróleo	Desafios de legislações e padrões de emissão
Degradação de micropoluentes de difícil degradação	Complexidade de tratamento em efluentes com alto teor de sal ou corantes de difícil degradação	Reúso em operações de petróleo e gás, para fluidos de fraturamento hidráulico	Percepção e aceitação pública
Taxa de reúso pode atingir 100% em alguns processos, como o sistema de biotratamento aeróbico + oxidação de Fenton	Geração de água concentrada e poluição ambiental	Inovações diretas à tipos específicos de águas residuais, como as de papel semitransparente colorido e águas residuais ricas em proteína	Custos inicial e complexidade para adoção mundial
Baixa geração de poluentes secundários			
Processos estáveis e consolidados			

Tratamento biológico

O tratamento biológico consolida-se como o pilar central na depuração de efluentes, utilizando a atividade metabólica de microrganismos e plantas para a remoção de matéria orgânica, sólidos e nutrientes. As prospecções destacam a eficácia de reatores anaeróbios em climas quentes, a versatilidade dos sistemas de lodos ativados, na remoção de nitrogênio e fósforo, e a sustentabilidade das *wetlands* construídas e sistemas de microalgas, que utilizam processos naturais de filtração e fotossíntese. Tecnologias de biofilme, ampliam a robustez operacional e a aplicabilidade em efluentes complexos (industriais e petróleo). Estrategicamente, as forças desses processos residem na alta compatibilidade com outros sistemas e na eficiência contra químicos hidrofóbicos, enquanto as fraquezas apontam para complexidades operacionais e o acúmulo de sais. O futuro oferece oportunidades em sistemas descentralizados e no uso de avaliações de ciclo de vida (ACV), mas enfrenta ameaças críticas como a seleção de bactérias resistentes a antibióticos e a degradação do solo por acúmulo de sólidos dissolvidos totais (SDT). A Figura 5 representa um infográfico e a Tabela 5 apresenta a Matriz *SWOT* sobre as tecnologias associadas à tratamentos biológicos.

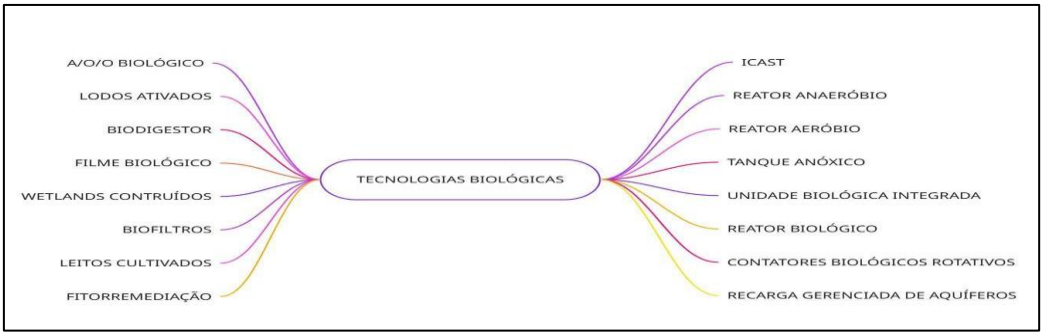


Figura 5 – Infográfico das tecnologias associadas à tratamentos biológicos.
Tabela 5 - Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos biológicos.

Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Compatibilidade com outros sistemas de tratamento	Inconsistências a certos grupos moleculares de contaminantes	Avaliações de ciclo de vida (ACV) são ferramentas importantes para analisar melhorias ambientais no sistema	O uso de desinfetantes como surfactantes catiônicos e não iônicos pode selecionar bactérias resistentes a antibióticos
Sistemas de lodo ativado secundário ou MBR são altamente eficazes na remoção de químicos hidrofóbicos	O reúso no solo pode reduzir o nitrato e potássio, enquanto sódio, ferro, manganês e zinco podem aumentar	Combinação com tecnologias já existentes potencializa o reúso	As características da água de reúso pode causar degradação do solo
Alta eficiência na remoção de poluentes, alcançando taxas extremamente satisfatórias	Acúmulo de sais e nutrientes	Sistemas de tratamento descentralizados são uma alternativa viável para reúso *in situ*	A ausência de legislação e padrões específicos de qualidade de água
Robustez operacional	Manutenção frequente	Desenvolvimento de novos materiais e métodos para tratamento	Percepção e aceitação pública
	Complexidades operacionais		O acúmulo de compostos não removidos, como sólidos dissolvidos totais (SDT) limita o potencial de reúso de água a longo prazo

Tecnologia de filtração

As tecnologias de filtração evoluem através da sofisticação de membranas e mídias inovadoras, como fibras para troca iônica e membranas metálicas de aço inoxidável, que permitem tratar grandes volumes com alta durabilidade e baixo custo. A prospecção destaca a eficiência de sistemas modulares, como filtros de cartucho e bolsa, capazes de recuperar até 99,98% de metais em processos galvânicos, além do uso de membranas cerâmicas autolimpantes para otimização energética. Estrategicamente, as forças dessas tecnologias residem na alta capacidade de remoção de patógenos e sólidos em espaços reduzidos, enquanto as fraquezas concentram-se no elevado custo e na vulnerabilidade ao *fouling*. O cenário futuro oferece oportunidades no desenvolvimento de novos materiais compósitos e no reúso industrial de fluxos concentrados, mas enfrenta ameaças ligadas ao alto consumo de energia em processos de alta pressão e aos desafios ambientais no descarte de rejeitos e concentrados químicos. A Figura 6 apresenta um infográfico e a Tabela 6 apresenta a Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos de filtração.

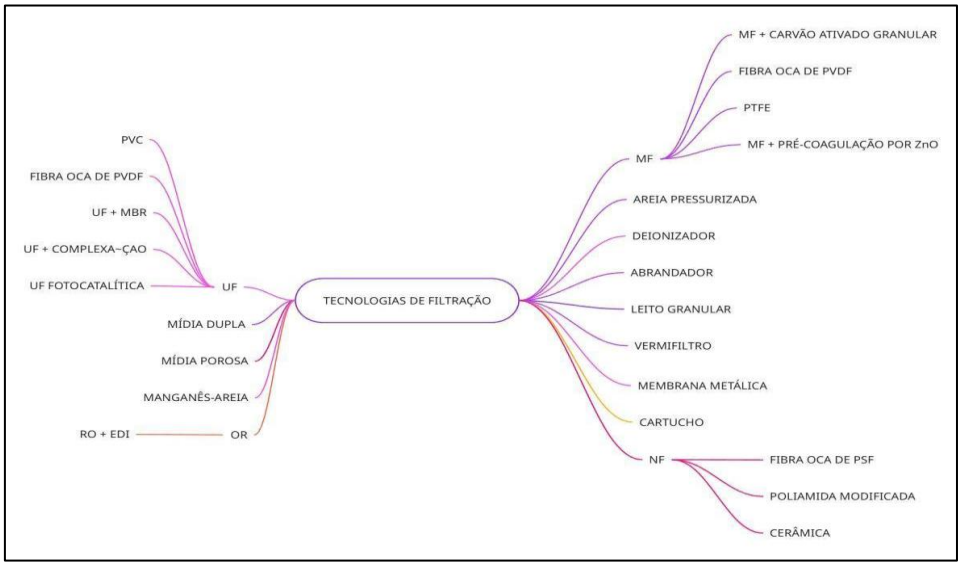


Figura 6 – Infográfico das tecnologias associadas à tratamentos de filtração.

Tabela 6 - Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos de filtração.

Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Alta eficiência na remoção de sólidos suspensos, turbidez, microrganismos (bactérias, vírus, protozoários) e matéria orgânica	Alto custo inicial (CAPEX) e operacional (OPEX), especialmente para membranas de alta pressão como a Osmose Reversa (RO)	Crescente demanda global por reúso de água impulsionada pela escassez hídrica e regulamentações ambientais mais rigorosas	Alto consumo de energia para processos de filtração de alta pressão (RO)
Capacidade de produzir água de alta qualidade para uma vasta gama de usos	Suscetibilidade significativa à incrustação (*fouling*) da membrana	Desenvolvimento contínuo de novas membranas e materiais compósitos que aprimoram o fluxo, a seletividade e a resistência ao *fouling*	Questões de sustentabilidade a longo prazo relacionadas ao descarte de concentrados e resíduos químicos de limpeza
Exige pouco espaço para implementação em sistemas integrados	Eficiência limitada na remoção de certos compostos dissolvidos de baixo peso molecular, como nutrientes (nitrogênio, fósforo) e alguns micro poluentes	Integração eficaz com outros processos de tratamento	Percepção e aceitação pública
Permite a recuperação de componentes valiosos da água como nutrientes e antioxidantes	Desafios na estabilidade e recuperação de eficiência total após a limpeza química em algumas membranas	Potencial para recuperação de energia em sistemas avançados	Aumento da resistência hidráulica
Potencial para operar em sistemas descentralizados e modulares, adaptáveis a diversas necessidades		Reúso de fluxos de efluentes concentrados para fins industriais, como água de caldeira, torres de resfriamento)	Altos custos operacionais
Sistemas com tecnologia consolidada			Manutenção com mão de obra especializada

Tecnologia de adsorção

As tecnologias de adsorção consolidam-se como soluções altamente versáteis e promissoras, especialmente quando integradas a sistemas híbridos para maximizar a remoção de contaminantes específicos. A prospecção destaca o uso de materiais avançados, como fibras de carbono ativado com eletrodos, resinas magnéticas modificadas com lantânio para fósforo e adsorventes nanométricos para metais pesados e vírus. O uso de biocarvão surge como uma tendência forte por ser uma alternativa de baixo custo e alta eficiência em comparação ao carvão ativado comercial. Estrategicamente, as forças da adsorção residem na sua adaptabilidade e na capacidade de remover poluentes complexos como glifosato e surfactantes, enquanto as fraquezas envolvem a rápida saturação dos materiais e a baixa resistência mecânica de certos adsorventes. O cenário futuro revela oportunidades significativas no desenvolvimento de materiais derivados de resíduos para comunidades rurais, mas enfrenta ameaças como a necessidade de manutenção frequente e a dificuldade de tratar efluentes com misturas complexas de metais tóxicos. A Figura 7 apresenta um infográfico e a Tabela 7 apresenta a Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos de adsorção.

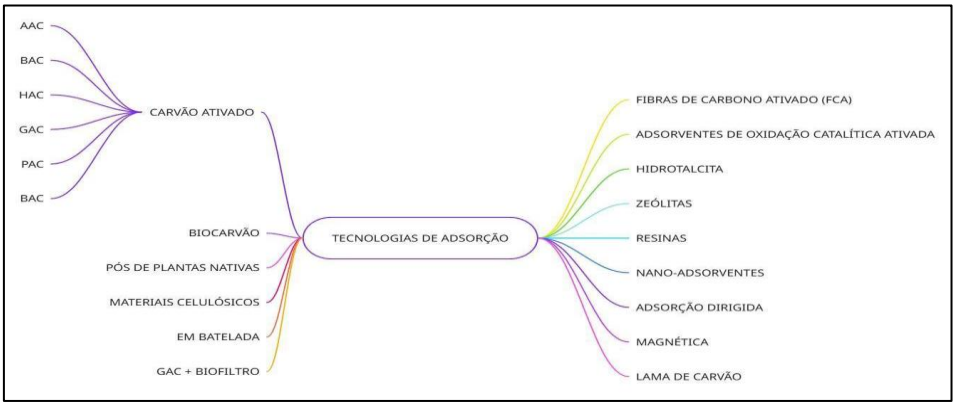


Figura 7 – Infográfico das tecnologias associadas à tratamentos de adsorção.

Tabela 7 - Matriz *SWOT* das tecnologias associadas à tratamentos de adsorção.

Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Alta eficiência na remoção de poluentes como DBO e DQO, metais pesados, coliformes fecais, bactérias, surfactantes, glifosato e turbidez	Filtros adsorventes isolados possuem baixa remoção de DBO e DQO	Sistemas de baixo custo são cruciais para a gestão hídrica de locais rurais e isolados	A presença de alguns surfactantes e metais tóxicos dificultam o tratamento
Adaptabilidade aos padrões	Resistencia na remoção de compostos orgânicos recalcitrantes	Pesquisas em tecnologias mais eficientes, incluindo biocarvão e materiais derivados de resíduos	Percepção e aceitação pública
Potencial de recuperação de recursos, como célula de eletrolise microbiana, que gera corrente elétrica para pós-tratamentos	Rápida saturação do material	Recuperação de energia e nutrientes para reúso	A rápida saturação de materiais adsorventes pode exigir retrolavagem frequente ou substituição
O biocarvão é uma alternativa de baixo custo em relação ao carvão ativado comercial	Baixa resistência mecânica	Novas leis e padrões que promovem o reúso	Secas intensas aumentam a pressão sobre os recursos hídricos
Possibilidade de implantação de designs de fluxo por gravidade, reduzindo custos e espaço	Altas concentrações de nanofibras podem aumentar a viscosidade do efluente		
	Alguns parâmetros como cloreto e sulfato podem não atingir os padrões de valores exigidos por lei		

Conclusão

O trabalho avaliou estrategicamente tecnologias para o reúso direto de água não potável (RNPDA), utilizando a Matriz *SWOT* como ferramenta central para diagnosticar de forma direta os pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças de cada abordagem de tratamento. Essa análise permitiu confrontar as vantagens técnicas, como a remoção eficiente de microrganismos, com as limitações reais, a exemplo da escassez de padronização nos indicadores de desempenho e da precariedade do marco legal brasileiro. O cenário atual aponta para uma mudança de paradigma no setor de saneamento, onde o tratamento de efluentes deixa de ser apenas uma etapa de descarte para se tornar um pilar central da economia circular e da segurança hídrica. A convergência de diversas rotas tecnológicas, que incluem desde sistemas biológicos robustos e tecnologias verdes descentralizadas até processos de alta performance como a filtração por membranas (OR/UF) e os Processos Oxidativos Avançados (POA), permite hoje atingir padrões de potabilidade e reúso industrial antes inalcançáveis. O futuro do setor reside na integração estratégica dessas tecnologias com fontes de energia renováveis e no fortalecimento de marcos regulatórios que aumentem a aceitação pública e garantam a viabilidade econômica do reúso frente à crescente escassez hídrica. Concluiu-se que, embora a prospecção tecnológica revele soluções inovadoras e de variadas naturezas, o sucesso da implementação do reúso depende da superação de barreiras regulatórias e da adoção de critérios de monitoramento mais homogêneos para mitigar as ameaças identificadas no setor.

Agradecimentos

Os Autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Medianeira pelo apoio e incentivo a pesquisa.

Referências Bibliográficas

BRASIL (1934). ***Decreto Nº 24.643, De 10 de Julho de 1934.*** Decreta o código de águas. Brasília: Casa Civil, 1934. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643compilado.htm. Acesso em: 12 mar. 2026.

BRASIL (2005). ***Resolução Nº 54, De 28 de Novembro de 2005.*** Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Brasília: Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2005. Disponível em: http://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2054.pdf. Acesso em: 12 mar. 2026.

WHO (2002). Global assessment on the state of the science of endocrine disruptors. Ed. Terri Damstra, Sue Barlow, Aake Bergman, Robert Kavlock, Glen Van Der Kraak. ***World Health Organization,*** p. 1-180. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/WHO-PSC-EDC-02.2. Acesso em: 12 mar. 2026.

PÁDUA, L. H. R. de. (2011). ***Reuso de águas residuárias: critérios, e análise de periódicos.*** (Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais). Disponível em: https://hdl.handle.net/1843/BUOS-9ASFM3. Acesso em: 12 mar. 2026.

CLARIFICAÇÃO DE EFLUENTES SIMULADOS DA MINERAÇÃO DE FERRO UTILIZANDO BIOPOLÍMEROS NATURAIS: AMIDO DE MILHO E QUITOSANA

[1]Danielli Martins Sanderi, [1]Felipe Schneider, [1]Maria Eduarda Hartmann das Chagas, [1]André Camargo de Azevedo
Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
[1]Universidade federal do Rio Grande do Sul, e-mail: danisanderi@gmail.com; felipe.schneider@ufrgs.br

Palavras-chave: Água de processo da mineração de ferro; Floculação-sedimentação; Biopolímeros.

Resumo

A crescente escassez de água e o aumento das exigências ambientais têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis e tecnicamente viáveis para o tratamento e adequação da qualidade das águas de processo para recirculação e reuso no beneficiamento mineral. Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi avaliar a eficiência de biofloculantes (amido de milho gelatinizado e quitosana) na clarificação de águas simuladas de beneficiamento de minério de ferro contendo 0,5 $g \cdot L^{-1}$ de rejeito ultrafino, com turbidez inicial entre 450 e 600 NTU. Ensaios de coagulação–floculação–sedimentação foram realizados em jar test para avaliar a influência da dosagem dos reagentes, combinando alternativas de: i. coagulação com cloreto férrico seguida de floculação com amido de milho; e ii. agregação com quitosana. Para o sistema utilizando amido associado ao cloreto férrico, a melhor condição foi obtida com 20 $mg \cdot L^{-1}$ de Fe^{3+} e 20 $mg \cdot L^{-1}$ de amido, resultando em turbidez residual inferior a 5 NTU. Para a quitosana, observou-se elevada eficiência como agente único, com redução da turbidez de aproximadamente 535 NTU para valores próximos de 40 NTU na concentração de 300 $mg \cdot L^{-1}$, na faixa de pH 8,0 ± 0,5. As análises de flocos por microscopia ótica evidenciaram a formação de agregados de grande dimensão, especialmente no sistema de coagulante férrico em conjunto com o amido de milho, associados predominantemente ao mecanismo de floculação por pontes. No caso da quitosana, o mecanismo predominante de neutralização de cargas promoveu agregados menores, com sedimentação mais lenta e turbidez residual maior. Os resultados indicam que ambos os biopolímeros apresentam potencial para aplicação na clarificação de águas de processo da mineração de ferro, sendo o sistema com amido dependente da associação com coagulante férrico, enquanto a quitosana pode atuar como agente único de agregação.

1. Introdução

A mineração constitui uma atividade essencial para o desenvolvimento social, econômico e tecnológico global, sendo a água um insumo transversal e indispensável em diversas etapas do processo produtivo, desde a lavra até o beneficiamento mineral. No caso específico da mineração de minério de ferro, o consumo hídrico é particularmente relevante devido às operações de cominuição, classificação e concentração, ocasionando uma elevada geração de efluentes (águas de processo). Grandes operações demandam volumes significativos de água por tonelada de minério processado, reforçando a necessidade de estratégias eficientes de gestão hídrica (ANA; IBRAM, 2013; ANDRIES et al., 2025). As águas de processo provenientes dessas operações apresentam composição complexa, contendo sólidos suspensos finos e ultrafinos, espécies iônicas dissolvidas (como Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^{-}, entre outros), além de reagentes residuais de flotação, como coletores, depressores e floculantes sintéticos (Jiang; Xu, 2017). Essa composição confere elevada turbidez, carga orgânica e variabilidade química, tornando o tratamento dessas correntes um desafio técnico relevante.

Diante do cenário global de escassez hídrica e das crescentes exigências ambientais, a recirculação e o reuso de água têm se consolidado como práticas indispensáveis para a sustentabilidade da mineração (Ana; Ibram, 2013; Azevedo, 2018). No entanto, a reutilização da água de processo impõe limitações operacionais importantes, especialmente em circuitos de flotação para concentração mineral. A presença de íons dissolvidos e reagentes residuais pode interferir significativamente nos mecanismos de adsorção dos coletores e na hidrofobicidade das superfícies minerais, afetando diretamente a eficiência da separação (Pinheiro; Baltar; Leite, 2010). Estudos indicam que a presença de lamas (sólidos suspensos) e espécies como Ca^{2+}, polímeros residuais e compostos orgânicos podem reduzir a recuperação metalúrgica ou a qualidade do concentrado, evidenciando a necessidade de controle rigoroso da qualidade da água recirculada (Juang; Xu, 2017). Assim, a adequação físico-química dessas águas torna-se um fator crítico para a estabilidade e desempenho dos processos de beneficiamento.

Nesse contexto, processos físico-químicos baseados em coagulação, floculação e separação sólido-líquido (por sedimentação ou flotação por ar dissolvido – FAD) têm se destacado como alternativas técnicas para o tratamento de águas de processo na mineração (Rubio et al, 2002; Azevedo et al., 2018; Oliveira et al, 2019). A coagulação promove a desestabilização de partículas coloidais por neutralização de cargas, enquanto a floculação favorece a formação de agregados maiores por mecanismos como ponteamento polimérico, possibilitando sua remoção eficiente por sedimentação ou flotação. Esses processos apresentam vantagens importantes, como elevada capacidade de processamento, relativa simplicidade operacional, adaptabilidade a diferentes composições de efluentes e potencial integração com outras tecnologias de tratamento. Além disso, são amplamente empregados como etapas de pré-tratamento ou polimento em sistemas industriais, contribuindo para a melhoria da qualidade da água destinada ao reuso.

Paralelamente, observa-se um crescente interesse no desenvolvimento e aplicação de floculantes naturais como alternativas mais sustentáveis aos reagentes sintéticos convencionais, especialmente no contexto da transição para uma mineração de menor impacto ambiental. Polissacarídeos de origem natural, como amido, quitosana, celulose e alginato, têm se destacado por suas propriedades de biodegradabilidade, baixa toxicidade e origem renovável, alinhando-se aos princípios da economia circular e da química verde (Saleihizadeh; Yan; Farnood, 2018). Esses biopolímeros atuam predominantemente por mecanismos de neutralização de carga e floculação por pontes poliméricas, sendo capazes de promover a agregação de partículas finas e a remoção de turbidez e matéria orgânica. Além das vantagens ambientais, destacam-se a ampla disponibilidade de matéria-prima, muitas vezes proveniente de resíduos agroindustriais, e o potencial de modificação química para otimização de desempenho. No entanto, desafios ainda persistem, especialmente relacionados à variabilidade de desempenho, à necessidade de maiores dosagens em alguns sistemas e às limitações na aplicação em escala industrial, o que ainda restringe sua adoção em larga escala (Ang; Mohammad, 2020).

Diante desse cenário, o presente trabalho insere-se na busca por soluções tecnológicas que conciliem eficiência de tratamento com redução do impacto ambiental, avaliando a aplicação de biopolímeros naturais — especificamente amido de milho alcalinamente gelatinizado e quitosana — na clarificação de águas simuladas de processo da mineração de minério de ferro. Foram conduzidos ensaios de coagulação-floculação-separação em bancada (jar test), com o objetivo de investigar o desempenho desses reagentes na remoção de sólidos suspensos e na redução da turbidez, bem como compreender os mecanismos de agregação envolvidos. Espera-se que os resultados contribuam para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis para o tratamento e reuso de água em circuitos fechados de beneficiamento mineral, reduzindo a dependência de insumos sintéticos e minimizando os impactos associados à geração e disposição de lodos.

2. Metodologia

2.1. Materiais

O rejeito ultrafino de minério de ferro (RUF) foi fornecido por uma empresa brasileira do setor mineral e empregado na preparação de águas simuladas de beneficiamento de minério de ferro (ASBMF). O material apresenta teor de ferro de 52,5%, com presença de sílica (18,5%), mais óxidos e silicatos minoritários. A densidade dos sólidos é de 4,13 $g \cdot cm^{-3}$ e a superfície específica de 9415 $cm^2 \cdot g^{-1}$. A distribuição granulométrica indica que 96,9% das partículas apresentam tamanho inferior a 38 µm, caracterizando o material como ultrafino. Como agentes de tratamento, foram empregados cloreto férrico ($FeCl_3$) como coagulante, amido de milho previamente gelatinizado por método alcalino e quitosana PA (Êxodo, grau de desacetilação > 90%) como agente coagulante/floculante natural. Para ajuste de pH utilizou-se solução de NaOH 1% (m/v).

2.2. Métodos

2.2.1. Preparo da água de processo simulada

As ASBMF foram preparadas pela dispersão de 0,5 $g \cdot L^{-1}$ de RUF em água deionizada, sob agitação mecânica, de modo a garantir a homogeneização da suspensão.

2.2.2. Preparo dos reagentes

A solução de amido gelatinizado (1% em massa) foi preparada em meio alcalino, misturando 10 g de amido e 1 g de hidróxido de sódio (NaOH) em 100 mL de água deionizada, homogeneizada manualmente com bastão de vidro até a completa dissolução do amido e obtenção de uma solução homogênea, com aspecto viscoso e translúcido, característico do processo de gelatinização alcalina. Após essa etapa inicial, o volume da solução foi completado gradualmente com água deionizada, adicionados lentamente, de modo a evitar a formação de grumos, totalizando um volume final de 1000 mL. Em seguida, a solução foi submetida a aquecimento em placa aquecedora, sob agitação magnética contínua, sendo mantida à temperatura de 65 °C por 30 min, a fim de assegurar a completa gelatinização e estabilização da estrutura do polímero. O preparo do coagulante férrico foi realizado pela dissolução de 1,25 g de cloreto férrico hexahidratado ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) em 250 mL de água deionizada, sob agitação magnética até completa solubilização, correspondendo a uma solução estoque de 1000 $mg \cdot L^{-1}$ de Fe^{3+}.

A solução de quitosana 2% (m/v) foi preparada utilizando ácido acético 1%, para dissolução foi utilizado agitação magnética até a completa solubilização do material e a formação de solução homogênea.

2.2.3. Demanda de NaOH

Com o objetivo de determinar o volume necessário de base para atingir a faixa de pH de interesse nos ensaios de agregação com quitosana, foi realizado o experimento para avaliar a demanda de NaOH necessária para ajuste de pH entre 7,5-8, na presença e ausência de RUF. Para isso, foram preparadas suspensões contendo 0,5 $g \cdot L^{-1}$ de RUF, bem como soluções contendo apenas quitosana, em diferentes concentrações. Após a adição da quitosana, foram realizadas adições incrementais de solução de NaOH 1% (m/v), sob agitação, até que o pH atingisse a faixa de 7,5 a 8,5. O volume total de NaOH necessário para atingir essa faixa foi registrado para cada condição avaliada. Todos os ensaios foram realizados com volume total de 1,0 L.

2.2.4. Ensaios de agregação-sedimentação em bancada

Os ensaios de coagulação-floculação-sedimentação foram realizados em equipamento de *jar test*, com volume de

trabalho de 1,0 L, utilizando a água de processo simulada. A ASBMF foi submetida à agitação por 3 min para homogeneização da suspensão. Para o sistema contendo cloreto férrico e amido gelatinizado, o procedimento experimental consistiu na adição inicial do coagulante, seguida de agitação rápida a 260 rpm por 1 min. Após essa etapa, foi realizado o ajuste de pH para a faixa de 5,5 a 6,0 por meio da adição de solução de NaOH 1% (m/v). Em seguida, adicionou-se o amido previamente preparado, sendo aplicada nova etapa de agitação rápida a 260 rpm por 1 min. Após a adição do amido alcalino, o pH do sistema foi mantido na faixa de 6,5 a 7,0. Posteriormente, o sistema foi submetido à agitação lenta a 70 rpm por 3 min, seguida de sedimentação por 3 min. Ao final, o sobrenadante foi coletado na altura correspondente a aproximadamente 800 mL do volume total do jarro para determinação da turbidez residual. Foram realizados dois conjuntos de ensaios: (i) variação da concentração de Fe^{3+} (10; 20; 30; 40 $mg \cdot L^{-1}$), mantendo-se a concentração de amido constante em 20 $mg \cdot L^{-1}$; e (ii) variação da concentração de amido (10; 20; 30; 40 $mg \cdot L^{-1}$), mantendo-se a concentração de Fe^{3+} constante em 20 $mg \cdot L^{-1}$.

Para os ensaios com quitosana, a suspensão foi inicialmente submetida à agitação rápida a 260 rpm, seguida da adição da solução de quitosana e do volume necessário de NaOH 1% (m/v) para ajuste do pH até 8,5±0,5, mantendo-se o sistema sob agitação por 1 min. Em seguida, a velocidade de agitação foi reduzida para 70 rpm, sendo mantida por 3 min. Posteriormente, o sistema foi mantido em repouso por 3 min para sedimentação. Ao final, o sobrenadante foi coletado na altura correspondente a aproximadamente 800 mL do volume total do jarro para determinação da turbidez residual. Todas as medições foram realizadas em duplicata.

2.2.5. Microscopia ótica

Foram coletadas amostras do lodo obtido do ensaio de sedimentação em bancada (*jar-test*) e posteriormente drenadas para remoção do excesso de água. Pequenas quantidades do material foram depositadas em lâminas de vidro e analisadas por microscopia óptica utilizando objetiva de 10×, visando a avaliação qualitativa da morfologia dos agregados formados após o processo de floculação.

3. Resultados e discussões

3.1. Amido

Foram conduzidos dois conjuntos independentes de ensaios, nos quais as concentrações de Fe^{3+} e de amido alcalinamente gelatinizado foram avaliadas de forma isolada, mantendo-se o outro reagente constante. Conforme apresentado na Figura 1, a condição de maior eficiência na clarificação foi obtida para uma concentração de 20 $mg \cdot L^{-1}$ de Fe^{3+}, mantendo-se a concentração de amido fixa em 20 $mg \cdot L^{-1}$. Para concentrações superiores de Fe^{3+}, observou-se aumento da turbidez residual, comportamento típico associado à sobredosagem de coagulante, que pode resultar na inversão de carga superficial das partículas ou na formação de espécies hidrolisadas solúveis, promovendo a reestabilização parcial da suspensão coloidal.

Na avaliação do efeito da concentração de amido gelatinizado (Figura 2), verificou-se que a menor turbidez residual também foi obtida para 20 $mg \cdot L^{-1}$. Esse resultado indica uma condição ótima de dosagem polimérica, na qual há disponibilidade adequada de cadeias macromoleculares para promover a adsorção simultânea em múltiplas partículas, favorecendo o mecanismo de floculação por ponteamento. A gelatinização alcalina do amido desempenha papel fundamental nesse processo, pois promove a desestruturação dos grânulos, aumento da solubilização e extensão das cadeias poliméricas, ampliando a exposição de grupos hidroxila e, consequentemente, a capacidade de interação com as superfícies minerais por ligações de hidrogênio e interações de natureza química (Whistler; BeMiller; Paschall, 2009; Filippov et al., 2013; Pavlovic and Brandao, 2003; Weisseborn et al., 1995; Gomes, 2021; Oliveira et al., 2019).

De forma integrada, o desempenho observado pode ser interpretado a partir da atuação sinérgica entre os mecanismos de coagulação e floculação promovidos pelo Fe^{3+} e pelo amido, respectivamente. A adição de $FeCl_3$ em meio aquoso leva à rápida hidrólise e formação de precipitados de hidróxidos férricos ($Fe(OH)_3$), os quais apresentam elevada área superficial e carga positiva em pH próximo à neutralidade. Nessas condições, partículas finas predominantemente negativas — como silicatos e óxidos presentes no rejeito — tendem a sofrer heterocoagulação com essas espécies, favorecendo a neutralização de cargas e a desestabilização do sistema coloidal.

Além disso, esses precipitados volumosos atuam como agentes de “sweep flocculation”, promovendo o aprisionamento físico (enmeshment) das partículas dispersas. Subsequentemente, as cadeias de amido gelatinizado adsorvem-se sobre os agregados de hidróxido férrico e superfícies minerais, por meio de interações envolvendo grupos hidroxila e possíveis complexações com espécies de ferro, conforme discutido na literatura (Oliveira et al., 2019; Gomes, 2021; Oliveira e Rubio, 2011; Duan e Gregory, 2003). Esse processo resulta na formação de pontes poliméricas entre partículas e agregados, promovendo a consolidação de flocos maiores, mais densos e com maior velocidade de sedimentação. Assim, o mecanismo global envolve a combinação de heterocoagulação, varredura por precipitados férricos e floculação por ponteamento polimérico, em concordância com os mecanismos descritos por Oliveira et al. (2019) para sistemas contendo partículas finas e coloidais.

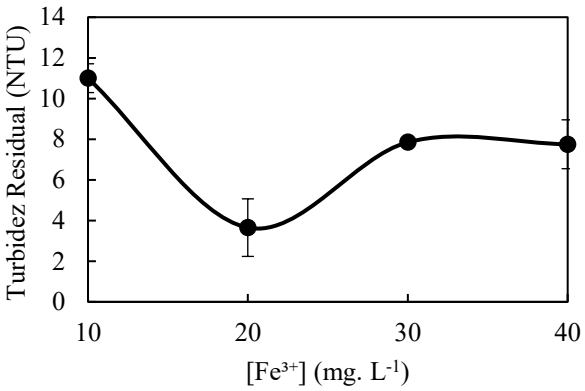


Figura 1 - Turbidez residual em função da concentração de Fe^{3+} após agregação-sedimentação em bancada. Turbidez inicial = 450-500 NTU; SST = 0,5 g·L⁻¹ de RUF; [amido] = 20 mg·L⁻¹; 2 min, mistura rápida; 3 min, mistura lenta; tempo de sedimentação = 3 min e pH 6,5 – 7.

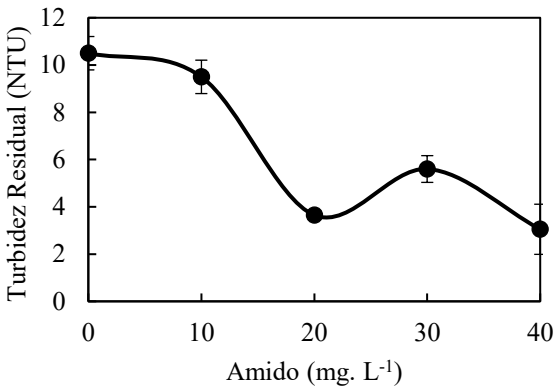


Figura 2 - Turbidez residual em função da concentração de amido após agregação-sedimentação em bancada. Turbidez inicial = 450-500 NTU; SST = 0,5 g·L⁻¹ de RUF; [Fe^{3+}] = 20 mg·L⁻¹; 2 min, mistura rápida; 3 min, mistura lenta; tempo de sedimentação = 3 min e pH 6,5 – 7.

O aspecto visual das suspensões após o ensaio de agregação-sedimentação (Figura 3) evidencia a formação de flocos de grande dimensão durante a etapa de agitação lenta, bem como a clarificação do sobrenadante após o processo. A rápida sedimentação observada (2–3 min) sugere a formação de flocos grandes e densos e boa resistência mecânica, comportamento típico de sistemas em que há atuação conjunta de mecanismos de neutralização de carga, varredura e formação de pontes poliméricas entre partículas (Oliveira e Rubio, 2011).

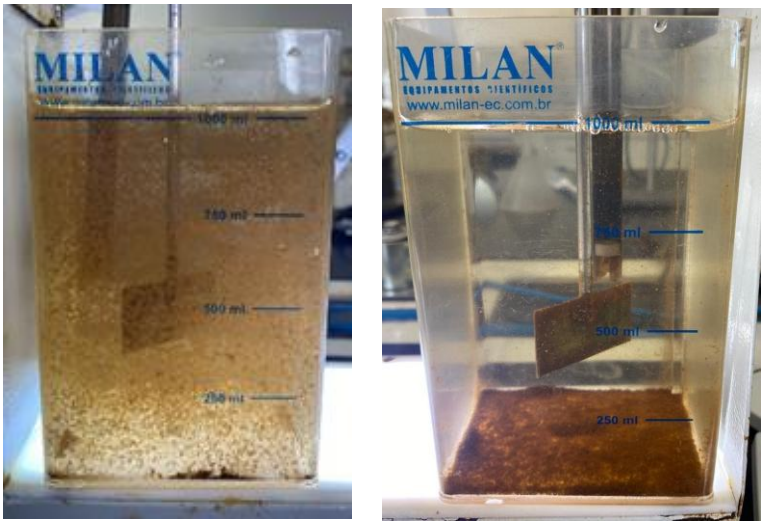


Figura 3 – Aspecto visual da ASBMF durante e após o ensaio de floculação-sedimentação. À esquerda, floculação durante etapa da agitação lenta. À direita, condição já tratada. Utilizado amido à gelatinização alcalina 20 mg.L⁻¹ + [Fe^{3+}] 20 mg.L⁻¹. Ensaios realizados com 1,0 L de suspensão contendo 0,5 g·L⁻¹ de RUF, pH 6,5 - 7,0, submetidos a 1 min de agitação rápida (260 rpm), 3 min de agitação lenta (70 rpm) e 3 min de sedimentação.

A análise das micrografias (Figura 4) evidenciou a formação de agregados de grande dimensão, com morfologia irregular e estrutura heterogênea, caracterizada pela presença de regiões densas interconectadas por zonas mais abertas. Observa-se a incorporação de partículas de RUF no interior dos flocos, compatível com a atuação de mecanismos de floculação por pontes poliméricas associados à presença de precipitados de hidróxido férrico (Xiao et al., 2009; Oliveira et al., 2019). Esses precipitados atuam como matriz para a agregação das partículas, favorecendo a formação de estruturas mais densas e sedimentáveis.

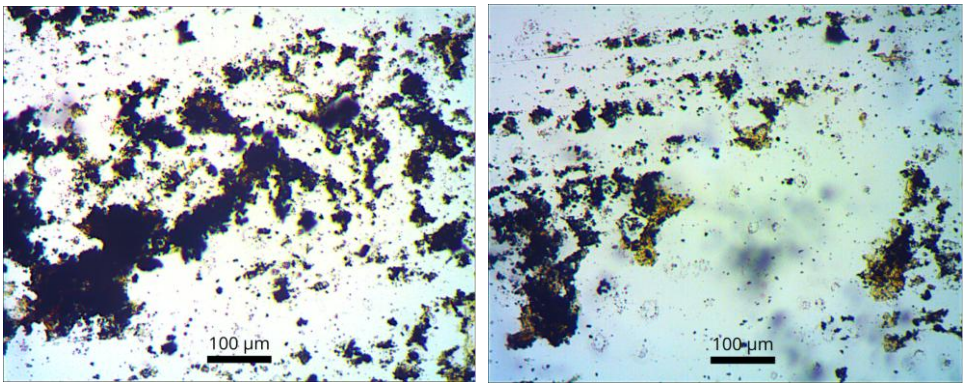


Figura 4 – Micrografias ópticas das suspensões após ensaio de jar test com adição de amido à gelatinização alcalina 20 mg.L-1 + [Fe^{3+}] 20 mg.L-1 em ASBMF contendo 0,5 g·L^{-1} de RUF, pH 8,0±0,5. Barra de escala: 100 µm.

3.2. Quitosana

Como mostrado na Figura 5, observa-se um aumento progressivo no volume de NaOH requerido com o incremento da concentração de quitosana, tanto na presença quanto na ausência de RUF. Esse comportamento está associado ao caráter ácido da solução inicial de quitosana e à necessidade de neutralização para atingir a faixa operacional de pH estabelecida (8±0,5). A presença de 0,5 g·L^{-1} de RUF elevou adicionalmente a demanda alcalina, indicando influência dos constituintes da suspensão na estabilidade ácido-base do sistema. Esse efeito pode ser atribuído, principalmente, à interação do NaOH com os grupos funcionais presentes na superfície das partículas minerais, como hidroxilas associadas a óxidos de ferro e silicatos (≡SOH), que atuam como sítios reativos capazes de consumir íons OH^- por processos de desprotonação superficial. De acordo com a literatura, esses grupos hidroxila podem sofrer reações de protonação e desprotonação em função do pH, sendo responsáveis pelo comportamento de carga variável e pela capacidade tampão de sistemas que contêm óxidos de ferro e minerais silicáticos (Cheng et al., 2017). Assim, a adição de base promove a conversão de ≡SOH em ≡SO^-, consumindo íons OH^- e aumentando a demanda alcalina do sistema. Além disso, a elevada área superficial específica do material (9415 $cm^2 \cdot g^{-1}$) favorece a disponibilidade desses sítios, ampliando a capacidade do sistema em consumir base. Esse comportamento confere à suspensão um efeito tampão, exigindo maior adição de NaOH para promover a elevação do pH até a faixa desejada (Cheng et al., 2017).

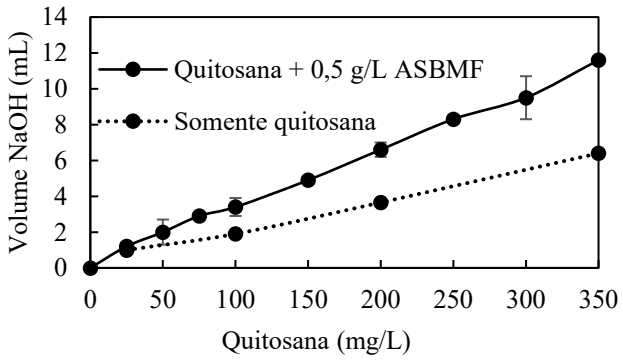


Figura 5. Volume de NaOH 1% (mL) necessário para ajustar o pH para 7,5–8,5 em suspensões contendo 0,5 g·L^{-1} de RUF e diferentes concentrações de quitosana e somente quitosana. Volume total do ensaio: 1 L.

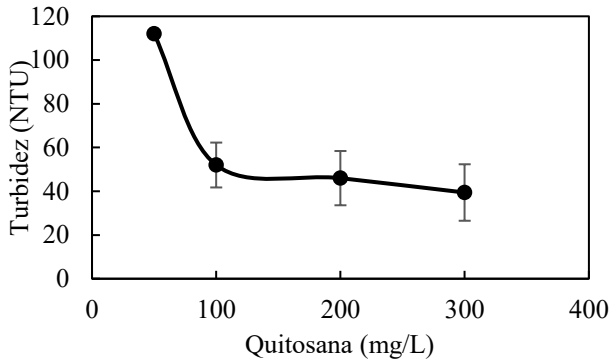


Figura 6. Turbidez final (NTU) das ASBMF tratadas com 0, 100, 200 e 300 mg·L^{-1} de quitosana. Volume = 1,0 L com 0,5 g·L^{-1} de RUF. pH 8,0 ± 0,5. 1 min de agitação rápida (260 rpm), 3 min de agitação lenta (70 rpm) e 3 min de sedimentação.

Uma vez estabelecida a faixa operacional de pH por meio do ajuste alcalino, avaliou-se o desempenho da quitosana na clarificação da suspensão em função da dosagem aplicada.

A Figura 6 apresenta a turbidez residual das ASBMF após os ensaios de jar test em função da concentração de quitosana. A suspensão sem tratamento apresentou turbidez inicial de 535±16 NTU, evidenciando a estabilidade coloidal das partículas ultrafinas do rejeito mineral e confirmando a necessidade de um agente desestabilizante para promover a clarificação. Com a adição de 50 mg·L^{-1} de quitosana, observou-se redução da turbidez para valores próximos de 110 NTU, indicando que mesmo baixas dosagens do biopolímero são capazes de promover a desestabilização do sistema. O aumento da concentração para 100 mg·L^{-1} intensificou o processo de clarificação, resultando em turbidez residual próxima de 50 NTU. Para concentrações de 200 e 300 mg·L^{-1}, observaram-se reduções adicionais mais discretas, com valores finais próximos de 45 NTU e 40 NTU, respectivamente. Esse comportamento indica que o sistema se aproxima de uma faixa ótima de dosagem, na qual aumentos adicionais na concentração do biopolímero resultam em ganhos limitados na eficiência de clarificação.

A Figura 7 ilustra o aspecto visual das suspensões antes e após o tratamento, evidenciando a diferença entre o sistema controle e a condição tratada com quitosana. Observa-se sobrenadante mais claro e menor quantidade de partículas em suspensão nas condições tratadas, corroborando os resultados quantitativos de turbidez.

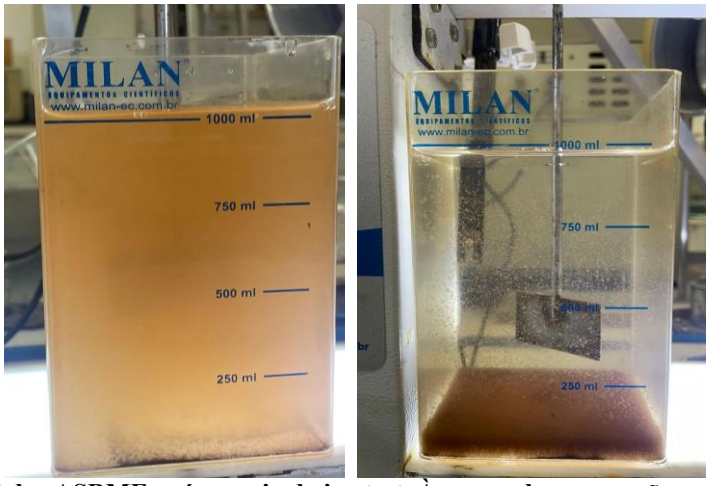


Figura 7. Aspecto visual das ASBMF após ensaio de jar test. À esquerda, suspensão sem tratamento. À direita, condição tratada com 200 mg·L⁻¹ de quitosana. Ensaios realizados com 1,0 L de suspensão contendo 0,5 g·L⁻¹ RUF, pH 8,0 ± 0,5, submetidos a 1 min de agitação rápida (260 rpm), 3 min de agitação lenta (70 rpm) e 3 min de sedimentação.

Para compreender a estrutura dos agregados formados durante o processo de floculação, foram obtidas micrografias ópticas das suspensões tratadas com quitosana. A análise microscópica permite correlacionar a redução da turbidez observada nos ensaios de jar test com a morfologia dos flocos formados durante o processo de clarificação.

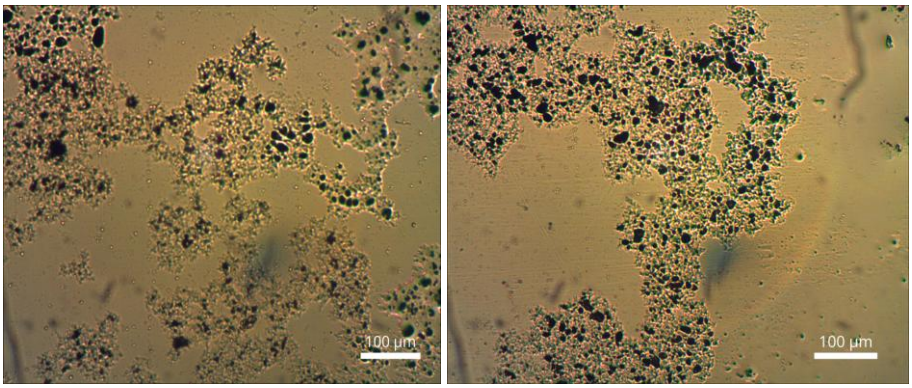


Figura 8 – Micrografias ópticas das suspensões após ensaio de jar test com adição de 200 mg·L⁻¹ de quitosana em ASBMF contendo 0,5 g·L⁻¹ de RUF, pH 8,0 ± 0,5. Barra de escala: 100 µm.

Conforme observado na Figura 8**,** as micrografias ópticas evidenciam a formação de agregados irregulares constituídos por numerosas partículas finas interconectadas, formando estruturas abertas e ramificadas na escala de centenas de micrômetros. Considerando que o RUF utilizado apresenta elevada fração de partículas com diâmetro inferior a 15 µm, a agregação dessas partículas resulta na formação de flocos significativamente maiores do que os constituintes individuais. Observa-se que as partículas permanecem distinguíveis no interior dos agregados, organizadas em uma rede porosa, característica da agregação mediada por polímeros. Esse tipo de morfologia indica que os flocos não são compactos, mas sim formados por estruturas abertas resultantes da conexão entre partículas por cadeias poliméricas.

Nesse contexto, a estrutura observada é compatível com o mecanismo de pontes poliméricas, no qual cadeias macromoleculares adsorvidas na superfície das partículas se estendem para o meio líquido e estabelecem ligações com outras partículas, promovendo a formação e o crescimento de agregados maiores. De acordo com Renault et al. (2009), a quitosana frequentemente atua por um mecanismo combinado envolvendo neutralização de cargas e formação de pontes poliméricas, em que os grupos amina protonados contribuem para a desestabilização eletrostática das partículas coloidais enquanto o elevado peso molecular do biopolímero permite a interligação física entre partículas e o crescimento de flocos volumosos.

A morfologia aberta e porosa observada nas micrografias também explica o caráter altamente hidratado do lodo obtido após a sedimentação. Flocos formados por polímeros tendem a apresentar elevada retenção de água em sua estrutura interna, devido à formação de redes tridimensionais pouco compactas. Esse comportamento é consistente com agregados estruturados por pontes poliméricas, nos quais as cadeias do biopolímero conectam múltiplas partículas minerais ultrafinas, formando flocos volumosos e sedimentáveis.

3.3. Potencial da quitosana e do amido

A avaliação dos resultados obtidos para o amido e a quitosana evidencia o potencial dos biopolímeros como alternativas aos reagentes sintéticos no tratamento de águas simuladas de beneficiamento de minério de ferro. Embora ambos os sistemas tenham promovido reduções significativas da turbidez, observam-se diferenças relevantes quanto aos mecanismos de atuação e às implicações operacionais associadas.

O sistema baseado em amido, em associação com o cloreto férrico, apresentou elevada eficiência de clarificação, com remoção expressiva de sólidos suspensos e concomitante precipitação de espécies iônicas dissolvidas. Esse desempenho está relacionado à atuação combinada dos mecanismos de coagulação por sais férricos e floculação por ponteamento polimérico. No entanto, a dependência da adição de coagulante metálico pode alterar a composição química da água recirculada, especialmente no que se refere ao residual de ferro e à formação de precipitados, o que deve ser considerado em sistemas de circuito fechado.

Por sua vez, a quitosana apresentou bom desempenho, com a vantagem de atuar como agente único de agregação, promovendo a desestabilização das partículas predominantemente por neutralização de cargas. No entanto, resultou em maiores valores de turbidez residual, associados à formação de flocos de menor dimensão e menor velocidade de sedimentação. Adicionalmente, sua aplicação requer controle mais rigoroso do pH do sistema, evidenciado pela demanda de alcalinidade necessária para manter o polímero em sua forma ativa.

Esses resultados indicam que a seleção do biopolímero deve ser realizada com base não apenas na eficiência de remoção de turbidez, mas também considerando aspectos operacionais, como consumo de reagentes, robustez do processo e impactos na química da água recirculada, especialmente em sistemas de circuito fechado onde o acúmulo de espécies pode afetar etapas subsequentes do beneficiamento.

4. Considerações finais

Os resultados obtidos demonstram que ambos os biopolímeros avaliados apresentam potencial para aplicação na clarificação de águas de processo da mineração de minério de ferro, sendo capazes de promover reduções significativas da turbidez em sistemas contendo partículas ultrafinas.

O sistema baseado na associação entre cloreto férrico e amido alcalinamente gelatinizado apresentou o melhor desempenho de clarificação, atingindo baixas turbidezes residuais. Esse resultado está diretamente relacionado à atuação combinada dos mecanismos de coagulação por sais férricos — com formação de hidróxidos e neutralização de cargas — e floculação por ponteamento polimérico promovido pelo amido, resultando na formação de flocos de maior dimensão, maior densidade e maior velocidade de sedimentação.

A quitosana, por sua vez, apresentou bom desempenho como agente único de agregação, destacando-se pela simplicidade operacional associada à ausência de coagulantes metálicos. No entanto, a formação de flocos de menor dimensão resultou em maiores valores de turbidez residual, indicando menor eficiência na etapa de separação sólido-líquido. Seu mecanismo de atuação foi predominantemente associado à neutralização de cargas, com contribuição limitada de ponteamento, além de apresentar maior sensibilidade às condições de pH do sistema.

De forma geral, os resultados indicam que a escolha entre as alternativas deve considerar não apenas a eficiência de clarificação, mas também aspectos operacionais e de integração com o circuito de processo, incluindo controle de pH, consumo de reagentes e impacto na composição química da água recirculada.

Como continuidade deste estudo, propõe-se a avaliação da associação da quitosana com baixas dosagens de polímeros sintéticos, como a poliacrilamida, com o objetivo de potencializar o mecanismo de floculação por ponteamento e promover a formação de flocos maiores e mais facilmente sedimentáveis, reduzindo a turbidez residual. Adicionalmente, serão investigados mecanismos de remoção de cátions dissolvidos, especialmente Ca^{2+} e Mg^{2+}, por meio de processos de adsorção e coprecipitação, envolvendo tanto os precipitados formados a partir da quitosana quanto os hidróxidos gerados na hidrólise do cloreto férrico. Esses estudos visam ampliar a compreensão dos fenômenos físico-químicos envolvidos e contribuir para o desenvolvimento de soluções mais robustas para o tratamento e reuso de águas em circuitos fechados de beneficiamento mineral.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) pelo suporte institucional. Agradecem também ao CNPq pelo financiamento de bolsa de Iniciação Científica e à CAPES pelo financiamento por meio de bolsas de pós-graduação e custeio no âmbito do PROEX/PPGE3M, processo nº [88881.844968/2023-01].

Declaração de uso de Inteligência Artificial

Os autores declaram que utilizaram o ChatGPT (OpenAI, versão GPT-5) exclusivamente como ferramenta de apoio para correção gramatical, revisão linguística e aprimoramento da clareza textual do manuscrito.

Contribuição dos autores

Danielli Martins Sanderi e Felipe Schneider contribuíram igualmente para este trabalho e compartilham a autoria principal.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil); INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: ANA; IBRAM, 2013.

ANDRIES, Renata; SILVA JÚNIOR, Renato; ALVES, Guilherme. Water management in iron ore mining: regression models for optimizing water use in mining complexes. In: IMWA 2025 – Time to Come. 2025.

ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. Journal of Cleaner Production, v. 262, 121267, 2020.

AZEVEDO, A.; OLIVEIRA, H. A.; RUBIO, J. Treatment and water reuse of lead-zinc sulphide ore mill wastewaters by high rate dissolved air flotation. Minerals Engineering, v. 127, p. 114–121, 2018.

CHENG, P. et al. The acid-base buffer capacity of red soil variable charge minerals and its surface complexation model. Acta Chimica Sinica, v. 75, p. 637–644, 2017.

DUAN, J.; GREGORY, J. Coagulation by hydrolysing metal salts. Advances in Colloid and Interface Science, v. 100–102, p. 475–502, 2003.

FILIPPOV, L. O.; SEVEROV, V. V.; FILIPPOVA, I. V. Mechanism of starch adsorption on Fe–Mg–Al-bearing amphiboles. International Journal of Mineral Processing, v. 123, p. 120–128, 2013.

GOMES, C. E. P. Remoção de partículas de suspensões de caulim e de águas brutas por coagulação-floculação com cloreto férrico e amido gelatinizado. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

JIANG, Wen-li; XU, Hai-feng. Treatment and recycling of the process water in iron ore flotation of Yuanjiacun Iron Mine. Journal of Chemistry, v. 2017, Article ID 9187436, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/9187436

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. Mecanismos, técnicas e aplicações da agregação no tratamento mineral e ambiental. Rio de Janeiro: CETEM, 2011.

OLIVEIRA, H. A.; AZEVEDO, A.; RUBIO, J. Innovative precipitation-flocculation process for treating turbid waters from Gualaxo do Norte River, Brazil. Mining, Metallurgy & Exploration, 2019.

PINHEIRO, Viviane da Silva; BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães; LEITE, José Yvan Pereira. Influência da qualidade da água na flotação de quartzo com amina. HOLOS, Natal, v. 3, p. 28–36, 2010.

RENAULT, F. et al. Chitosan for coagulation/flocculation processes – an eco-friendly approach. European Polymer Journal, v. 45, p. 1337–1348, 2009.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. Minerals Engineering, v. 15, p. 139–155, 2002.

SALEHIZADEH, H.; YAN, N.; FARNOOD, R. Recent advances in polysaccharide bio-based flocculants. Biotechnology Advances, v. 36, p. 92–119, 2018.

WEISSEBORN, P. K.; WARREN, L. J.; DUNN, J. G. Selective flocculation of ultrafine iron ore: mechanism of adsorption of starch onto hematite. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 99, p. 11–27, 1995.
WHISTLER, R. L.; BEMILLER, J. N.; PASCHALL, E. F. Starch: chemistry and technology. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2009.

XIAO, F.; ZHANG, X.; MA, J. Indecisiveness of electrophoretic mobility determination in evaluating Fe(III) coagulation performance. Separation and Purification Technology, v. 68, p. 273–278, 2009.

TINGIMENTO DE ALGODÃO COM CORANTE NATURAL E REATIVO: AVALIAÇÃO DO MECANISMO DO PROCESSO E DO PERFIL DOS EFLUENTES GERADOS

1 Pollyane Cibely da Cunha, 2 Catia Rosana Lange Aguiar, 3 Carlos Rafael da Silva de Oliveira
1 Universidade Federal de Santa Catarina, pollygouveia1@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, catia.lange@ufsc.br; 3 Universidade Federal de Santa Catarina carlos.oliveira@ufsc.br

Palavras-chave: Corante natural; Cinética de tingimento; Efluentes têxteis

Resumo

Este estudo avaliou o mecanismo de tingimento de algodão com corante natural violeta em comparação a uma tricromia de corantes reativos, com ênfase na mecânica do processo e nos impactos ambientais dos efluentes gerados. Os ensaios foram realizados em escala laboratorial e produtiva, incluindo análise colorimétrica por K/S e ΔE*, cinética de tingimento, isotermas de adsorção e caracterização físico-química e ecotoxicológica dos efluentes. Os resultados indicaram que, embora ambos os sistemas apresentem exaustão de corante semelhante, cerca de 51,6% para o reativo e 53,8% para o natural, o comportamento do corante natural foi instável, com variações de cor superiores ao limite industrial e ΔE* acima de 3,0 em escala produtiva, enquanto o sistema reativo manteve ΔE* próximo de 1,5. A cinética do sistema reativo apresentou melhor ajuste ao modelo de pseudo-primeira ordem, com R^2 de aproximadamente 0,84. Do ponto de vista ambiental, os efluentes do corante natural apresentaram maior carga orgânica, com DQO igual ou superior a 943 mg/L e DBO igual ou superior a 809 mg/L, além de razão DBO/DQO de aproximadamente 0,86 e elevada toxicidade aguda, com CE50 de 2,21% e fator de toxicidade de 64. Em contraste, o sistema reativo apresentou menor carga orgânica, com DQO igual ou superior a 525 mg/L e DBO igual ou inferior a 88 mg/L, porém elevada salinidade, com cloretos em torno de 9215 mg/L, além de alta alcalinidade. Os resultados demonstram que o uso de corantes naturais não reduz necessariamente o impacto ambiental, mas altera o perfil do efluente, passando de uma matriz predominantemente inorgânica para uma matriz orgânica mais tóxica. Assim, a substituição direta de corantes reativos por naturais requer avaliação crítica da mecânica do processo e do tratamento de efluentes associado.

Introdução

O tingimento têxtil constitui uma das etapas mais relevantes do beneficiamento de substratos celulósicos, tanto pela importância estética e comercial da cor quanto pelos impactos ambientais associados ao processo. No caso do algodão, os corantes reativos são amplamente empregados em escala industrial devido à sua elevada afinidade com a celulose, boa fixação e ampla gama cromática, características que favorecem a reprodutibilidade e a estabilidade da cor obtida (BROADBENT, 2001; SHORE, 2002; HAUSER, 2011). Entretanto, a aplicação desses corantes requer o uso de eletrólitos e agentes alcalinizantes, o que contribui para a geração de efluentes com elevada carga salina e alcalinidade, impondo desafios importantes ao tratamento ambiental (WARDMAN, 2017; YAGUB et al., 2012; AL-TOHAMY et al., 2022).

Em paralelo, os corantes naturais têm sido retomados como alternativa para o tingimento têxtil, especialmente em propostas associadas ao uso de matérias-primas de origem natural e à busca por processos mais sustentáveis (VANKAR, 2017; SILVA, 2018). Entre esses materiais, destaca-se o corante violeta obtido de Kerria lacca, cujas características de comportamento químico e aplicação têxtil foram descritas em material técnico do fornecedor do corante (FRATELLI, 2024). No entanto, diferentemente dos corantes reativos, os sistemas naturais tendem a apresentar maior dependência das condições de processo, da preparação do substrato e da natureza das interações corante-fibra, o que pode comprometer a uniformidade, a intensidade colorística e a reprodutibilidade do tingimento (BECHTOLD; TURCZA; GEISSER, 2006; VANKAR, 2017; ZANONI; YAMANAKA, 2014).

A comparação entre corantes naturais e reativos não deve se restringir apenas à tonalidade final obtida. A avaliação do desempenho tintorial requer a análise de parâmetros colorimétricos, como intensidade colorística e diferença total de cor, que permitem verificar a capacidade de reprodução da tonalidade desejada e a estabilidade do processo. Nesse contexto, medidas de K/S e ΔE* são amplamente utilizadas na indústria têxtil e em estudos acadêmicos por permitirem quantificar a força colorística do tingimento e a proximidade entre amostras e padrões de referência (CIE, 2004; DATACOLOR, [s. d.]).

Além da resposta colorimétrica, a compreensão da mecânica do tingimento é fundamental para interpretar o comportamento de cada sistema. O estudo cinético permite acompanhar a transferência do corante do banho para a fibra ao longo do tempo, possibilitando identificar diferenças na velocidade de adsorção, na estabilidade do processo e na adequação dos modelos cinéticos empregados. Da mesma forma, a modelagem por isotermas contribui para avaliar a afinidade entre corante e substrato e o modo como o equilíbrio de adsorção se estabelece (CLARK, 2011; SUN et al., 2019). Esses aspectos são particularmente relevantes para corantes naturais, uma vez que sua interação com a fibra celulósica tende a ocorrer de forma mais heterogênea e mais dependente das condições do sistema do que nos processos reativos convencionais (CLARK, 2011; VANKAR, 2017; ZANONI; YAMANAKA, 2014).

Do ponto de vista ambiental, a substituição de corantes sintéticos por naturais nem sempre representa redução direta de impacto. Embora os corantes reativos sejam reconhecidos pela geração de efluentes com alta carga salina, os sistemas naturais também podem originar águas residuais com elevada carga orgânica, turbidez e toxicidade, dependendo da composição do extrato,

da eficiência de fixação do corante e da quantidade de material não adsorvido remanescente no banho (BECHTOLD; TURCZA; GEISSER, 2006; AL-TOHAMY et al., 2022). Assim, a avaliação ambiental desses processos exige não apenas a determinação de parâmetros físico-químicos dos efluentes, mas também a análise ecotoxicológica, de modo a compreender com maior precisão o comportamento ambiental de cada rota tintorial (AL-TOHAMY et al., 2022).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo comparar o tingimento de algodão com corante natural violeta e com tricromia de corantes reativos, com foco nos resultados de cor, na cinética de tingimento, no comportamento de equilíbrio por isotermas e na caracterização dos efluentes gerados. A proposta é compreender o mecanismo do tingimento natural em comparação ao sistema reativo e discutir, sob a perspectiva ambiental, o comportamento dos efluentes associados a cada processo.

Materiais e Métodos

Os experimentos foram conduzidos na empresa Círculo LTDA, em Gaspar, Santa Catarina, onde foram realizados o desenvolvimento das formulações tintoriais em escala laboratorial e a reprodução dos processos em escala produtiva. As análises por espectrofotometria UV-Vis foram realizadas no Laboratório de Beneficiamento Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Blumenau. A caracterização físico-química dos efluentes foi executada em laboratório parceiro da empresa Ekonova, em Pomerode, Santa Catarina, e os ensaios de toxicidade aguda foram conduzidos pelo laboratório Umwelt Biotecnologia Ambiental, em Blumenau, Santa Catarina.

Foi utilizado como substrato fio 100% algodão 4/2 retorcido. Foram avaliados dois sistemas de tingimento: um com corante natural violeta e outro com tricromia de corantes reativos, composta pelos corantes Amarelo Corafix MER, Vermelho Corafix ME4B e Azul Corafix M.SFB. Os principais materiais empregados nos processos estão apresentados na Tabela 01.

Categoria	Material	Função	Sistema de tingimento
Substrato	Fio 100% algodão 4/2	Material têxtil	Ambos
Corante	Corante natural violeta	Agente tintorial	Natural
Corante	Amarelo Corafix MER	Agente tintorial	Reativo
Corante	Vermelho Corafix ME4B	Agente tintorial	Reativo
Corante	Azul Corafix M.SFB	Agente tintorial	Reativo
Auxiliar	Rico Cat B	Cationizante	Natural
Auxiliar	Hidróxido de sódio (NaOH)	Alcalinizante	Natural
Auxiliar	Carbonato de sódio (Na_2CO_3)	Alcalinizante	Ambos
Auxiliar	Rico Disperse BR	Dispersante	Natural
Auxiliar	Cloreto de sódio (NaCl)	Eletrólito	Reativo
Auxiliar	Goldsperse MCF	Sequestrante / dispersante	Reativo
Auxiliar	Detergente (Innoclean / Ekotex OTM)	Lavagem	Ambos

Tabela 07: Materiais utilizados nos sistemas de tingimento.
Fonte: Autores (2026)

Desenvolvimento das cores e processos de tingimento

O desenvolvimento das cores foi realizado inicialmente em escala laboratorial em máquina laboratorial Kimak ATH-T2, com 60ºC e posteriormente levado a escala produtiva. Para o sistema natural foram preparados tingimentos com concentrações entre 1 e 3% de corante sobre a massa do material têxtil, adotando-se como condição de referência a formulação com 3%, escolhida com base na tonalidade violeta. O processo incluiu cationização prévia do substrato com agente cationizante e hidróxido de sódio, seguida da aplicação do corante natural, adição de dispersante e carbonato de sódio e, posteriormente, lavagem final. O tingimento foi conduzido em equipamento industrial do tipo armário para meadas, conforme receita e gráfico da figura 01:

Sequência	Função	Dosagem (%)
A	Emulsionante	1
B	Cationizante	5
C	NaOH 50%	1,5
D	Emulsionante	2
E	Dispersante	2
F	Corante natural	3
G	Barrilha leve	1

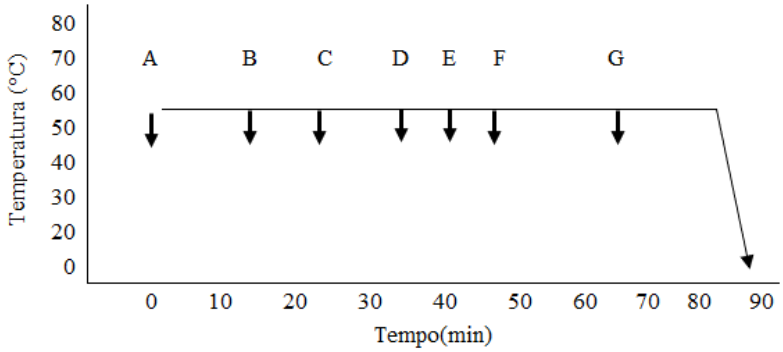


Figura 01: Perfil térmico e sequência de adição dos insumos no tingimento com corante natural em escala produtiva.
Fonte: Autores (2026)

A partir da tonalidade de referência estabelecida com o corante natural, foi desenvolvida uma tricromia reativa com o objetivo de aproximar a cor obtida no sistema natural. A formulação reativa foi ajustada em laboratório por combinação dos corantes amarelo, vermelho e azul, utilizando dispersante, sal e carbonato de sódio. O processo foi conduzido em máquina Kimak ATH-T2, com aquecimento até 60 °C, permanência inicial de 15 min após adição dos corantes e tingimento complementar por 60 min após a dosagem do álcali, seguido de lavagem quente e enxágue final a frio. Utilizado mesmos equipamentos do processo natural e conforme a receita figura 02 para o tingimento reativo:

Sequência	Produto	Dosagem
H	Dispersante	2,0 g/L
I	Amarelo Corafix MER	0,03%
I	Vermelho Corafix ME4B	0,09%
I	Corafix Azul M. SFB	0,06%
J	Sal refinado não iodado	15,0 g/L
L	Barrilha leve	7,0 g/L

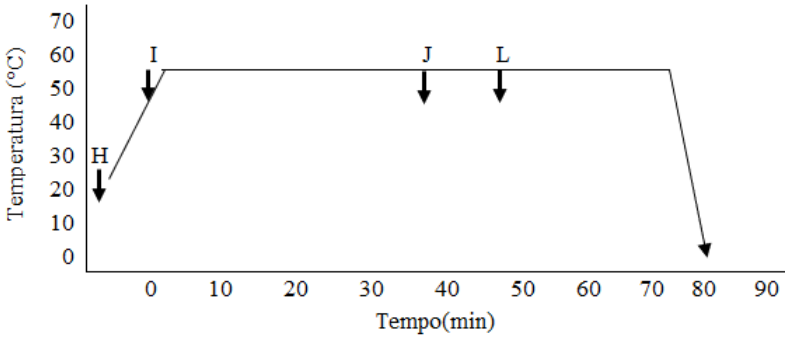


Figura 02: Perfil térmico e sequência de adição dos insumos no tingimento com tricromia reativa em escala produtiva. Fonte: Autores (2026)

Após a definição das formulações em laboratório, ambos os sistemas foram reproduzidos em escala produtiva em equipamento tipo armário para meadas, em condições da rotina industrial, permitindo a comparação dos dois processos em bases equivalentes.

Avaliação colorimétrica dos substratos tingidos

A avaliação colorimétrica das amostras tingidas foi realizada por espectrofotometria de reflectância em equipamento Datacolor 500, utilizando iluminante D65 e observador de 10°. Foram determinados os parâmetros K/S, força colorística relativa, diferença de cor total ΔE. Como padrão de referência foi adotada a amostra obtida com corante natural na condição selecionada como alvo, e as demais amostras, naturais e reativas, foram comparadas em relação a esse padrão.

Determinação da cinética e isoterma de tingimento

Foram realizados estudos cinéticos e de equilíbrio para processos de tingimento com corante natural (tom violeta) e com tricromia de corantes reativos. Inicialmente, a cinética de tingimento foi avaliada por meio do monitoramento da concentração de corante no banho ao longo do tempo, com coletas periódicas de alíquotas a cada 10 minutos em escala laboratorial e nos tempos de 25, 65, 140 e 155 minutos em escala industrial. As coletas iniciaram-se após a adição do primeiro auxiliar químico (sal, no caso reativo, e agente cationizante, no natural) e se estenderam até o final do processo. Os ensaios foram realizados em duplicata.

A concentração de corante no banho foi determinada por espectrofotometria UV-Vis, a partir de curvas de calibração previamente elaboradas para cada sistema tintorial, com base na Lei de Lambert-Beer. Os dados foram avaliados por meio da investigação dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem. O modelo de pseudo-primeira ordem assume que a taxa de adsorção do corante é proporcional à concentração do corante no banho de tingimento e sua forma linear é expressa pela Eq. 1:

$$ln\ ln\ (q_e - q_t)\ = ln\ ln\ q_{\ e} - k_1 t \qquad (01)$$

Onde q_e e q_t representam as capacidades de adsorção (mg g^{-1}) no equilíbrio e no tempo t, e k_1 a constante de velocidade de pseudo-primeira ordem (PFO). Já o modelo cinético de pseudo-segunda ordem (PSO) baseia-se na suposição de que a taxa de adsorção é determinada pelo quadrado dos sítios de adsorção não ocupados na superfície da fibra e sua forma linear é expressa pela Eq. 2:

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \qquad (02)$$

Para o estudo de equilíbrio, foram determinadas isotermas de adsorção para o corante natural, utilizando concentrações de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0% e 3,2% em relação à massa do material têxtil. As concentrações inicial e final dos banhos foram obtidas por espectrofotometria UV-Vis, permitindo calcular os valores de q_e (concentração de corante na fibra no equilíbrio) e C_e (concentração no banho no equilíbrio).

Os dados experimentais foram então ajustados aos modelos de Langmuir e Freundlich. O modelo linearizado de Langmuir foi aplicado conforme a Equação 3:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} K_L C_e} \quad (03)$$

onde q_e é a concentração de corante na fibra no equilíbrio (g de corante / g de fibra), C_e é a concentração de corante no banho no equilíbrio ($g \cdot L^{-1}$), q_{max} é a capacidade máxima de fixação da fibra (g de corante / g de fibra), representando a saturação dos sítios ativos, e K_L é a constante de afinidade entre o corante e a fibra ($L \cdot g^{-1}$). O modelo de Freundlich foi aplicado conforme a Equação 4:

$$ln\ ln\ q_e = lnK_F + nlnC_e \quad (04)$$

onde q_e é a concentração de corante na fibra no equilíbrio (g de corante / g de fibra), C_e é a concentração de corante no banho no equilíbrio ($g \cdot L^{-1}$), K_F é a constante de Freundlich relacionada à capacidade de adsorção do sistema, e n é o índice de heterogeneidade, indicando a intensidade da adsorção e a não linearidade do processo.
A análise conjunta dos resultados cinéticos e de equilíbrio, associada aos dados colorimétricos de exaustão, permitiu compreender os mecanismos de interação corante–fibra e comparar o comportamento dos sistemas natural e reativo quanto à eficiência de adsorção e estabilidade do tingimento.

Caracterização dos efluentes gerados

A caracterização dos efluentes foi realizada a partir de amostras compostas obtidas pela mistura das águas residuais geradas nas diferentes etapas de cada processo, incluindo banhos de tingimento e águas de lavagem, de modo a representar o efluente global de cada rota tintorial. As análises físico-químicas foram conduzidas pelo laboratório da empresa química Ekonova de Pomerode/SC, a partir de amostras das diferentes etapas do processo, incluindo banhos de tingimento e águas de lavagem. Essa abordagem permitiu comparar não apenas a presença de cor residual, mas também a natureza da carga poluidora associada a cada sistema, considerando tanto constituintes orgânicos quanto inorgânicos.

Foram determinados os parâmetros cor aparente, cor verdadeira, pH, turbidez, demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio, alcalinidade total, cloretos, nitrogênio total e fósforo total, por metodologias internas do laboratório baseadas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

A avaliação ecotoxicológica foi conduzida pelo Laboratório Umwelt, utilizando Daphnia magna como organismo-teste, conforme a norma ABNT NBR 12713:2022. A escolha desse microcrustáceo se justifica por sua elevada sensibilidade a contaminantes dissolvidos em meio aquoso e por seu uso consolidado em ensaios ecotoxicológicos para avaliação de toxicidade aguda em águas residuais. Foram analisadas amostras de efluente do processo com corante reativo e do processo com corante natural, ambas classificadas como água residual.

A combinação entre caracterização físico-química e avaliação ecotoxicológica permitiu uma análise mais abrangente do comportamento dos efluentes gerados pelos dois sistemas de tingimento.

Resultados e Discussões

Os resultados dos ensaios laboratoriais para os sistemas tintoriais natural e reativo são apresentados na Tabela 02. A amostra padrão apresentou K/S de 1,73 e força relativa de 100%, sendo utilizada como referência para comparação por representar a condição de cor adotada como alvo no estudo. A escolha desse padrão foi baseada na tonalidade violeta obtida no sistema natural, a partir da qual foram avaliadas as demais formulações naturais e, posteriormente, ajustada a formulação reativa em tricromia. A Tabela 02 reúne os valores de intensidade colorística (K/S), força relativa (%) e diferença de cor (ΔE), permitindo comparar a resposta de cada formulação em relação ao padrão estabelecido. A análise foi realizada com base no valor de ΔE*, adotando-se como critério de aceitação o limite de 1,50 utilizado pela empresa para avaliação da proximidade de cor.

Amostra	K/S	Força Relativa (%)	ΔE*	Observações
Padrão	1,73	100	-	Padrão de referência
A1 - Natural	1,56	90,17	1,57	Reprovado
A2 - Natural	1,60	92,49	1,46	Aprovado
A3 - Natural	1,61	93,06	1,62	Reprovado
A4 - Natural	2,10	121,39	3,85	Reprovado
A5 - Natural	2,69	155,49	5,89	Reprovado
Tricomia reativa 01	0,88	76,42	2,87	Reprovado
Tricomia reativa 02	0,98	86,24	1,48	Aprovado

Tabela 02 – Resultados colorimétricos das amostras laboratoriais obtidas com corante natural violeta e formulações por tricromia reativa.
Fonte: Autores (2026)

Para o sistema natural, as amostras apresentaram K/S entre 1,56 e 2,69 e força relativa entre 90,17% e 155,49%. As diferenças de cor variaram de 1,46 a 5,89. Entre as amostras avaliadas, apenas a amostra A2 – Natural apresentou ΔE* de 1,46, sendo considerada aprovada. As demais amostras (A1, A3, A4 e A5) apresentaram ΔE* entre 1,57 e 5,89, sendo classificadas como reprovadas. Observa-se também aumento significativo da intensidade colorística nas amostras A4 (K/S = 2,10; 121,39%) e A5 (K/S = 2,69; 155,49%), indicando variação de tonalidade em relação ao padrão.

No sistema reativo, a primeira formulação de tricromia apresentou K/S de 0,88, força relativa de 76,42% e ΔE* de 2,87, sendo considerada reprovada. Após ajuste da formulação, a segunda tricromia apresentou K/S de 0,98, força relativa de 86,24% e ΔE* de 1,48, sendo classificada como aprovada, considerando o limite de aceitação de 1,50 adotado pela empresa.

A comparação entre os sistemas em escala produtiva está apresentada na Tabela 03.

Processo	Situação comparada	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔE*	ΔE CMC (2:1)	Julgamento do software
Reativo	Lote tinto em produção × padrão de laboratório	1,45	0,3	−0,24	1,50	0,65	Passa
Natural	Lote tinto em produção × padrão de laboratório	−0,91	2,4	2,15	3,31	2,99	Falha

Tabela 03 – Comparação colorimétrica entre os sistemas tintoriais natural e reativo em escala produtiva.
Fonte: Autores (2026).

O sistema reativo apresentou ΔL* de 1,45, Δa* de 0,27, Δb* de −0,24 e diferença de cor de 1,50, com valor de 0,65 segundo o critério CMC (2:1), sendo classificado como passa pelo software de avaliação. Já o sistema natural apresentou ΔL* de −0,91, Δa* de 2,35, Δb* de 2,15 e diferença de cor de 3,31, com valor de 2,99 no critério CMC (2:1), sendo classificado como falha.

A comparação visual entre os padrões laboratoriais e os lotes produzidos é apresentada na Figura 01, evidenciando maior proximidade tonal no sistema reativo em relação ao padrão, enquanto o sistema natural apresenta maior variação de tonalidade.

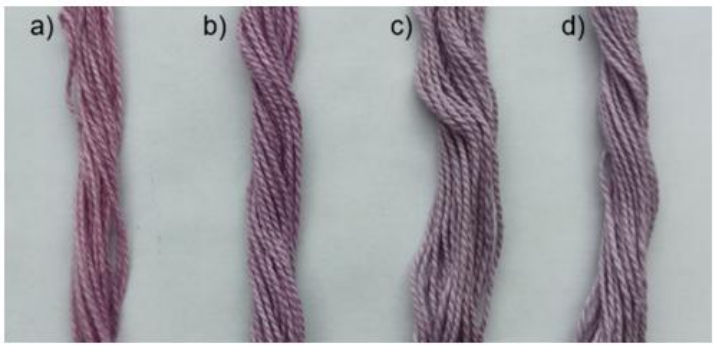


Figura 01: Comparação visual dos padrões laboratoriais (b e c) e os lotes produzidos para o sistema natural (a) e reativo (d).
Fonte: Autores (2026).

Os resultados indicam que o corante natural apresentou maior variação de intensidade e tonalidade, dificultando a reprodutibilidade da cor. Em contraste, o sistema reativo demonstrou maior estabilidade e controle tonal após ajuste da formulação, indicando melhor repetibilidade do tingimento em condição industrial (VANKAR, 2017; ZANONI; YAMANAKA, 2014).

Cinética e isoterma de tingimento

A quantificação dos corantes foi realizada por espectrofotometria com curvas de calibração específicas. Para o sistema reativo (tricromia), as leituras foram realizadas a 546 nm, com soluções padrão entre 5,3 e 53,06 mg·L^{-1} e regressão linear com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9996$. Para o corante natural violeta, as leituras foram realizadas a 525 nm, na faixa de 50 a 1000 mg·L^{-1}, com regressão linear apresentando $R^2 \approx 0,9898$.

Os parâmetros cinéticos e isotérmicos obtidos para os sistemas avaliados estão apresentados na Tabela 04. O sistema reativo apresentou concentração inicial de 32,54 mg·L^{-1} e concentração final de 15,61 mg·L^{-1} aos 70 min, resultando em exaustão de 51,59%. O melhor ajuste cinético ocorreu para o modelo de pseudo-primeira ordem (PFO), com $R^2 = 0,863$, embora o modelo de pseudo-segunda ordem também tenha apresentado ajuste relativamente próximo sendo $R^2 = 0,7844$.

Para o corante natural, a concentração inicial foi de 665,37 mg·L^{-1} e a final de 307,09 mg·L^{-1} aos 100 min, resultando em exaustão de 53,85%. Os ajustes cinéticos apresentaram $R^2 = 0,8486$ para o modelo PFO e $R^2 = 0,2245$ para PSO, indicando menor aderência ao modelo de quimissorção. As isotermas de adsorção indicaram melhor ajuste ao modelo de Freundlich, com parâmetros n = 1,03 e Kf ≈ 48,8, caracterizando adsorção em superfície heterogênea e afinidade limitada entre o corante natural e a fibra.

Sistema	C_0 (mg·L⁻¹)	C_{final} (mg·L⁻¹)	Tempo de equilíbrio (min)	Exaustão (%)	R^2 PFO	R^2 PSO	Parâmetros de isoterma
Reativo (tricromia)	32,54	15,61	70	51,59	0,863	0,7844	—
Natural (violeta)	665,37	307,09	100	53,85	0,8486	0,2245	Freundlich: n = 1,03; Kf ≈ 48,8

Tabela 04:Parâmetros cinéticos e isotérmicos dos sistemas tintoriais avaliados
Fonte: Autores (2026)

Caracterização dos efluentes gerados

Do ponto de vista ambiental, os efluentes apresentaram perfis distintos, evidenciando que a natureza do corante e a lógica de aplicação do processo influenciam diretamente o tipo de carga poluidora gerada. O sistema com corante natural apresentou predominância de carga orgânica, com DQO ≥ 943 mg/L e DBO ≥ 809 mg/L, resultando em razão DBO/DQO de 0,86. Esse valor sugere que a fração orgânica presente no efluente natural apresenta potencial de biodegradação relativamente elevado, embora os valores absolutos de DQO e DBO indiquem carga orgânica expressiva. Além disso, a turbidez de 58 NTU, aproximadamente dez vezes superior à observada no sistema reativo, de 4,1 NTU, indica elevada presença de sólidos suspensos, partículas coloidais e material não incorporado à fibra durante o tingimento. Esse resultado reforça a interpretação de que o sistema natural apresentou menor eficiência de fixação global, com maior permanência de compostos no banho residual. O pH elevado, com valores iguais ou superiores a 10, também representa um fator crítico, uma vez que amplia a necessidade de correção química antes do descarte e pode interferir negativamente no desempenho de etapas subsequentes de tratamento. A comparação entre os principais parâmetros físico-químicos dos dois sistemas é apresentada na Figura 02.

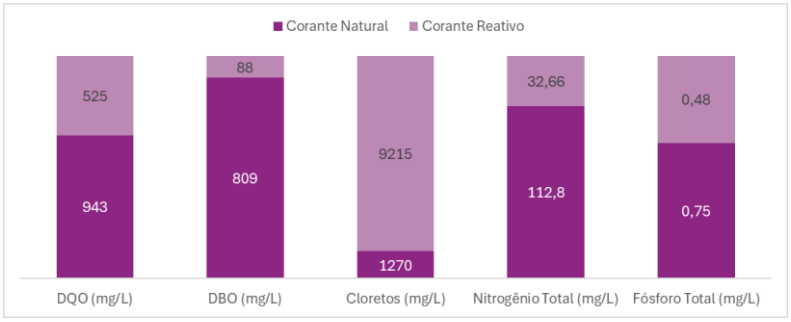


Figura 02: Comparação dos principais parâmetros físico-químicos dos efluentes dos sistemas natural e reativo.
Fonte: Autores (2026).

Em contraste, o sistema reativo apresentou DQO ≥ 525 mg/L e DBO ≤ 88 mg/L, resultando em razão DBO/DQO de aproximadamente 0,17, valor compatível com menor fração biodegradável da carga orgânica presente. O teor de cloretos atingiu 9215 mg/L, aproximadamente sete vezes superior ao sistema natural, no qual foi ≤ 1270 mg/L. Da mesma forma, a alcalinidade total alcançou cerca de 675.000 mg/L, valor extremamente elevado quando comparado ao natural, ≤ 1070 mg/L, refletindo o uso intensivo de eletrólitos e álcalis característico do tingimento com corantes reativos (WARDMAN, 2017; YAGUB et al., 2012). Sob a ótica da tratabilidade, esse perfil indica que o sistema reativo transfere a criticidade do efluente para a salinidade e para a carga alcalina, fatores que podem comprometer processos biológicos, aumentar a condutividade do efluente e limitar a eficiência de tratamento em plantas não preparadas para receber esse tipo de matriz. Assim, embora o sistema reativo apresente menor carga orgânica, isso não significa baixa complexidade ambiental, mas sim uma criticidade de natureza distinta.

A avaliação ecotoxicológica reforçou essa distinção de perfis e trouxe um elemento decisivo para a interpretação ambiental do estudo. O efluente do sistema natural apresentou CE50 de 2,21% e fator de toxicidade de 64, enquanto o sistema reativo apresentou CE50 de 35,36% e FT de 4, indicando que o efluente natural foi aproximadamente 16 vezes mais tóxico nas condições avaliadas. Esse resultado evidencia que, apesar da origem natural do corante, a permanência de compostos orgânicos dissolvidos e não fixados no banho residual contribui significativamente para o aumento da toxicidade aguda. Em outras palavras, a naturalidade da fonte tintorial não foi suficiente para resultar em um efluente de menor agressividade biológica. A relação entre CE50 e fator de toxicidade para os dois sistemas é apresentada na Figura 03.



Figura 03: Comparação dos parâmetros de toxicidade (CE50 e FT) dos efluentes.
Fonte: Autores (2026).

Esse comportamento é particularmente relevante porque evidencia que a avaliação ambiental de processos tintoriais não pode ser baseada apenas na origem do corante empregado. No caso do sistema natural, a principal criticidade concentrou-se na carga orgânica, na turbidez e na resposta ecotoxicológica, enquanto no sistema reativo a preocupação recaiu sobretudo sobre a carga salina e a alcalinidade. Portanto, os resultados demonstram que a substituição de corantes reativos por naturais não implica, necessariamente, redução do impacto ambiental, mas sim uma mudança no perfil do efluente gerado.

Em síntese, enquanto o sistema reativo gera um efluente predominantemente inorgânico, com elevada salinidade e forte alcalinidade, o sistema natural gera um efluente mais carregado organicamente, mais turvo e ecotoxicologicamente mais severo. Dessa forma, cada rota tintorial demanda estratégias específicas de tratamento e controle, sendo tecnicamente inadequado avaliar a sustentabilidade do processo apenas com base na origem do corante, sem considerar a eficiência de fixação, a composição residual do banho e a resposta ecotoxicológica do efluente final.

Considerações finais

Na avaliação colorimétrica, os resultados mostraram diferença clara entre os sistemas quanto à repetição da cor em escala produtiva. O sistema reativo apresentou ΔE* de 1,50 e ΔE CMC (2:1) de 0,65, enquanto o sistema natural apresentou ΔE* de 3,31 e ΔE CMC (2:1) de 2,99. Esses valores mostram que a principal limitação do sistema natural não está na obtenção inicial da tonalidade violeta, mas na repetição do resultado sob condição industrial, com maior afastamento em relação ao padrão estabelecido.

Na análise cinética, as duas rotas apresentaram exaustão final próxima, 51,59% para o sistema reativo e 53,85% para o natural, porém com comportamentos distintos ao longo do tingimento. No sistema reativo, a concentração residual do corante reduziu de 32,54 mg/L para 15,61 mg/L em 70 min, com melhor ajuste ao modelo de pseudo-primeira ordem, $R^2 = 0,863$. No sistema natural, a concentração atingiu valor máximo de 665,37 mg/L aos 30 min e valor final de 307,09 mg/L aos 100 min, com $R^2 = 0,8486$ para pseudo-primeira ordem e $R^2 = 0,2245$ para pseudo-segunda ordem. Embora a exaustão final tenha sido semelhante, a variação da concentração ao longo do processo natural indicou ocorrência simultânea de adsorção e dessorção, enquanto o sistema reativo apresentou redução progressiva da concentração no banho.

A análise de equilíbrio reforçou essa diferença. O corante natural apresentou ajustes moderados aos modelos de Langmuir e Freundlich, com R^2 de 0,6665 e 0,6468, respectivamente. O valor de $n = 1,03$ e $Kf \approx 48,8$ indica adsorção pouco favorável e distribuição heterogênea dos sítios de interação na fibra. Em conjunto, os resultados cinéticos e isotérmicos indicam que o sistema natural apresentou menor estabilidade de fixação do corante ao substrato.

Na avaliação ambiental, os efluentes apresentaram perfis distintos. O sistema natural apresentou DQO ≥ 943 mg/L, DBO ≥ 809 mg/L, razão DBO/DQO de 0,86, turbidez de 58 NTU, CE50 de 2,21% e fator de toxicidade igual a 64. Esses dados indicam elevada carga orgânica, maior presença de sólidos suspensos e maior efeito ecotoxicológico. O sistema reativo apresentou DQO ≥ 525 mg/L, DBO ≤ 88 mg/L, razão DBO/DQO de aproximadamente 0,17, cloretos de 9215 mg/L e alcalinidade total de aproximadamente 675.000 mg/L, caracterizando efluente com menor carga orgânica, porém com elevada carga inorgânica, salinidade e alcalinidade.

Considerando conjuntamente os parâmetros físico-químicos e ecotoxicológicos, o efluente do sistema natural apresentou maior severidade ambiental nas condições avaliadas, principalmente em função da carga orgânica, turbidez e toxicidade aguda. O sistema reativo, embora menos tóxico agudamente, apresentou restrição ambiental associada à salinidade e à alcalinidade do efluente.

Dessa forma, a substituição do sistema reativo pelo natural não implicou redução direta do impacto ambiental. Nas condições estudadas, o sistema natural apresentou maior variação de cor em produção e efluente ambientalmente mais crítico, enquanto o sistema reativo apresentou melhor repetição do tingimento, porém com efluente de elevada carga salina e alcalina. A comparação entre rotas tintoriais deve, portanto, considerar simultaneamente repetibilidade da cor, comportamento de adsorção e composição do efluente gerado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Círculo Ltda pelo suporte técnico e disponibilização da estrutura para realização dos ensaios experimentais. À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), campus Blumenau, pelo apoio científico e infraestrutura laboratorial. Aos laboratórios parceiros envolvidos nas análises físico-químicas e ecotoxicológicas, em especial à Ekonova e à Umwelt Biotecnologia Ambiental, pelo suporte nas análises dos efluentes. À orientação acadêmica e ao programa de pós-graduação pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências bibliográficas

AL-TOHAMY, R. et al. Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 230, 113160, 2022.

BECHTOLD, T.; TURCZA, H.; GEISSER, W. Natural dyes for textile dyeing: a comparison of traditional dyeing methods and modern dyeing technologies. Journal of Cleaner Production, v. 14, p. 145–151, 2006.

BROADBENT, A. D. Basic Principles of Textile Coloration. West Yorkshire: Society of Dyers and Colourists, 2001.

CIE – COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE. Colorimetry. 3rd ed. CIE Publication 15:2004. Vienna: CIE, 2004.

CLARK, M. (ed.). Handbook of Textile and Industrial Dyeing. Volume 1: Principles, Processes and Types of Dyes. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.

DATACOLOR. Essenciais da Ciência da Cor. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.datacolor.com/pt-br/business-solutions/centro-de-aprendizagem/color-science-essentials/. Acesso em: 21 ago. 2025.

FRATELLI. Características sobre comportamento químico e aplicação do corante natural Kerria lacca. Relatório técnico. [S. l.]: Fratelli, 2024.

HAUSER, P. J. (ed.). Textile Dyeing. Rijeka: InTech, 2011.

SHORE, J. Colorants and Auxiliaries. Volume 1: Colorants. 2. ed. Bradford: Society of Dyers and Colourists, 2002.

SILVA, M. G. da. Corantes naturais no tingimento e acabamento antimicrobiano e anti-UV de fibras têxteis. Guimarães: Universidade do Minho, 2018.

SUN, S. et al. Adsorption and dyeing properties of acid dyes on fine denier silk fibers. Textile Research Journal, v. 89, n. 17, p. 3545–3555, 2019.

VANKAR, P. S. Natural Dyes for Textiles: Sources, Chemistry and Applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.

WARDMAN, R. H. An Introduction to Textile Coloration: Principles and Practice. Chichester: John Wiley & Sons; Society of Dyers and Colourists, 2017.

YAGUB, M. T. et al. Dye and pigment removal from wastewater using adsorption techniques: a review. Journal of Environmental Management, v. 113, p. 236–249, 2012.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. (orgs.). Corantes. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

PRODUÇÃO DE CELULASES FÚNGICAS A PARTIR DA FERMENTAÇÃO SEQUENCIAL DO BAGAÇO DE MALTE UTILIZANDO *Aspergillus* sp

1Sergio de França Nunes Júnior, 2Thiago Marques de Mello, 3Gislany Pereira de Lira, 4Rebeca de Lima Oliveira, 5André Felipe de Melo Sales Santos, 6Liliana Andréa dos Santos, 7Tatiana Souza Porto.

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: sergio.nunes@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: rebeca.limaoliveira@ufrpe.br; 5 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: andre.felipesantos@ufrpe.br; 6 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: liliana.andrea.santos@gmail.com; 7 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: tatiana.porto@ufrpe.br

Palavras-chave: Bagaço de malte; Celulase; Fermentação sequencial.

Resumo

Com o crescimento do mercado cervejeiro, bem como a sua importância para a economia do Brasil, propiciou a geração de quantidades expressivas de resíduos, como o bagaço de malte. Esse subproduto é rico em celulose, hemicelulose e lignina, que são três tipos de polímeros, encontrados de forma abundante no planeta Terra. Este estudo, teve como objetivo, realizar a produção de celulases fúngicas a partir da fermentação sequencial do bagaço de malte utilizando *Aspergillus* sp. Antes da fermentação foi realizada a caracterização do bagaço de malte quanto ao pH, umidade, condutividade Elétrica, Sólidos totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis, teor de fibras e grau de biodegradabilidade e utilizado como substrato em fermentação em estado sólido (FES) e submersa (FS), testando quatro linhagens fúngicas, para utilização na fermentação sequencial (Fsq), também o desenvolvimento do planejamento fatorial e caracterização bioquímica. Após a fermentação, *Aspergillus japonicus* URM 5242 apresentou os melhores desempenhos enzimáticos na FES, com atividades de 0,392 UI/mL (FPase) e 0,239 UI/mL (CMCase), destacando-se como a linhagem mais promissora. No planejamento fatorial os resultados demonstraram que a umidade e a glicose têm uma influência significativa na atividade enzimática. Os resultados obtidos indicam o potencial do bagaço de malte como matéria-prima para a produção de enzimas industriais, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais.

Introdução

A cerveja é uma das bebidas alcoólicas obtidas pela fermentação de cereais, como trigo, centeio, cevada, entre outros. Teve seu marco inicial na região da Mesopotâmia, onde ganhou seu maior destaque no Império Romano. No Brasil, a cerveja chegou com os colonizadores europeus e se tornou uma das bebidas mais populares, contribuindo bastante significativamente para a economia nacional (Barreira, 2022). Hoje o Brasil é o terceiro maior produtor do mundo, sendo 1847 cervejarias registradas em toda região. O Sudeste tem se destacado como o maior produtor com cerca 46,3% do total de cervejaria do Brasil e em seguida o Sul com 39,6% (Brasil, 2024). Além disso, a produção de cerveja gera grandes quantidades de resíduos, e suas destinações incorretas podem ter impactos ambientais significativos se não forem devidamente tratados (Figueiredo, 2023). O bagaço de malte é um dos resíduos gerado pelas indústrias cervejeiras, provém do processo de obtenção do mosto. Segundo Allegretti et al (2022), estima-se que a cada 100 litros de cerveja produzida, são gerados aproximadamente cerca de 14-20 kg de bagaço do malte, o que evidencia a necessidade de desenvolver alternativas viáveis para seu reaproveitamento.

No entanto, medidas de mitigação são utilizadas para transformar esse resíduo e evitar impactos no meio ambiente, com a criação de novas tecnologias, a conversão do bagaço de malte em biochar, biogás e bioetanol vem sendo estudada para produção de materiais de maior valor agregado, contribuindo para a economia circular e sustentável das empresas cervejeiro (Silva et al.,2024). Entretanto, além dessas aplicações, o bagaço de malte também se destaca como um substrato promissor para processos biotecnológicos, permitindo a produção de enzimas industriais (celulases, amilases, proteases) e obtenção de bioprodutos (probióticos, bioplásticos, biossurfactantes) entre outras aplicações (Paligundla; Mok, 2021). Nesse contexto, resíduos lignocelulósicos, como o bagaço de malte, despertam grande interesse para aproveitamento energético. Esses resíduos são caracterizados por sua abundância, baixo custo e origem renovável, o que os torna alternativas viáveis e sustentáveis (Gueri et al., 2021). O bagaço de malte, por sua composição rica em celulose, hemicelulose e lignina (Neta, 2021), permite sua utilização em diferentes processos biotecnológicos. Microrganismos, como fungos filamentosos do gênero *Aspergillus*, são capazes de degradar a lignocelulose ao secretar enzimas hidrolíticas.

As celulases são enzimas que pertencem a famílias das hidrolases glicosídicas, sendo estas agrupadas atualmente em 87 famílias (Henrissat et al., 1993), além de serem responsáveis pela degradação da celulose em açúcar simples. Conforme Lynd et al. (2002), classificam as celulases em três grandes grupos: endoglucanases, exoglucanases, β-glicosidases. As endoglucanases iniciam a hidrólise cortando a estrutura da celulose, descobrindo as extremidades redutoras e não redutoras, enquanto as exoglucanases atuam em ambas as extremidades para liberar celo-oligossacarídeos e unidades de celobiose. Posteriormente, as β-glicosidases cortam a celobiose para liberar moléculas de glicose. Além disso, durante a reação de hidrólise, as endoglucanases atuam na região amorfa, que é a porção mais solúvel da estrutura da celulose; enquanto isso, as celobiohidrolases clivam as ligações β−1,4-glicosídicas das extremidades da cadeia (Srivastava et al., 2018).

Para a obtenção dessas enzimas, diferentes métodos fermentativos podem ser empregados, entre eles estão fermentação em estado sólido (FES), quanto submersa (FS). A FES ocorre na superfície em substrato sólido, na ausência ou quase ausência de água livre (Pandey et al., 2000). Na FS os microrganismos são cultivados em meio líquido e com os nutrientes dissolvidos, sendo o mais utilizado pelas indústrias. Segundo Holker et al. (2004), cerca de 90% de todas as enzimas industriais são produzidas por Fermentação Submersa. Além disso, novos métodos, como a fermentação sequencial (FSeq), têm sido desenvolvidos como alternativa para otimizar a produção enzimática, esse processo se inicia com pré-cultivo no estado sólido, seguido pela continuação do crescimento na fermentação em estado submersa (Alves et al., 2020). Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo produzir celulases fúngicas a partir da fermentação sequencial do bagaço de malte, utilizando Aspergillus sp., visando à otimização da produção enzimática.

Material e Métodos

Obtenção e Caracterização físico-química do Bagaço de malte

As amostras de bagaço de malte foram obtidas de uma indústria de cerveja de grande porte, localizada no município de Igarassu, litoral norte do estado de Pernambuco, situada na Região Metropolitana do Recife, a cerca de 30 km da capital pernambucana. Para a caracterização, as amostras de bagaço de malte bruto (Figura 1) foram secas em estufa TE-393/80L a 65°C até a estabilização da umidade. Em seguida, o material foi triturado em moinho de facas TE-650 tipo Wiley, homogeneizado, peneirado (peneira mesh 10 e 32) e armazenado em temperatura ambiente (26±5°C).



Figura 1. Amostra do bagaço de malte antes de ser seco em estufa.
Fonte: O autor (2025)

O bagaço de malte bruto foi caracterizado quanto aos seguintes parâmetros: pH conforme NBR 10006 (ABNT, 2004), umidade, série de sólidos (totais, fixos, voláteis), condutividade elétrica (CE) (WHO, 1978), análise de fibras (lignina, hemicelulose e celulose), conforme Van Soest (1994. A maioria das análises foi realizada em triplicata, como evidenciado na Tabela 1. Além disso, será determinado o grau de biodegradabilidade do material antes e após a fermentação sequencial (Bareither et al., 2012).

Parâmetro	Método de Análise	Referência
pH	NBR 10006	ABNT, 2004
Umidade (%)	Gravimetria	APWA; AWWA; WPCF (2005)
Sólidos Totais (%)	Secagem em estufa a 105°C	APWA; AWWA; WPCF (2005)
Sólidos Fixos (%)	Calcinação a 550°C	APWA; AWWA; WPCF (2005)
Sólidos Voláteis (%)	Diferença entre ST e SF	APWA; AWWA; WPCF (2005)
Condutividade Elétrica (CE) mS/cm	Eletrocondutivímetro	WHO, 1978
Lignina (%) Hemicelulose (%) Celulose (%)	Método de Van Soest	Van Soest, 1994
Grau de Biodegradabilidade (%)	Antes e após fermentação sequencial	Bareither et al., 2012

Tabela 1. Parâmetros para a caracterização do bagaço de malte.
Fonte: O autor (2025)

Produção de celulases a partir do bagaço de malte

Obtenção dos micro-organismos

Para garantir uma escolha apropriada, foram selecionados quatro fungos: *Aspergillus japonicus* URM5242, *Aspergillus niger* URM5741, *Aspergillus terreus* URM4658 e *Aspergillus heteromorphus* URM0269. Tais fungos são oriundos da coleção de culturas Micoteca URM da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O meio de cultura utilizado para a manutenção das linhagens dos micro-organismos, repicadas a cada trinta dias, foi o Ágar Extrato de Malte. O meio de cultura utilizado para esporulação das culturas foi o *Czapek* (contendo 2,0 g/L de $NaNO_3$, 0,5 g/L $MgSO_4$, 0,5 g/L KCl, 0,01 $FeSO_4$, 1,0 g/L K_2HPO_4, 10 g/L de glicose, 10g/L de ágar) (Klich, 2002). A esterilização dos meios de cultura foi realizada em autoclave a 121ºC, 1 atm de pressão, durante 20 minutos.

As espécies selecionadas como produtoras de celulases foram repicadas em *Erlenmeyers* contendo meio de cultura *Czapek* incubados a 30ºC em estufa por 7 dias até ocorrer esporulação. Os esporos foram coletados com a adição de 10 mL de solução de NaCl (0,9% p/v) e *Tween* 80 (0,01% v/v), previamente esterilizados. Após a coleta dos esporos, foi realizada a contagem microscópica em câmara de Neubauer. Uma quantidade suficiente para a concentração final de 10^5 e 10^7 esporos/mL será inoculada nos *Erlenmeyers* contendo o substrato.

Produção de celulases por Fermentação em Estado Sólido (FES)

Foram realizados testes preliminares, utilizando fermentação em estado sólido (FES) e submersa (FS) para observar qual dos fungos tem maior atividade enzimática e assim utilizá-lo na fermentação sequencial.

Na FES, os ensaios foram conduzidos em frascos Erlenmeyer de 125 mL contendo 3 g de substrato, preparados em triplicata. Durante a etapa de cultivo da FES, o teor de umidade foi ajustado para 70% através da adição do meio nutriente enriquecido com 10 g/L de glicose. Foi adicionado um volume de suspensão de esporos resultando em uma concentração de 10^7 esporos por grama de substrato seco, com o cultivo sendo mantido com FES sob condições estáticas por 72h a 30°C. Para a extração da enzima foi adicionado 7,5 mL de tampão citrato 0,1 M pH 5,0 por grama de material fermentado seguido de homogeneização em agitador por 90 minutos a 120 rpm. O fermentado foi filtrado utilizando gazes e centrifugado por 5 minutos a 4000 rpm.

Produção de celulases por Fermentação Submersa (FS)

Para o processo de FS foi utilizada uma concentração de esporos de 10^5 e 40 mL de solução nutritiva por grama de substrato. O processo fermentativo ocorreu em 72 horas em incubadora (Shaker Tecnal, modelo TE-424) em frascos *Erlenmeyer* de 250 mL sob agitação de 120 rpm a 30°C, após o fermentado foi filtrado utilizando gaze.

Produção de celulases por Fermentação Sequencial (FSq)

A FSq foi conduzida a partir da seleção prévia do fungo *Aspergillus japonicus* URM5242, escolhido com base na produção de celulolitica entre os diferentes fungos testados e processos fermentativas avaliados.

A FSq foi realizada inicialmente pelo crescimento do fungo *Aspergillus japonicus* URM5242, em FES durante 24 horas. Em seguida, o processo continuou como FS, com a adição do meio de cultura líquido ao substrato (bagaço de malte) por um período de 48 horas. Durante a etapa de cultivo da FES, o teor de umidade foi ajustado para 70% através da adição do meio nutriente enriquecido com 10 g/L de glicose em frasco Erlenmeyer de 250 mL contendo 3g do substrato. A suspensão de esporos foi adicionada para obter uma concentração de 10^7 esporos por grama de substrato seco, e o cultivo foi mantido em FES sob condições estáticas por 24 horas a 30°C. Para a FS, um volume de solução nutriente com a mesma composição descrita anteriormente foi adicionado, seguindo 40 ml de meio nutriente por grama de FES, os fracos foram mantidos em incubadora orbital (Shaker Tecnal, modelo TE-424) por 48 horas a 30°C, com agitação contínua a 120 rpm. Após este tempo, o fermentado foi filtrado. O sobrenadante foi denominado extrato enzimático bruto e assim armazenado sob congelamento (-20ºC).

Planejamento Fatorial 2^2

Para definir as condições mais adequadas de FSq para a produção de celulases fúngicas, foi elaborado um planejamento fatorial 2^2. Nesse delineamento, as variáveis investigadas foram à Umidade (40, 50, 60%) e à concentração de Glicose (10, 15, 20g/L) na solução nutriente. No total, foram realizados 8 Ensaios, sendo quatro experimentos correspondentes às diferentes combinações dos níveis dos fatores avaliados e quatro ensaios no ponto central, com o intuito de estimar a variabilidade experimental e conferir maior robustez estatística à análise, em conformidade com a metodologia de FSq empregada.

Determinação da Atividade Celulolítica

A atividade de celulase total foi determinada em papel (FPase) e endoglucanase (CMcase) de acordo com Ghose (1987). Para determinação da atividade de celulase total (FPase), foi utilizado como substrato o papel de filtro (Whatmann° 1), cortado em tiras de 1 x 6 cm (50 mg). O substrato foi colocado enrolado em tubos de ensaio, onde foi adicionado 0,5 mL de tampão citrato 0,1 M (pH, 5) e 0,5 mL do extrato enzimático. A reação enzimática ocorreu a 50ºC, durante 60 min. Posteriormente, a quantidade de glicose liberada foi determinada pela reação com ácido dinitrosalicílico (DNSA), conforme Miller (1959).

Para determinação da atividade de endoglucanase (CMCase), foi utilizado como substrato a carboximetilcelulose sódica a 1%, em tampão citrato 0,1 M (pH 5). O substrato (0,5 mL) foi colocado em tubos de ensaio, com posterior adição de 0,5 mL enzimático. A reação enzimática ocorreu a 50ºC, durante 30 min. Em seguida, a quantidade de glicose liberada foi dosada, também pela reação com DNSA. Em ambas as atividades foram utilizados controles da reação colorimétrica (branco da enzima) e do substrato (branco da reação). As absorbâncias foram convertidas em glicose, mediante reta padrão previamente estabelecida. Uma unidade internacional (UI) equivalente a 1 µmol de glicose liberada por min. A quantificação da atividade foi realizada através da leitura em espectrofotômetro a 540 nm de absorbância.

Análise dos dados

Os resultados da atividade enzimática foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, com um nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$), utilizando o software OriginPro© (2021), garantindo uma avaliação estatística precisa dos dados obtidos.

Análise Estatística

A utilização do software Statistica permitiu a realização da análise estatística dos resultados obtidos por meio do planejamento fatorial 2^2, possibilitando a construção de gráficos do tipo Pareto.

Resultados e Discussão

A caracterização Físico-química do Bagaço de malte

Conforme a apresenta a Tabela 2 os resultados da caracterização físico-química do bagaço de malte em termos pH, umidade, condutividade Elétrica, ST, STF, STV, teor de fibras (lignina, hemicelulose e celulose) e grau de biodegradabilidade (Celulose (C)+Hemicelulose(H))/Lignina(L)) do substrato.

Parâmetro		Bagaço de malte
pH		4,54
Umidade (%)		75,22±1,04
Condutividade Elétrica (µs/cm)		2,53
Série de Sólidos (%)	Totais (ST)	100
	Fixos (STF)	4,32±0,03
	Voláteis (STV)	95,68±0,03
Fibras (%)	Celulose (C)	16,49±8,95
	Hemicelulose (H)	27,83±9,72
	Lignina (L)	8,49± 3,37
Grau de Biodegradabilidade (C+H)/L		5,2

Tabela 2. Caracterização físico-química do bagaço de malte
Fonte: O autor (2025)

O bagaço de malte apresentou teor de umidade elevado (75,22%), típico de resíduos úmidos provenientes da indústria cervejeira. De acordo com Ascheri et. al., (2007), o bagaço de malte caracteriza-se por ter alto teor de umidade 86% (b.u.). Esse alto teor de água favorece a atividade microbiana, mas pode resultar em outros fatores limitantes no armazenamento e transporte, devido à suscetibilidade à fermentação espontânea. O pH de 4,54 indica uma acidez moderada, compatível com resíduos fermentáveis.

Outra característica é a condutividade elétrica, que revela uma baixa concentração de sais solúveis, pois o resultado foi mínimo, 2,53 µS/cm. Em relação aos sólidos totais (ST), verificou-se uma predominância de sólidos voláteis (STV), representando 95,68%, enquanto os sólidos fixos (STF) corresponderam a apenas 4,32%. Esse resultado indica que o substrato é rico em matéria orgânica, altamente biodegradável e favorável à conversão em produtos como biogás. A análise das fibras revelou teores de celulose (16,49±8,95), hemicelulose (27,83±9,72) e lignina (8,49±3,37). A proporção relativamente baixa de lignina é vantajosa, facilitando a degradação microbiana . A relação (C + H)/L resultou em um grau de biodegradabilidade de 5,2, valor considerado elevado.

Produção das Enzimas celulolíticas através da Fermentação em estado sólido (FES) e submersa (FS)

Os dados referentes à atividade enzimática na produção de celulase por fungos, utilizando FES e FS, são apresentados na Tabela 3. Os experimentos foram feitos com bagaço de malte como substrato e quatro fungos do gênero *Aspergillus.*

Microrganismo	Fermentação	Atividade CMCase (U/mL)	Atividade FPase (U/mL)
Aspergillus japonicus URM5242	FS	0,003^{c} ±0,01	**0,152^{a} ±0,07**
	FES	0,239^{a}±0,02	**0,392^{a}±0,06**
Aspergillus terreus URM4658	FS	**0,360^{a}±0,02**	0,022^{b} ±0,06
	FES	**0,293^{a} ±0,02**	0,123^{c}± 0,01
Aspergillus niger URM5741	FS	0,094^{b} ±0,06	0,00^{c} ±0,00
	FES	0,272^{a}±0,03	0,069^{d}±0,01
Aspergillus heteromorphus URM0269	FS	0,00^{c} ±0,00	0,00^{c} ±0,00
	FES	0,124^{b}±0,02	0,276^{b}±0,02

Letras distintas sobrescritas na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, conforme o teste de Tukey (p≤0,05)

Tabela 3. Relação da produção das atividades enzimáticas.
Fonte: O autor (2025)

A análise comparativa das atividades enzimáticas revelou que *Aspergillus japonicus*, cultivado em FES, é o microrganismo mais promissor para aplicação no pré-tratamento de bagaço de malte visando à produção de biogás. Apresentando a maior atividade FPase (0,392±0,06 UI/mL) e uma boa atividade CMCase (0,239±0,02 UI/ml), esse fungo possui alto potencial na degradação da celulose presente no resíduo. Estudos como o de Ribeiro et al. (2024) demonstram que resíduos agroindustriais, como o bagaço de malte, podem ser fontes eficientes para a produção de enzimas celulolíticas por *Aspergillus* sp., reforçando a viabilidade biotecnológica deste processo.

Estudos anteriores corroboram o potencial de *A. japonicus* na produção de enzimas celulolíticas. No estudo intitulado "Cellulase production to obtain biogas from passion fruit (*Passiflora edulis*) peel waste hydrolysate", Da Silva et al. (2019) demonstraram que a FS foi eficaz para a produção de celulases a partir de *A. japonicus* URM5620, utilizando casca de maracujá como substrato. Nesse trabalho, a combinação de 3% de substrato e 1% de glicose resultou em atividades enzimáticas de 1,2 U/mL para FPase e 1,7 U/mL para CMCase. De forma semelhante, Alves et al., (2020) investigaram a produção de celulases por *A. japonicus* URM5620 utilizando bagaço de cana-de-açúcar como substrato, observando atividades significativas de endoglucanase e FPase em diferentes processos fermentativos. Esses resultados destacam a capacidade do fungo de degradar biomassa lignocelulósica, similar ao bagaço de malte, contribuindo para a liberação de açúcares fermentáveis. O segundo melhor desempenho foi obtido com *Aspergillus terreus*. Em FES, esse fungo apresentou atividades de CMCase (0,293 ± 0,02 U/mL) e FPase (0,123 ± 0,01 U/mL), sendo que a atividade de CMCase foi similar à observada para *A. japonicus*, evidenciando que ambos os microrganismos possuem capacidade comparável na produção de endoglucanases nesse sistema. Contudo, em relação a FS, o *Aspergillus terreus* apresentou a atividade enzimática máxima (atividade CMCase de 0,360 U/mL) e baixa atividade de FPase (0,029 U/mL). Shahriarinour et al. (2011) obtiveram uma FPase de 0,69 U/mL e uma CMCase de 7,41 U/mL para *A. terreus*, usando peptona como fonte de nitrogênio no meio mínimo e usando celulose como fonte de carbono em FS.

Planejamento Fatorial Completo 2^2

No planejamento mostrado na Tabela 4 são apresentados os valores de atividade enzimática da CMCase obtidos sob diferentes condições de Umidade (%) e Concentração de Glicose (g/L). No entanto, os valores da produção de enzima FPase ficaram negativos, demonstrando uma baixa atividade, assim limitando a detecção do método.

Ensaio	Condição		Atividade de CMCase (UI/ml)
	Umidade (%)	Glicose (g/L)	
1	40%	10	0,291
2	60%	10	**0,313**
3	40%	20	0,224
4	60%	20	0,190
5	50%	15	0,196
6	50%	15	0,288
7	50%	15	0,150
8	50%	15	0,288

Tabela 4. Resultados da produção de celulases utilizando planejamento fatorial 2^2.
Fonte: O autor (2025)

Dentre os ensaios realizados, observou-se que a maior atividade foi registrada no Ensaio 2, com valor de 0,313 U/mL, correspondente à condição de 60% de umidade, 3g de substrato e 10 g/L de glicose. Esse resultado indica que a combinação de umidade superior com menor concentração de glicose foi mais favorável para a produção enzimática, como mostrado na Figura 2.

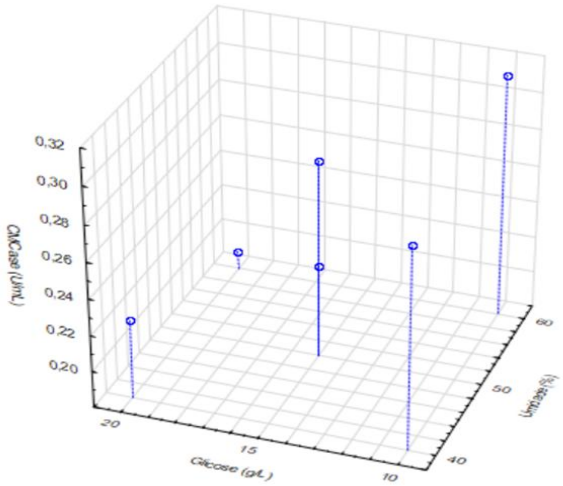


Figura 2. Influência da glicose (g/L) e da umidade (%) na produção da enzima CMCase.
Fonte: O autor (2025)

A análise comparativa mostra que, quando a concentração de glicose foi elevada para 20 g/L, a atividade enzimática apresentou queda significativa (0,224 U/mL em 40% de umidade e 0,190 U/mL em 60% de umidade), sugerindo um possível efeito inibitório da glicose em maiores concentrações. Além disso, valores de umidade inferiores (40%) ou intermediários (50%) não superaram o desempenho observado em 60%, ainda que tenham resultado em atividades relativamente próximas (0,291 e 0,288 U/mL, respectivamente).

A análise dos efeitos estimados encontra-se representada no diagrama de Pareto (Figura 3), mostrando dois fatores trabalhados no planejamento.

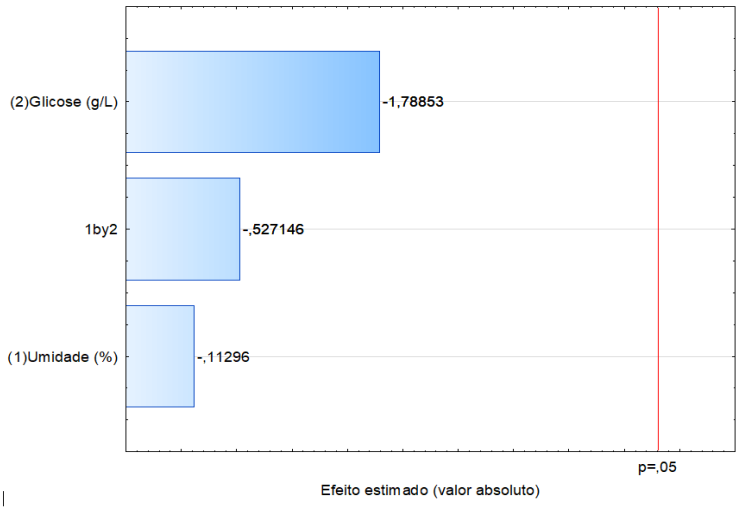


Figura 3. Gráfico de Pareto dos principais fatores utilizados no planejamento fatorial completo.
Fonte: O autor (2025)

O gráfico de Pareto destacou que nenhum fator avaliado foi significativo. A concentração de glicose, apresentada nesse resultado, dentro da faixa de níveis testada, mostrou que o aumento da concentração de glicose não favoreceu a atividade enzimática. Este comportamento é consistente com o fenômeno de repressão catabólica, no qual a glicose, por ser uma fonte de carbono preferencial, inibe a síntese de enzimas hidrolíticas como as celulases. Esse efeito também foi observado por Ma et al., (2022), que verificaram que quando a concentração de glicose no sistema de hidrólise enzimática do *Aspergillus niger* atingiu 30 g/L , a energia de ativação da desnaturação foi 10,69% menor em relação ao grupo com 0 g/L de glicose, indicando que 30 g/L de glicose reduziu a atividade da enzima.

Para o fator umidade isolado apresentou efeito não significativo. Isso sugere que, dentro do intervalo experimental estudado, a variação da umidade não foi determinante para a atividade enzimática, podendo ser considerada um fator de menor

relevância para o processo. Além disso, nota-se que nenhum dos efeitos ultrapassou o limiar de significância estatística (p = 0,05). Isso significa que, embora se observe uma tendência prática clara da glicose como principal fator de impacto negativo, a robustez estatística dos resultados é limitada.

Considerações Finais

A caracterização físico-química do bagaço de malte demonstrou seu alto grau de biodegradabilidade ((C+H)/L = 5,2), elevado teor de matéria orgânica e umidade de 75,22%, confirmando sua aptidão como substrato lignocelulósico para processos fermentativos. Nos ensaios preliminares de FES e FS, *Aspergillus japonicus* URM5242 apresentou os melhores resultados na FES, com atividades de 0,392 U/mL (FPase) e 0,239 U/mL (CMCase), sendo, portanto, a linhagem mais promissora para continuidade do trabalho na fermentação sequencial.

O planejamento fatorial 2^2 indicou que a condição mais favorável para a produção enzimática foi a combinação de 60% de umidade e 10 g/L de glicose, resultando em atividade de 0,313 U/mL. No entanto, a análise estatística mostrou que nenhum dos fatores testados foi significativo ($p \leq 0,05$), sugerindo que outras variáveis de cultivo devem ser investigadas para otimizar o processo.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam o potencial do bagaço de malte como matéria-prima sustentável para a produção de celulases, contribuindo para o aproveitamento de resíduos agroindustriais e para o desenvolvimento de processos alinhados aos princípios da economia circular.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo suporte institucional, ao Núcleo de Biotecnologia (NUBIOTEC) pela disponibilização da infraestrutura do Laboratório de Bioprocessos e Bioprodutos e pelo apoio técnico. Agradecem, ainda, aos orientadores e colaboradores pelo suporte científico, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido.

Referências Bibliográficas

ALLEGRETTI, C.; BELLINETTO, E.; D'ARRIGO, P.; GRIFFINI, G.; MARZORATI, S.; ROSSATO, L. A. M.; RUFFINI, E.; SCHIAVI, L.; SERRA, S.; STRINI, A.; TESSARO, D.; TURRI, **S.** Towards a complete exploitation of brewers' spent grain from a circular economy perspective. **Fermentation**, v. 8, n. 4, p. 151, 2022.

ALVES, R. O.; OLIVEIRA, R. L.; SANTOS, A. F. M. S.; PORTO, T. **S.** Produção de celulases por *Aspergillus japonicus* URM5620 e *Aspergillus niger* URM5741 por diferentes processos fermentativos utilizando bagaço de cana-de-açúcar como substrato. **Revista Geama**, v. 6, n. 1, p. 44–50, 2020.

ASCHERI, D. P. R.; BURGER, M. C. de M.; MALHEIROS, L. V.; OLIVEIRA, V**. N.** Curvas de secagem e caracterização de hidrolisados de bagaço de cevada. 2007. Disponível em: https://www.abq.org.br/cbq/2007/trabalhos/10/10-380-261.htm. Acesso em: 7 abr. 2025.

BARREIRA, I. B. F. **Cervejaria industrial versus artesanal: um estudo de caso sobre o gerenciamento da água e resíduos de acordo com a P+L.** 2022. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

BRASIL. **Ministério da Agricultura e Pecuária**. Setor cervejeiro segue crescendo a cada ano, aponta anuário. 2024. Disponível em:https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/setor-cervejeiro-segue-crescendo-a-cada-ano-aponta-anuario. Acesso em: 15 mar. 2025.

FIGUEIREDO, G. S. **Análise de impactos ambientais ocasionados por resíduos de malte oriundos de uma cervejaria: um estudo de campo em uma empresa localizada no norte do Brasil**. 2023.

GUERI, M. V. D.; SCHIRMER, W. N.; TORRES, L. M. G.; FURTADO, A. C. Pré-tratamentos de resíduos lignocelulósicos visando ao aumento da geração de metano nos processos de digestão anaeróbia: uma revisão. **Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia**, v. 7, n. 3, p. 13–27, 2021.

HENRISSAT, B.; BAIROCH, A. New families in the classification of glycosyl hydrolases based on amino acid sequence similarities. **Biochemical Journal**, v. 293, p. 781–788, 1993.

LYND, L. R.; WEIMER, P. J.; VAN ZYL, W. H.; PRETORIUS, I**. S.** Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 66, p. 506–577, 2002.

MA, X.; GAO, M.; LI, Y.; WANG, Q.; SUN, X. Production of cellulase by *Aspergillus niger* through fermentation of spent mushroom substance: glucose inhibition and elimination approaches. **Process Biochemistry**, v. 122, p. 26–35, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.09.029

MATHIAS, T. R. S.; MELLO, P. P.; SERVULO, E. F. C**.** Caracterização de resíduos cervejeiros. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA**, 20., 2014, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: 2014.

NETA, M. R. A.V. **Produção de biossurfactante por *Rhodotorula* mucilaginosa em hidrolisado hemicelulósico do bagaço de malte.** 2021. Tese (Doutorado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis), Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, Sorocaba, 2021.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; MITCHELL, D**.** New developments in solid state fermentation: I – bioprocesses and products. **Process Biochemistry**, v. 35, p. 1153–1169, 2000.

PRAJAPATI, B. P.; JANI, D.; PATEL, H.; PATEL, K.; PATEL, M. Characterization of cellulase from *Aspergillus tubingensis* NKBP-55 for generation of fermentable sugars from agricultural residues. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 733–740, 2018.

PULIGUNDLA, P.; MOK, C**.** Avanços recentes na valorização biotecnológica de resíduos de cervejarias. **Food Science and Biotechnology**, v. 30, p. 341–353, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10068-021-00900-4.

RAWAT, R.; KUMAR, S.; CHADHA, B. S.; GUPTA, V. K.; SHARMA, J.; YADAV, S. K. An acidothermophilic functionally active novel GH12 family endoglucanase from *Aspergillus niger* HO: purification, characterization and molecular interaction studies. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 107, p. 103–117, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s10482-014-0308-z.

RIBEIRO, H. M.; SILVA, J. P.; COSTA, L. A.; OLIVEIRA, M. S.; FERREIRA, C. B**.** Optimization of cellulase production from agri-industrial residues by *Aspergillus terreus* NIH2624. **Processes**, v. 12, n. 10, p. 2169, 2024.

SHAHRIARINOUR, M.; RAMANAN, R. N.; ABDUL WAHAB, M. N.; MOHAMAD, R.; MUSTAFA, S.; ARIFF, A. B. Improvement of cellulase production by *Aspergillus terreus* using oil palm empty fruit bunch fiber as substrate in a stirred tank bioreactor through optimization of fermentation conditions. **Bioresources**, v. 6, n. 3, p. 2663–2675, 2011.

SILVA, A. A. S.; BOUSADA, G. M.; MAZZINI, L. F. M.; GUEZGUAN, S. M.; FREITAS, C. P. M.; MONTEIRO, K. A.; RENATO, N. S.; MOREIRA, R. P. L**.** Biochar de resíduo de malte: rumo a uma economia circular para remoção sustentável de fluoroquinolonas em sistemas aquosos. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 183, p. 106707, 2024.

SRIVASTAVA, N.; SRIVASTAVA, M.; MISHRA, P. K.; GUPTA, V. K.; MOLINA, G.; RODRIGUEZ-COUTO, S.; MANIKANTA, A.; RAMTEKE, P. W. Applications of fungal cellulases in biofuel production: advances and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2379–2386, 2018.

VAZ JÚNIOR, S. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. 21. ed. Brasília: **Embrapa Agroenergia**, 2020.

PRODUÇÃO DE CELULASES POR FERMENTAÇÃO SEQUENCIAL UTILIZANDO *Aspergillus Japonicus* URM5242 E PLANEJAMENTO FATORIAL

1Gislany Pereira de Lira, 2Sergio de França Nunes, 3Rebeca de Lima Oliveira, 4Liliana Andréa dos Santos, 5André Felipe de Melo Sales Santos, 6Tatiana Souza Porto

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: gislany.plira@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: sergio.nunes@ufrpe.br; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: rebeca.limaoliveira@ufrpe.br; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: liliana.andrea.santos@gmail.com; 5 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: andre.felipesantos@ufrpe.br; 6 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: tatiana.porto@ufrpe.br

Palavras-chave: bagaço de cana; celulose; fermentação.

Resumo

A busca por alternativas sustentáveis para o aproveitamento de resíduos agroindustriais tem impulsionado o uso da biomassa lignocelulósica na produção de biocatalisadores. Entre eles, as celulases se destacam pelo papel essencial na conversão de polímeros vegetais em açúcares fermentescíveis. As celulases são enzimas que desempenham um papel essencial ao degradar materiais à base de celulose, facilitando sua decomposição. Isso pode contribuir para diversos ciclos produtivos, sobretudo na indústria de etanol de segunda geração, e bioenergia. Diante disso, avaliou-se a produção de celulases pelo fungo *Aspergillus japonicus* URM5242 utilizando bagaço de cana-de-açúcar como substrato em fermentação sequencial (FSeq), ou seja, uma fermentação em estado sólido (FES) seguida por uma fermentação submersa–(FSm). Foi utilizado um planejamento fatorial 2^3 no qual se variaram 4 fatores para definir as melhores condições de fermentação. As maiores atividades obtidas foram 1,497 U/mL (CMCase) e 0,052 U/mL (FPase), sob 40 g/L de glicose, 30 mL de meio líquido/g de substrato e 10^8 esporos/mL, sendo a glicose e volume de meio líquido variáveis que se mostraram mais significativas. A utilização de fungo do gênero *Aspergillus* revelou-se promissora, devido à sua reconhecida capacidade de produzir celulases de forma eficiente. Os resultados reforçam o potencial do uso do bagaço de cana como substrato para produção de celulases e a necessidade de estudos de otimização para obtenção de máximas produções comerciais dessa importante enzima.

Introdução

O avanço agroindustrial e o crescimento populacional elevaram significativamente a demanda mundial por energia (Hendriks; Zeeman, 2009). Diante do esgotamento das reservas fósseis, do aumento de custos e das emissões de gases poluentes, intensificou-se a busca por fontes renováveis e ambientalmente sustentáveis.Nesse contexto, alternativas como os biocombustíveis ganham destaque, impulsionadas pelas preocupações com as mudanças climáticas (Ambaye et al., 2021). Os biocombustíveis podem ser obtidos a partir de variadas fontes, como biomassa lignocelulósica (Dussán et al., 2020), resíduos provenientes da atividade agrícola (Shahi et al., 2020), restos de alimentos descartados (Deena et al., 2022) e resíduos de gorduras de origem animal ou vegetal (He et al., 2020). Essas matérias-primas oriundas de processos de pós-processamento e pós-consumo podem ser convertidas em biocombustíveis nas formas líquida, sólida e gasosa (Dionisi et al., 2016).

A utilização e transformação da biomassa proveniente de atividades agrícolas em bioprodutos e biocombustíveis é conhecida como biorrefinaria lignocelulósica, ou biorrefinarias de segunda geração (2G) (Yadav et al., 2023). Essas biorrefinarias empregam uma ampla gama de tecnologias, abrangendo processos físicos, químicos, bioquímicos e termoquímicos (Cambero et al., 2016). O Brasil se sobressai-se no setor agroindustrial, posicionando-se como um dos maiores produtores e exportadores de commodities agrícolas, entre elas café, soja, milho e, especialmente, cana-de-açúcar (Tramontina et al., 2023). A produção de cana-de-açúcar tem apresentado uma expansão notável, motivada, sobretudo, pelo estímulo ao emprego de combustíveis mais sustentáveis, como o etanol. Essa dinâmica consolidou o setor sucroenergético brasileiro como um modelo para outras nações produtoras (Duarte, 2019).

Conforme dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2024), o Brasil ocupa o topo na produção global de cana-de-açúcar, enquanto se posiciona como o segundo maior produtor de etanol, de acordo com a International Energy Agency (IEA, 2024), perdendo apenas para os Estados Unidos. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a safra 2023/2024 de cana-de-açúcar no Brasil atingiu a marca de 713,2 milhões de toneladas, estabelecendo um novo recorde na série histórica. Esse volume representa um crescimento de 16,8% em relação ao período anterior. No processo industrial da cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro, estima-se que para cada tonelada de matéria-prima processada sejam gerados aproximadamente 280 kg de bagaço (Cavalcante et al., 2018).

A biomassa lignocelulósica é uma matéria-prima renovável composta por resíduos agroindustriais como palhas, cascas e caules, cuja estrutura é formada principalmente por celulose (35–50%), hemicelulose (20–35%) e lignina (10–25%) (Saha, 2003). A celulose, polímero natural mais abundante do planeta (Santos et al., 2012), é constituída por unidades de D-anidroglucopiranose ligadas por ligações β-1,4 (Zhang et al., 2004), conferindo elevada estabilidade estrutural

(Abraham et al., 2020). Suas microfibrilas apresentam forte interação intermolecular por ligações de hidrogênio, devido à alta concentração de grupos hidroxila (Zheng et al., 2014). Devido à recalcitrância da biomassa, são necessários pré-tratamentos físicos, químicos ou biológicos para modificar sua estrutura e aumentar a disponibilidade de açúcares fermentáveis (Zheng et al., 2014). Entre as estratégias, destacam-se os pré-tratamentos biológicos, que utilizam microrganismos ou enzimas como celulases, xilanases e lacases, capazes de degradar celulose, hemicelulose e lignina (Menezes; Barreto, 2015; Atelge et al., 2020a). Esses processos apresentam baixa toxicidade e vantagens econômicas, despertando crescente interesse (Wang et al., 2023; Sharmila et al., 2024). As celulases são enzimas hidrolíticas que atuam sinergicamente na degradação da celulose, convertendo-a em açúcares solúveis (Sharma et al., 2022). O complexo celulásico é formado por endoglucanases, exoglucanases e β-glicosidases. As endoglucanases rompem ligações nas regiões menos cristalinas da celulose, as exoglucanases liberam celobiose a partir das extremidades da cadeia e as β-glicosidases convertem a celobiose em glicose (Juturu et al., 2014; Siqueira et al., 2020). Essas enzimas são produzidas principalmente por fungos filamentosos, como *Aspergillus* spp e *Trichoderma* spp (Idris et al., 2017; Behera et al., 2017).

A produção de celulases a partir de resíduos lignocelulósicos reduz custos e agrega valor a subprodutos agroindustriais (Siqueira et al., 2020). Nos processos fermentativos, essa biomassa atua como fonte de carbono, sendo empregadas fermentação em estado sólido (FES), submersa (FSm) ou sequencial (FSeq) (Alves et al., 2020). A integração entre produção enzimática, sacarificação e fermentação permite a obtenção de hidrolisados aplicáveis na geração de biocombustíveis, como biogás por digestão anaeróbia (Da Silva et al., 2023; Silva et al., 2019). Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar a produção de celulases *Aspergillus japonicus* URM5242 utilizando bagaço de cana-de-açúcar como substrato através de fermentação sequencial (FSeq).

Material e Métodos

Caracterização físico-química

Obtenção e Padronização do substrato

O bagaço de cana-de-açúcar, foi fornecido pela Companhia Alcoolquímica S.A (Usina JB), localizada em Vitória de Santo Antão, Estado de Pernambuco. A coleta ocorreu na saída da última etapa de moenda (bagaço bruto), sendo o material acondicionado em sacos de polietileno (5 L). Para padronização, o bagaço foi seco em estufa a 65 °C por 48 h, triturado em moinho de facas (Willye, TE-650/1) e padronizado em peneira de (0,5 e 2,0 mm). O substrato seco foi caracterizado quanto à umidade, sólidos totais (ST), totais fixos (STF) e totais voláteis (STV) (WHO, 1978), além de pH e condutividade elétrica (NBR 10006 (2004), DQO (WHO, 1978) composição bioquímica (proteínas, carboidratos e lipídeos) (Santos, 2019) e composição lignocelulósica (celulose, hemicelulose e lignina) (Sengen et al., 2008).

Obtenção do Microrganismo

Foi utilizado o fungo *Aspergillus japonicus* URM5242 oriundo da coleção de culturas da Micoteca da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O meio de cultura utilizado para a manutenção das linhagens microrganismos foi o Agar Extrato de Malte e repicados a cada trinta dias. O meio de cultura utilizado para esporulação das culturas foi o Czapek (contendo 2,0 g/L de $NaNO_3$, 0,5 g/L $MgSO_4$, 0,5 g/L KCl, 0,01 $FeSO_4$, 1,0 g/L K_2HPO_4, 10 g/L de glicose, 30g/L de ágar) (Klich, 2002). A esterilização dos meios de cultura foi realizada em autoclave a 121ºC, 1 atm de pressão, durante 20 minutos. O crescimento fúngico ocorreu em incubadora (Tecnal, TE – 371) a 30°C durante sete dias. O fungo produtor de celulases foi repicado em tubos de ensaio contendo meio de cultura Czapek incubados a 30ºC em estufa por 7 dias até ocorrer esporulação.

Padronização do inóculo

Após o período de esporulação completa, os esporos foram coletados com a adição de 10 mL de solução de NaCl (0,9% p/v) e Tween 80 (0,01% v/v) previamente esterilizados. A solução salina estéril foi adicionada a frascos Erlenmeyer (250mL) contendo fungos esporulados. Após a coleta dos esporos foi realizada a contagem microscópica em câmara de Neubauer.

Realizou-se a contagem dos esporos em cinco quadrantes da malha da câmara, somando os valores de cada quadrante e multiplicando por 5. Em seguida, os resultados foram ajustados pelo fator de diluição da câmara (10^4). A partir disso, foi calculada uma quantidade suficiente para atingir a concentração final de 10^7 esporos/mL, inoculada nos Erlenmeyers contendo o substrato previamente padronizado.

Produção de enzimas por Fermentação Sequencial (FSeq)

A fermentação sequencial (FSeq) foi conduzida em frascos Erlenmeyer (250 mL) com 3 g de substrato. Inicialmente, realizou-se fermentação em estado sólido (FES), com umidade ajustada para 70% e inoculação de 10^7 e 10^8 esporos/mL por grama de substrato seco, incubados a 30 °C por 24 h em condições estáticas. Em seguida, o processo foi convertido para fermentação submersa (FSm) pela adição de 30 e 40 mL de solução nutritiva contendo (p/v): 0,14% $(NH_4)_2SO_4$; 0,20% KH_2PO_4; 0,03% $CaCl_2$; 0,02 $MgSO_4.7H_2O$; 0,50% peptona, 0,20% extrato de levedura; 0,03% ureia; 0,10% Tween 80 e 0,10% de solução salina (5 mg/L $FeSO_4$. $7H_2O$; 1,6 mg/L $MnSO_4$. H_2O; 1,4 mg/L $ZnSO_4.7$ H_2O; e 2,0 mg/L $CoCl_2$) por grama de substrato sólido, suplementada com 30 e 40 g/L de glicose. A FSm foi conduzida por 48 h a 30

°C, sob agitação de 120 rpm em incubadora orbital (Shaker Tecnal, TE-424). Após o cultivo, o extrato bruto da fração sólida e líquida foi obtido por filtração a vácuo e armazenado para análises.

Planejamento fatorial completo 2^3

Para definição das melhores condições de FSeq para a produção de celulases fúngicas, foi realizado planejamento fatorial completo 2^3 no qual se variaram os fatores, Umidade (%), Substrato (g/L) e fonte de nitrogênio (Peptona) (g/L) na solução nutriente (Tabela 1). Foram conduzidos 12 ensaios experimentais, sendo oito correspondentes às diferentes combinações entre os níveis dos fatores e quatro realizados no ponto central.

Ensaio	Fatores			Condição		
	X1	X2	X3	Umidade (%)	Substrato (g/L)	Peptona (g/L)
1	-1	-1	-1	50%	1,35 g	0 g
2	+1	-1	-1	50%	1,35 g	0 g
3	-1	+1	-1	50%	5,4 g	0,90 g
4	+1	+1	-1	50%	5,4 g	0,90 g
5	-1	-1	+1	80%	1,35 g	0 g
6	+1	-1	+1	80%	1,35 g	0 g
7	-1	+1	+1	80%	5,4 g	0,90 g
8	+1	+1	+1	80%	5,4 g	0,90 g
9	0	0	0	70%	3 g	0,45 g
10	0	0	0	70%	3 g	0,45 g
11	0	0	0	70%	3 g	0,45 g
12	0	0	0	70%	3 g	0,45 g

Tabela 1. Planejamento fatorial completo 2^3 para produção de celulases por FSeq
Fonte: Os autores (2025)

Determinação da atividade celulolítica

As atividades de celulase total (FPase) e endoglucanase (CMCase) foram determinadas segundo Ghose (1987). Para FPase, utilizou-se papel de filtro Whatman nº 1 (50 mg) como substrato. O substrato foi colocado enrolado em tubos de ensaio com 0,5 mL de tampão citrato 0,05 M (pH 4,8) e 0,5 mL de extrato enzimático a 50 ºC por 60 min. Para CMCase, empregou-se carboximetilcelulose 1% em tampão citrato 0,05 M (pH 4,8), foi colocado em tubos de ensaio com extrato enzimático a 50 ºC por 30 min. Em ambas as análises, a glicose liberada foi quantificada pelo método do ácido dinitrosalicílico (DNS), conforme Miller (1959), com leitura em espectrofotômetro a 540 nm, utilizando curva padrão de glicose. Uma unidade internacional (UI) foi definida como 1 µmol de glicose liberada por minuto, e foram utilizados brancos da enzima e do substrato

Caracterização enzimática

Para a caracterização das enzimas celulolíticas, foram analisados os efeitos do pH e da temperatura sobre a atividade enzimática. Na avaliação do pH, a solução enzimática foi misturada ao substrato (carboximetilcelulose sódica a 1%), previamente preparado em soluções tampão 0,05 M, ajustadas a diferentes faixas de pH: citrato de sódio (pH 3,0; 4,0; 5,0; 6,0) e fosfato de sódio (pH 6,0; 7,0; 8,0), mensurando a atividade das enzimas a 50ºC. Em seguida, procedeu-se à determinação da atividade enzimática.

O efeito da temperatura na atividade enzimática foi determinado a partir de reações contendo substrato e solução enzimática, incubadas por 30 minutos em diferentes temperaturas (30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C e 90°C), no respectivo pH ótimo das enzimas. Após a incubação, foi realizada a quantificação da atividade enzimática.

Resultados e Discussão

Caracterização físico-química do substrato

Os resultados da análise do bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 2) incluíram parâmetros físico-químicos como ST, STF, STV, DQO, pH, umidade, condutividade elétrica e composição bioquímica e lignocelulósica.

Parâmetro		Bagaço de cana-de-açúcar
pH		3,85
Umidade (%)		35,79±1,05
Condutividade Elétrica (mS/cm25°C)		892,3
Proteína (%)		0,53
Lipídeos (%)		11,1
Carboidrato (não lignocelulósico) (%)		0,00
Série de Sólidos (%)	Totais (ST)	100
	Fixos (STF)	2,08±0,5
	Voláteis (STV)	97,91±0,5
Fibras (%)	Celulose	39,27±2,95
	Hemicelulose	25,27±0,37
	Lignina	21,73±3,31
Grau de Biodegradabilidade (C+H)/L		2,98

Tabela 2. Caracterização do substrato bagaço de cana de açúcar.
Legenda: C=carbohidratos; H=hemicelulose e L=Lignina
Fonte: Os autores (2025)

O bagaço de cana-de-açúcar apresentou elevado teor de STV (97,91%), indicando alta fração orgânica, superior a valores reportados na literatura (~81–92%). Os sólidos fixos (STF) correspondem à fração mineral remanescente.

A composição de fibras evidenciou teores relevantes de celulose e hemicelulose, associados ao potencial de biodegradação e geração de açúcares fermentáveis, enquanto a lignina atua como barreira à degradação microbiana. Os resultados foram compatíveis com estudos anteriores, como os de Gouveia et al. (2009) e Paranhos et al. (2020), que relataram valores semelhantes de celulose, hemicelulose e lignina, evidenciando proximidade com os achados deste trabalho, embora sujeitos a variações devido a fatores industriais e ambientais. O teor de umidade (35,79%) favorece a atividade microbiana e a estabilidade do pH, enquanto a condutividade elétrica reflete a presença de sais (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Si^{4+}).

Produção de celulases

A maior atividade de CMCase (1,497 U/mL) foi obtida sob 70% de umidade, 3 g de substrato, 40 g/L de glicose, 30 mL/g de solução nutritiva e 10^8 esporos/mL. Em condição com 30 g/L de glicose, 40 mL/g de solução nutritiva e 10^7 esporos/mL, a atividade foi de 0,820 U/mL. Para FPase, a maior atividade (0,165 U/mL) ocorreu com 30 g/L de glicose, 40 mL/g de solução nutritiva e 10^7 esporos/mL, enquanto na condição com 40 g/L de glicose, 30 mL/g de solução nutritiva e 10^8 esporos/mL o valor foi de 0,052 U/mL. De modo geral, as atividades foram inferiores às relatadas por Alves et al., (2020), embora a comparação seja limitada pelas diferenças metodológicas.

Na literatura, há relatos de estudos que utilizaram o fungo *A. japonicus* para a produção de celulases a partir de substratos lignocelulósicos. Alves et al., (2020), ao investigaram a síntese de celulases fúngicas por meio de FSeq, observaram uma maior atividade de CMCase com o uso de *A. japonicus* em comparação a outros fungos. Esses resultados indicam que a aplicação de *A. japonicus* em FSeq apresenta um grande potencial para o aproveitamento para outros resíduos lignocelulósicos. Os resultados obtidos mostraram-se similares em comparação a resultados de artigos estudados.

Observou-se que o aumento da glicose e a redução do volume de meio favoreceram a produção de CMCase, corroborando estudos que indicam que menores volumes evitam diluição enzimática. A concentração de esporos não apresentou significância na estatística. O cultivo sequencial pode ter estimulado a síntese enzimática, pois a fase sólida atua como indutora inicial, favorecendo o crescimento fúngico e a produção de celulases.

Planejamento fatorial completo 2^3

Nos ensaios do planejamento fatorial completo, foram investigados os efeitos da umidade (%), da quantidade de substrato (g/L) e da concentração de peptona (g/L) na solução nutritiva, totalizando 12 experimentos, incluindo combinações fatoriais e 4 pontos centrais.

Os resultados obtidos a partir do planejamento fatorial completo para a produção de celulase por fermentação sequencial, utilizando a linhagem *Aspergillus japonicus* URM5242, são apresentados na Tabela 3. A maior atividade enzimática foi observada no ensaio 1, com atividade de CMCase de 0,256 U/mL, obtida nas condições de 50% de umidade, 1,35 g de substrato e ausência de peptona no meio líquido.

Entretanto, as atividades enzimáticas obtidas foram inferiores às previamente obtidas no experimento anterior, não atendendo às expectativas. Assim, optou-se por manter as condições anteriores de produção de celulase e complementar o estudo com a caracterização bioquímica das enzimas.

Ensaio	Condição			Atividade de CMCase (UI/ml)
	Umidade (%)	Substrato (g/L)	Peptona (g/L)	
1	50%	1,35 g	0 g	**0,256**
2	50%	1,35 g	0 g	0,193
3	50%	5,4 g	0,90 g	0,094
4	50%	5,4 g	0,90 g	0,179
5	80%	1,35 g	0 g	0,05
6	80%	1,35 g	0 g	0,182
7	80%	5,4 g	0,90 g	0,037
8	80%	5,4 g	0,90 g	0,056
9	70%	3 g	0,45 g	0,101
10	70%	3 g	0,45 g	0,137
11	70%	3 g	0,45 g	0,113
12	70%	3 g	0,45 g	0,117

Tabela 3. Resultados do Planejamento fatorial completo
Fonte: Os autores (2025)

Caracterização das enzimas celulolíticas

Temperatura ótima

A caracterização das celulases indicou 70°C como temperatura ótima, na qual foi observada 100% de atividade relativa (Figura 1), evidenciando maior eficiência catalítica em condições de temperatura elevada. Resultados semelhantes são reportados na literatura, destacando o bom desempenho de celulases fúngicas em faixas de temperatura moderadamente altas, que favorecem tanto a velocidade das reações enzimáticas quanto a maior disponibilidade do substrato.

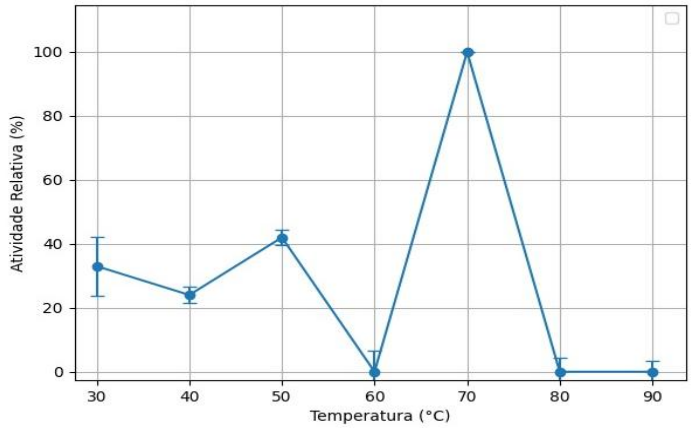


Figura 1: Caracterização das enzimas celulolíticas em relação a temperatura
Fonte: Os autores (2025)

O melhor desempenho a 70 °C pode ser explicado pelo aumento da energia cinética, que intensifica o contato enzima-substrato e acelera a reação. Estudos com celulases de *Aspergillus tubingenis* também relatam estabilidade e bom desempenho entre 50 e 70°C (Prajapati et al., 2018). Muitas celulases fúngicas apresentam termoestabilidade, mantendo atividade significativa em temperaturas moderadas a elevadas, o que favorece aplicações industriais (Alves et al., 2020). Contudo, temperaturas superiores podem causar desnaturação proteica e perda de atividade (Boondaeng et al., 2024). Assim, o ótimo em 70 °C indica boa estabilidade térmica do extrato, relevante para a hidrólise de biomassa lignocelulósica.

pH ótimo

A determinação do pH ótimo é fundamental, uma vez que valores fora dessa faixa podem reduzir significativamente ou até inativar a enzima, em decorrência de alterações nos grupos ionizáveis e na distribuição de cargas na superfície molecular (Subissay, 2022).

A caracterização da atividade celulolítica em diferentes valores de pH evidenciou que o desempenho enzimático foi favorecido na faixa de pH 4,0 a 8,0, utilizando tampões citrato e fosfato, o que indica ampla versatilidade em condições que variam de ácidas a neutras. O maior desempenho foi observado em pH 7,0 (Figura 2), empregando tampão fosfato, condição na qual a atividade atingiu seu valor máximo. Em pH neutro, ocorre um equilíbrio mais favorável das cargas superficiais da enzima e do substrato, promovendo maior eficiência na interação com o sítio ativo (Florencio et al., 2017). Adicionalmente, o tampão fosfato apresentou elevada capacidade tamponante nessa faixa de pH, contribuindo para a manutenção da estrutura da proteína e, consequentemente, para o aumento da atividade enzimática (Moreira, 2021).

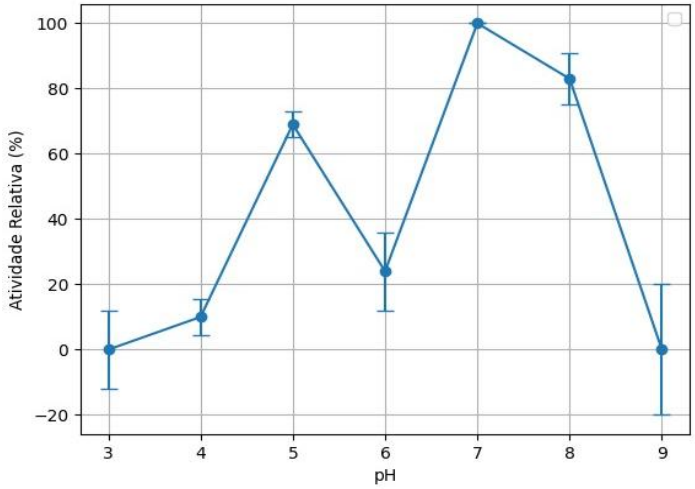


Figura 2: Caracterização das enzimas celulolíticas em relação ao pH
Fonte: Os autores (2025)

Considerações Finais

Os resultados confirmaram o potencial do bagaço de cana-de-açúcar para produção de celulases fúngicas, embora a linhagem de *Aspergillus* não tenha gerado enzimas em quantidade suficiente para avançar na otimização fermentativa.

A caracterização indicou temperatura ótima de 70°C, e atividade máxima em pH 7,0 com tampão fosfato, demonstrando desempenho satisfatório em condições neutras.

Dessa forma, o estudo reforça a viabilidade do uso de resíduos agroindustriais como substrato para obtenção de enzimas comerciais e destaca a importância da caracterização bioquímica para futuras estratégias de otimização para aplicações industriais.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo suporte institucional, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Núcleo de Biotecnologia (NUBIOTEC), assim como, à equipe do Laboratório de Bioprodutos e Bioprocessos (LBB) pelo apoio técnico, suporte e oportunidade.

Referências Bibliográficas

ABNT, NBR 10.006. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ALVES, R. O.; DE OLIVEIRA, R. L.; SANTOS, A. F. de M. S.; PORTO, T. S.; Produção de celulases por *Aspergillus japonicus* URM5620 e *Aspergillus niger* URM5741 por diferentes processos fermentativos utilizando bagaço de cana-de-açúcar como substrato. **Revista Geama**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 44–50, 2020.

AMBAYE, T G; VACCARI, M; BONILLA-PETRICIOLET, A.; Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 290, p. 112627, 2021.

BEHERA, S. S.; RAY, R. C.; Solid state fermentation for production of microbial cellulases: Recent advances and improvement strategies. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 86, p. 656- 669, 2016.

BOONDAENG, A.*;* Cellulase production under solid-state fermentation by *Aspergillus sp*. IN5: Parameter optimization and application. **Heliyon**, v. 10, n. 5, p. e26601, mar. 2024.

CAMBERO, C; SOWLATI, T; PAVEL, M.; Economic and life cycle environmental optimization of forest-based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 107, p. 218–235, 2016.

CAVALCANTE, P A W; COÊLHO, D F; SILVA, C F.; Utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de celulases por *Aspergillus niger* em fermentação em estado sólido. **Scientia Plena**, v. 14, n. 6, 2018.

Conab **- Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24** chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica.

DA SILVA, A F V; SANTOS, L A D; DE MELO, A H F.; Use of Cellulase Obtained from Solid-State Fermentation of Orange and Passion Fruit Peels as an Enzymatic Pre-treatment Step for Anaerobic Digestion. **BioEnergy Research**, 2023.

DEENA, Santhana Raj; VICKRAM, A.S.; MANIKANDAN, S.; Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques – A review. **Bioresource Technology**, v. 355, p. 127234, 2022.

DIONISI, Davide; SILVA, Igor M. O.; Production of ethanol, organic acids and hydrogen: an opportunity for mixed culture biotechnology? **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 15, n. 2, p. 213–242, 2016.

DUARTE, A; SALGADO JR, A P; LEMOS, S. V; DE SOUZA JR, M A Alves; ANTUNES, F. A.; Proposal of operating best practices that contribute to the technical efficiency in Brazilian sugar and ethanol mills. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 173-184, 2019.

DUSSÁN, K. J.; JUSTO, O. R; PEREZ, V. H.; Bioethanol Production From Sugarcane Bagasse Hemicellulose Hydrolysate by Immobilized S. shehatae in a Fluidized Bed Fermenter Under Magnetic Field. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 2, p. 338–346, 2019.

FLORENCIO, C; BADINO, A. C.; FARINAS, C. S.; Current challenges on the production and use of cellulolytic enzymes in the hydrolysis of lignocellulosic biomass. **Química Nova**, 4 ago. 2017

GOUVEIA, E. R.; NASCIMENTO, R. T. D.; SOUTO-MAIOR, A. M.;. Validação de metodologia para a caracterização química de bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1500–1503, 2009.

GHOSE, T.K.; Measurement of cellulase activities. **Pure and Applied Chemistry**, v. 59, n. 2, p. 257-268.

IDRIS, A. S. O.; Cellulase production through solid-state tray fermentation, and its use for bioethanol from sorghum stover. **Bioresource Technology**,v. 242, p. 265–271, 2017.

JUTURU, V; WU, J C.; Microbial cellulases: Engineering, production and applications. **Renewable and Sustainable Energy** Reviews, v. 33, p. 188–203, 2014.

KLICH, M. A. **Identification of common Aspergillus species**. Centraalbureau vöör Schimmelcultures, 116p. 2002.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 1, p. 10-18, 2009.

HE, Y; ZHANG, B; GUO, S. Sustainable biodiesel production from the green microalgae Nannochloropsis: Novel integrated processes from cultivation to enzyme-assisted extraction and ethanolysis of lipids. **Energy Conversion and Management**, v. 209, p. 112618, 2020.

MENEZES, C. R., & Barreto, A. R. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos por fungos basidiomicetos: Caracterização dos resíduos e estudo do complexo enzimático fúngico. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, pp. 1366-1367, 2015.

MILLER, G. L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426–428, 1959.

MOREIRA, O; CASTRO, L; OLIVEIRA, M. Cálculo e preparo de soluções tampão: guia completo usando o software peakmaster®. **Química Nova**, 2021.

PARANHOS, A. G. D. O.; ADARME, O. F. H.; BARRETO, G. F.;. Methane production by co-digestion of poultry manure and lignocellulosic biomass: Kinetic and energy assessment. **Bioresource Technology**, v. 300, p. 122588, 2020.

PRAJAPATI, B. P.; Characterization of cellulase from *Aspergillus tubingensis* NKBP-55 for generation of fermentable sugars from agricultural residues. **Bioresource Technolog** y, v. 250, p. 733-740, 1 fev. 2018

SAHA, B C.; Hemicellulose bioconversion. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 30, n. 5, p. 279–291, 2003.

SANTOS, F. A.; Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.

SILVA, A.F.V.; SANTOS, L.A.; VALENÇA, R.B.; Cellulase production to obtain biogas from passion fruit (Passiflora edulis) peel waste hydrolysate. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 103510, 2019.

SIQUEIRA, J. G. W; RODRIGUES, C; VANDENBERGHE, L. P. S.; Current advances in on-site cellulase production and application on lignocellulosic biomass conversion to biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 132, p. 105419, 2020.

SHARMA, G; KAUR, B; RAHEJA, Y.; Lignocellulolytic enzymes from *Aspergillus allahabadii* for efficient bioconversion of rice straw into fermentable sugars and biogas. **Bioresource Technology**, v. 360, p. 127507, 2022.

SHAHI, T; BEHESHTI, B; ZENOUZI, A.; Bio-oil production from residual biomass of microalgae after lipid extraction: The case of *Dunaliella sp*. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 23, p. 101494, 2020.

SHARMILA, V. G; SHANMUGAVEL, S P; BANU, J. R.; A review on emerging technologies and machine learning approaches for sustainable production of biofuel from biomass waste. **Biomass and Bioenergy**, v. 180, p. 106997, 2024.

Subissay, H K.; Determinação de temperatura ótima e ph ótimo das celulases produzidas por *penicillium sp*. **FSDE** 15, 2022.

TRAMONTINA, R; SCOPEL, E; BRENELLI, L.; Applying biorefinery concepts for sugarcane straw upcycling using alkaline and enzymatic treatments to produce value-added compounds and bioenergy. **Biomass and Bioenergy**, v. 178, p. 106972, 2023.

WANG, J; MA, D; LOU, Y.; Optimization of biogas production from straw wastes by different pretreatments: Progress, challenges, and prospects. **Science of The Total Environment**, v. 905, p. 166992, 2023.

WHO (1978). International reference center for waste disposal. **Methods of Analysis of sew-age sludge solid wastes compost Switzerland.**

YADAV, A; SHARMA, V; TSAI, M-L.; Development of lignocellulosic biorefineries for the sustainable production of biofuels: Towards circular bioeconomy. **Bioresource Technology**, v. 381, p. 129145, 2023.

ZHANG, Y-H P; LYND, L R.; Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Noncomplexed cellulase systems. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 88, n. 7, p. 797–824, 2004.

ZHENG, Y; ZHAO, J; XU, F.; Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 42, p. 35–53, 2014.

APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA A PREDIÇÃO DA ADSORÇÃO DO CORANTE RODAMINA B POR MESOCARPO DO COCO DO BABAÇU

1 Anna Julya de Alexandria Pereira, 2 Ana Julia de Almeida Moreno, 3 Eduardo Beraldo de Morais
[1]Universidade Federal de Mato Grosso, anna.pereira@sou.ufmt.br; [2]Universidade Federal de Mato Grosso, ana.moreno1@sou.ufmt.br; [3]Universidade Federal de Mato Grosso, eduardo.moraes@ufmt.br.

Palavras-chave: Aprendizado de máquina; Adsorção; Rodamina B.

Resumo

A permanência de corante rodamina B em águas residuais impacta de maneira retilínea o sistema ecológico inerente, sendo substancial implementar medidas de mitigação deste agente pigmentante amplamente empregado no setor industrial, por ter natureza tóxica e carcinogênica, e ser prejudical à fotossíntese aquática. Este trabalho teve como objetivo aplicar ANN (redes neurais artificiais) e SVR (máquinas de vetores de suporte para regressão) na previsão da adsorção do corante rodamina B pelo mesocarpo do coco babaçu. A metodologia consistiu em experimentos laboratoriais de adsorção realizados em triplicata, com a subsequente utilização do software TIBCO Statistica 14.0 (TIBCO Software Inc.) para construir os modelos de ANN e SVR. Os resultados indicaram que o mesocarpo do coco babaçu pode ser utilizado como adsorvente para a remoção do corante rodamina B de soluções aquosas, o que poderá reduzir a necessidade de experimentos extensivos. Ambos os modelos apresentaram excelente desempenho preditivo, com R^2 acima de 0,99 e baixos erros quadráticos médios (RMSE). Os dados obtidos reforçam o potencial de combinar adsorventes naturais com aprendizado de máquina para soluções inovadoras e sustentáveis no tratamento de efluentes, aprimorando e sucedendo os tratamentos convencionais que se mostram insuficientes para efluentes com aspectos recalcitrantes.

Introdução

Os corantes são essenciais na indústria, proporcionando cores e propriedades estéticas aos produtos. Contudo, devido à sua estabilidade química, frequentemente resistem aos tratamentos convencionais de águas residuais. Quando descartados inadequadamente em um corpo hídrico, causam impactos ambientais, como redução da penetração da luz, afetando a fotossíntese aquática, e liberação de subprodutos tóxicos, comprometendo ecossistemas e a qualidade da água (Nascimento et al. 2024). Assim, a remoção eficiente de corantes têxteis é uma prioridade ambiental e tecnológica.

As técnicas de tratamento de efluentes com corantes incluem processos físico-químicos, biológicos e combinados, como coagulação-floculação, oxidação avançada, biorremediação e adsorção (Solayman et al. 2023). A adsorção destaca-se por sua eficiência, simplicidade e baixo custo. Baseia-se na interação entre os contaminantes e um adsorvente natural, sintético ou residual. Suas vantagens incluem ampla remoção de poluentes, ausência de subprodutos tóxicos, regeneração e reutilização do adsorvente, especialmente quando materiais residuais, como o mesocarpo do coco babaçu, são usados (Al-Gheethi et al. 2022).

O processo de adsorção é influenciado por diversos fatores ambientais, como pH, temperatura, concentração inicial do contaminante, tempo de contato e características do adsorvente, incluindo área superficial e grupos funcionais presentes na sua estrutura (Solayman et al. 2023). A compreensão detalhada desses fatores é primordial para otimizar o processo e alcançar elevados níveis de remoção. No entanto, a condução de experimentos laboratoriais para estudar cada variável e suas interações pode ser trabalhosa, dispendiosa e demorada (Khan et al. 2023). Nesse contexto, modelos de aprendizado de máquina surgem como uma alternativa eficiente para superar essas limitações, permitindo a predição e otimização do processo de adsorção com base em conjuntos de dados experimentais. Modelos como redes neurais artificiais (ANN) e máquinas de vetores de suporte (SVR) destacam-se por sua capacidade de lidar com problemas não lineares e complexos, fornecendo predições precisas e insights sobre o comportamento do sistema de adsorção, mesmo em cenários com múltiplas variáveis e interdependências (Nascimento et al. 2024).

A rodamina B é um corante catiônico pertencente à classe dos xantenos, caracterizado por elevada solubilidade em água e intensa emissão de fluorescência, propriedades que ampliam suas aplicações analíticas e industriais (Morais et al. 2022). Em razão dessas características, esse corante é amplamente utilizado em procedimentos laboratoriais, como marcação biomolecular, visualização celular e rastreamento microbiológico (Rosa et al. 2018). No setor industrial, destaca-se sua aplicação nas indústrias têxtil, de plásticos e de cosméticos (Golin et al. 2022). Entretanto, a rodamina B apresenta reconhecido potencial tóxico, com relatos de efeitos mutagênicos e carcinogênicos, tornando sua presença em efluentes aquosos motivo de preocupação ambiental e sanitária. Além disso, sua estabilidade química e elevada solubilidade dificultam os processos convencionais de remoção, o que tem impulsionado o desenvolvimento de métodos alternativos, especialmente técnicas de adsorção, para sua eliminação de sistemas aquosos (Santos et al. 2025).

Este trabalho visa aplicar ANN e SVR para prever a adsorção do corante rodamina B pelo mesocarpo do coco babaçu. Essa abordagem une a eficiência do mesocarpo como adsorvente sustentável ao poder preditivo dos modelos de aprendizado de máquina, reduzindo experimentos extensivos, economizando recursos e fornecendo insights valiosos. Este estudo representa um avanço em tecnologias inovadoras e sustentáveis para o tratamento de efluentes, contribuindo para a preservação ambiental.

Material e métodos

Reagentes e adsorvente

Rodamina B (RhB) ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$, peso molecular: 479,01 g mol^{-1}) foi adquirida de Synth – Brasil. Uma solução estoque (1,0 g L^{-1}) foi preparada dissolvendo o corante em água destilada, e esta foi diluída para obter as soluções experimentais de 20 a 200 mg L^{-1}. Quando necessário o pH da solução de corante foi ajustado com HCl 0,1 M e NaOH 0,1 M.

Frutos do babaçu foram coletados em Santo Antônio do Leverger, Mato Grosso. O mesocarpo foi cortado, lavado com água destilada para remover impurezas, seco a 80 °C por 48 horas, triturado em pó fino (<149 μm) e armazenado em dessecadores até o momento de uso.

Experimentos de adsorção

Os experimentos de adsorção foram realizados em frascos Erlenmeyer de 150 mL contendo 50 mL de soluções aquosas de RhB. Os frascos foram agitados em uma incubadora a 150 rpm. A influência dos parâmetros pH (2, 4, 6, 8 e 10), concentração inicial de RhB (20, 50, 100, 150, 200 mg L^{-1}), dosagem de adsorvente (0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 g L^{-1}) e temperatura (20, 30 e 40 °C) foi avaliada. Todos os experimentos de adsorção foram realizados em triplicata. A concentração residual de RhB na solução foi determinada utilizando um espectrofotômetro UV–Vis (Hach DR6000, λmáx = 554 nm) após a remoção do adsorvente por filtração.

A quantidade de RhB adsorvida pelo adsorvente, q_e (mg g^{-1}) foi calculada usando a Equação (01):

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{B} \qquad (01)$$

Onde: C_0 e C_t são as concentrações inicial e no tempo t de RhB (mg L^{-1}) e B é a concentração de adsorvente na solução (g L^{-1}).

Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (ANN, do inglês *Artificial Neural Networks*) são modelos computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano, compostos por camadas de neurônios artificiais interconectados (Nascimento et al. 2024). Esses neurônios processam informações em múltiplas camadas: entrada, intermediária (ou oculta) e saída. Cada conexão entre neurônios é ponderada, permitindo que o modelo aprenda padrões complexos a partir de dados de entrada durante o treinamento. As ANN são particularmente eficazes em problemas não lineares e multivariados, como os encontrados em processos de adsorção, pois conseguem capturar relações complexas entre variáveis (Abbasi *et al*. 2022). Sua capacidade de generalização as torna ferramentas poderosas para predição e otimização, permitindo que diferentes cenários experimentais sejam simulados sem a necessidade de realizar inúmeros testes laboratoriais (Khan *et al*. 2023).

Máquinas de Vetores de Suporte (SVR)

As máquinas de vetores de suporte para regressão (SVR, do inglês *Support Vector Regression*) são uma extensão das máquinas de vetores de suporte (SVM) projetada para resolver problemas de regressão. Esse modelo baseia-se no conceito de margens de erro, onde o objetivo é encontrar uma função que maximize a precisão preditiva enquanto minimiza desvios maiores que uma margem estabelecida. Uma das principais vantagens do SVR é sua capacidade de lidar com conjuntos de dados não lineares por meio do uso de funções núcleo (kernels), que transformam os dados em espaços de maior dimensão para facilitar a identificação de padrões. No contexto de processos de adsorção, o SVR é útil para modelar o comportamento do sistema ao prever a capacidade de adsorção com alta precisão, mesmo em condições experimentais variáveis e complexas.

Treinamento do modelo

O software TIBCO Statistica 14.0 (TIBCO Software Inc.) foi utilizado para construir os modelos de ANN e SVR. Dados que refletem a influência do pH, concentração do corante, dosagem do adsorvente, tempo de contato e temperatura serviram como variáveis de entrada para modelar a adsorção da RhB. A capacidade de adsorção (q, mg g^{-1}) foi definida como a variável de saída dos modelos. O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em duas categorias: treinamento (70%) e teste (30%). Para eliminar os efeitos de escala entre as variáveis, todo o conjunto de dados foi normalizado para o intervalo de 0–1 usando a Equação (02).

$$y = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad (02)$$

onde y representa o valor normalizado de x_i e x_{min} e x_{max} são os valores mínimo e máximo de x_i, respectivamente.

Resultados e discussão

A Tabela 01 apresenta os resultados da capacidade de adsorção da RhB pelo mesocarpo do babaçu considerando diversas condições de concentração do corante, pH, dosagem de adsorvente, temperatura e tempo de contato. Estes dados foram usados para o treinamento dos modelos de ANN e SVR.

O algoritmo de backpropagation foi empregado para ajustar iterativamente os pesos de conexão e os vieses dos modelos de ANN, minimizando as discrepâncias entre os valores experimentais e os previstos. A Tabela 02 apresenta as cinco principais arquiteturas de modelos de ANN obtidos, cada uma utilizando funções de ativação específicas tanto para as camadas ocultas quanto para as de saída. A avaliação de desempenho dos modelos incluiu a análise do coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) nos conjuntos de dados de treinamento e teste. Todos os modelos demonstraram excelente precisão, com valores de R^2 acima de 0,99 para o conjunto de dados de teste. Dentre estes modelos, o de arquitetura 5-14-1 apresentou o menor RMSE (0,517). Essa arquitetura consiste em cinco neurônios de entrada, catorze neurônios na camada oculta e um neurônio de saída, utilizando a função de ativação logística na camada oculta e tangente hiperbólica na camada de saída.

Tabela 01. Dados da adsorção da RhB por mesocarpo do babaçu considerando diversas condições ambientais.

RhB (mg L^{-1})	pH	Adsorvente (g L^{-1})	Temperatura (°C)	Tempo de contato (min)	q_e (mg g^{-1})
50	2	1	30	120	37.19
50	4	1	30	120	34.42
50	6	1	30	120	32.32
50	8	1	30	120	30.37
50	10	1	30	120	28.88
50	2	1.5	30	120	27.78
50	2	2	30	120	21.38
50	2	3	30	120	14.58
50	2	0.5	20	10	31.24
50	2	0.5	20	20	32.24
50	2	0.5	20	30	33.23
50	2	0.5	20	40	33.58
50	2	0.5	20	50	34.85
50	2	0.5	20	60	35.84
50	2	0.5	20	75	37.16
50	2	0.5	20	90	38.16
50	2	0.5	20	120	40.57
50	2	0.5	30	10	33.14
50	2	0.5	30	20	35.92
50	2	0.5	30	30	38.72
50	2	0.5	30	40	43.19
50	2	0.5	30	50	44.39
50	2	0.5	30	60	46.65
50	2	0.5	30	75	48.42
50	2	0.5	30	90	49.77
50	2	0.5	30	120	52.65
50	2	0.5	40	10	35.43
50	2	0.5	40	20	38.98
50	2	0.5	40	30	42.01
50	2	0.5	40	40	44.73
50	2	0.5	40	50	47.16
50	2	0.5	40	60	48.53
50	2	0.5	40	75	50.66
50	2	0.5	40	90	52.91
50	2	0.5	40	120	56.15
20	2	0.5	40	120	30.74
150	2	0.5	40	120	99.32
200	2	0.5	40	120	97.92

Para o modelo SVR, os hiperparâmetros constantes de penalização (C), insensibilidade ao erro (ε) e parâmetro do kernel (γ) foram otimizados por meio de tentativa e erro, garantindo a eficiência e a robustez do modelo. O hiperparâmetro C controla o equilíbrio entre a minimização do erro e a margem do modelo, ε define uma faixa de tolerância ao erro dentro da qual as previsões não são penalizadas, e γ determina a influência de um único ponto de dado no kernel. Os valores otimizados desses hiperparâmetros, juntamente com o desempenho do modelo, estão detalhados na Tabela 03. O modelo de SVR apresentou alta precisão com um R^2 de 0,994 e um RMSE de 1,927 no conjunto de dados de teste.

A comparação entre os modelos de ANN e SVR (Figura 1) evidencia a robustez de ambos na predição da capacidade de adsorção de RhB pelo mesocarpo de babaçu, conforme indicado pelos altos valores de R² e baixos RMSEs. Os modelos de ANN, particularmente a arquitetura 5-14-1, demonstraram uma precisão ligeiramente superior em relação ao modelo SVR. No entanto, o modelo SVR também apresentou um desempenho admirável, oferecendo uma alternativa robusta com menos parâmetros e uma implementação potencialmente mais simples.

Tabela 02. Arquiteturas dos modelos de ANN para adsorção de RhB por mesocarpo do babaçu.

Arquitetura do modelo de ANN	R^2 (Treinamento)	R² (Teste)	RMSE (Treinamento)	RMSE (Teste)	Função da camada oculta	Função da camada de saída
5-14-1	0.999	0.999	0.334	0.517	Logística	Tangente hiperbólica
5-9-1	0.999	0.999	0.510	0.800	Tangente hiperbólica	Logística
5-13-1	0.999	0.999	0.549	0.800	Tangente hiperbólica	Logística
5-13-1	0.999	0.998	0.385	0.926	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica
5-12-1	0.999	0.998	0.538	0.869	Logística	Logística

Tabela 03. Hiperparâmetros otimizados e desempenho do modelo SVR.

Modelo	C	γ	ε	N° de vetores de suporte	R² (Treinamento)	R^2 (Teste)	RMSE (Treinamento)	RMSE (Teste)
SVR	10	10.5	0.001	26	0.991	0.994	1.927	2.282

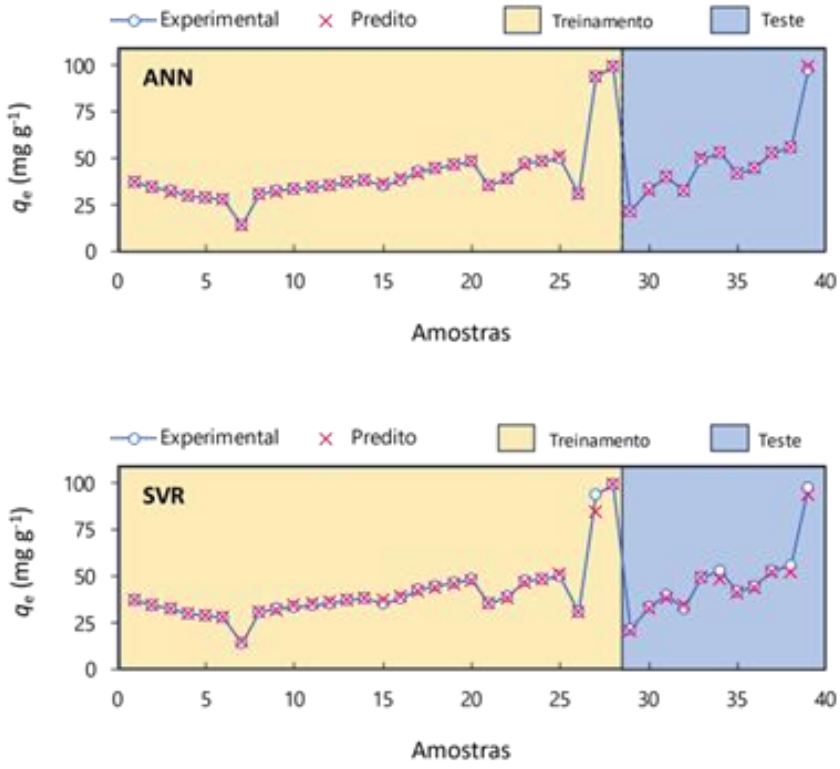


Figura 1. Desempenho preditivo dos modelos ANN e SVR para a adsorção de RhB por mesocarpo do babaçu.
Fonte: Autoral (2025)

Considerações Finais

Este estudo demonstrou que o mesocarpo do coco babaçu pode ser utilizado como adsorvente para a remoção do corante rodamina B de soluções aquosas. A aplicação de técnicas de aprendizado de máquina, como redes neurais artificiais e máquinas de vetores de suporte, permitiu prever com alta precisão o processo de adsorção, o que poderá reduzir a necessidade de experimentos extensivos. Ambos os modelos apresentaram ótimo desempenho preditivo, com R^2 acima de 0,99 e baixos erros quadráticos médios (RMSE). Esses resultados reforçam o potencial de combinar adsorventes naturais com aprendizado de máquina para soluções inovadoras e sustentáveis no tratamento de efluentes, aprimorando e sucedendo os tratamentos convencionais que se mostram insuficientes para efluentes com aspectos recalcitrantes.

Referências

ABBASI, E.; ALAVI MOGHADDAM, M. R.; KOWSARI, E. A systematic and critical review on development of machine learning-based ensemble models for prediction of adsorption process efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, p. 1-18, 2022.

AL-GHEETHI, A. A.; AZHAR, Q. M.; SENTHIL, K. P.; YUSUF, A. A.; AL-BURIAHI, A. K.; RADIN, R. M. S. M.; AL-SHAIBANI, M. M. Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents: A review. **Chemosphere**. v. 287, p.1-11, 2022.

GOLIN, R.; BARBOSA, A. G.; LOPES, V. C. P.; CAIXETA, D. S.; FILHO, F. C. M. DE M.; DALL'OGLIO, E. L.; VASCONCELOS, L. G.; MORAIS, E. B. Decolorization of Rhodamine B by Fenton reaction using iron nanoparticles supported in Brazil nutshell biomass. **Revista Matéria**, v. 27, n. 3, p. 1-11, 2022.

KHAN, A. A.; NAQVI, S. R.; ALI, I.; ARSHAD, M.; ALMOHAMADI, H.; SIKANDAR, U. Algal-derived biochar as an efficient adsorbent for removal of Cr (VI) in textile industry wastewater: non-linear isotherm, kinetics and ANN studies. **Chemosphere**, v. 316, p. 1-14, 2023.

MORAIS, E. B.; VASCONCELOS, L. G.; MENEZES FILHO, F. C. M.; CAIXETA, D. S.; DALL'OGLIO, E. L.; GOLIN, R.; DELUQUE, A. L.; SANTOS, A. A.. Rhodamine B dye biosorption using babassu coconut mesocarp: batch and dynamic studies. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.2, p.90-103, 2022.

NASCIMENTO, M. X.; SANTOS, B. A. P. dos; NASSARDEN, M. M. S.; NOGUEIRA, K. dos S.; BARROS, R. G. S.; GOLIN, R.; SIQUEIRA, A. B.; VASCONCELOS, L. G.; MORAIS, E. B. de. Artificial neural network-based modeling of Malachite green adsorption onto baru fruit endocarp: insights into equilibrium, kinetic, and thermodynamic behavior. **International Journal of Phytoremediation**. v. 26, n. 11, p. 1749–1763, 2024.

PUBCHEM. Compound Summary for CID 6694, Rhodamine B. Bethesda, MD: **National Center for Biotechnology Information**, 2004. Disponível em: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Rhodamine-B. Acesso em: 15 mar. 2026.

ROSA, A. L. D.; CARISSIMI, E.; DOTTO, G. L.; SANDER, H.; FERIS, L. A. Biosorption of rhodamine B dye from dyeing stones effluents using the green microalgae Chlorella pyrenoidosa. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 1302-1310, 2018.

SANTOS, T. P. M. DOS; DIAS, B. M.; SOUSA, H. M.; MENEZES FILHO, F. C. M. DE; FUKUMOTO, A. A. F.; CRUZ, I. F. DA; MORAIS, E. B. DE. Adsorption of rhodamine B onto cotton straw-derived biochar: kinetic, equilibrium, thermodynamics, and predictive studies using artificial intelligence. **International Journal of Phytoremediation**, v. 27, n. 13, p. 1913-1925, 2025.

SOLAYMAN, H. M.; HOSSEN, M. A.; ABD AZIZ, A.; YAHYA, N. Y.; LEONG, K. H.; SIM, L. C.; MONIR, M. U.; ZOH, K. D. Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. v. 11, p. 1–25, 2023.

PLACAS LAMINADAS DE PAPELÃO ONDULADO COMO MATERIAL CONSTRUTIVO SUSTENTÁVEL: INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO

1 Daniel Juliano Pamplona da Silva, 2 Vinicius Souza Gomes
1 Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), e-mail: daniel.silva@unifal-mg.edu.br; 2 Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), e-mail:viniciussouza.gomes@sou.unifal-mg.edu.br

Palavras-chave: Papelão ondulado; Construção sustentável; Resistência à flexão.

Resumo

A construção civil apresenta elevada demanda por recursos naturais, consumo energético significativo e ampla geração de resíduos, o que reforça a necessidade de investigar materiais alternativos de menor impacto ambiental. Nesse contexto, o papelão ondulado, embora usualmente associado a embalagens descartáveis, apresenta características como leveza, baixo custo, disponibilidade, reciclabilidade e estrutura geométrica interna capaz de conferir rigidez ao conjunto. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial, em termos de resistência à flexão, de placas laminadas de papelão reaproveitado, unidas com cola vegetal, visando aplicação como elementos construtivos. Foram confeccionados corpos de prova compostos por camadas sobrepostas de papelão ondulado, submetidos à prensagem e avaliados em ensaio de flexão em três pontos. Inicialmente, compararam-se diferentes configurações de montagem, tipos de adesivo e orientações das ondas do papelão. Em seguida, com base nos resultados destes testes, adotou-se a montagem intercalada, a cola vegetal e a orientação mista das ondas para investigar tempos de secagem entre 60 e 90 dias. Os resultados indicaram que a montagem intercalada apresentou desempenho equivalente à inteiriça e superior à montagem emendada ao meio, evidenciando a importância da distribuição das descontinuidades ao longo da placa. A cola vegetal, embora não tenha apresentado o maior desempenho absoluto entre os adesivos, mostrou-se competitiva e coerente com a proposta ambiental do estudo. Quanto à orientação das ondas, a configuração longitudinal obteve maior carga média, enquanto a mista apresentou desempenho muito próximo, com potencial para aplicações em placas maiores por distribuir a resistência em duas direções. O tempo de secagem foi o fator de maior impacto, elevando a carga média máxima de 4500 g, aos 60 e 70 dias, para 5833,33 g aos 90 dias. Conclui-se que o desempenho mecânico das placas laminadas de papelão depende da combinação entre montagem, adesivo, orientação das ondas e tempo de cura, indicando potencial para o desenvolvimento de soluções construtivas sustentáveis.

Introdução

A preocupação com os impactos ambientais associados ao desenvolvimento industrial consolidou-se ao longo das últimas décadas e passou a orientar, de forma crescente, as discussões sobre sustentabilidade. A Conferência de Estocolmo (ONU, 1972) e, posteriormente, o Relatório de Brundtland (BRUNDTLAND, 1991) reforçaram a necessidade de modelos produtivos capazes de atender às demandas do presente sem comprometer as gerações futuras. No âmbito da construção civil, essa discussão é particularmente relevante, pois o setor combina intensa demanda por matéria-prima, elevado consumo energético e ampla geração de resíduos.

A construção civil responde pelo consumo de parcela expressiva do uso de recursos naturais não renováveis, como areia e brita, além de demandar grandes volumes de água e materiais processados. A produção de cimento e aço, por exemplo, possui elevada intensidade energética e importante participação nas emissões globais de dióxido de carbono (LEHNE; PRESTON, 2018). Soma-se a isso o expressivo volume de resíduos da construção e demolição, que, no Brasil, representam parcela significativa da massa total de resíduos sólidos urbanos (JOHN, 2000; ABRECON, 2024). Esse cenário justifica a busca por soluções construtivas baseadas em materiais alternativos, reciclados e de menor impacto ambiental.

Entre os materiais potencialmente promissores, o papelão ondulado se destaca por ser leve, reciclável, biodegradável, de baixo custo e amplamente disponível. Embora geralmente seja percebido como material de embalagem, fraco e descartável, seu arranjo geométrico interno, composto por capas externas e miolo ondulado, permite boa distribuição de esforços e confere rigidez ao conjunto (MAGALHÃES et al., 2006). Experiências arquitetônicas e estudos experimentais têm demonstrado que materiais à base de papel podem assumir funções construtivas relevantes quando corretamente projetados, protegidos e combinados com sistemas de ligação eficientes (ŁĄTKA, 2022).

Além da leveza e da disponibilidade, o papelão também desperta interesse por seu potencial térmico e acústico em aplicações de vedação e compartimentação (OUAKARROUCH, 2022). Entretanto, a absorção de umidade, a suscetibilidade ao fogo e a variabilidade do comportamento mecânico ainda constituem desafios que limitam seu emprego em componentes estruturais permanentes. Tais limitações não inviabilizam a pesquisa; ao contrário, indicam a necessidade de compreender melhor quais variáveis construtivas controlam o desempenho do material. A literatura indica que a umidade compromete significativamente o desempenho de papéis e papelões, o que motiva o desenvolvimento de revestimentos hidrofóbicos (MARINELLI, et al., 2021). Do mesmo modo, o comportamento frente ao fogo permanece como aspecto crítico para o avanço de aplicações construtivas mais seguras (LI et al., 2022).

Nesse contexto, o desempenho final de peças laminadas de papelão não depende apenas do material em si, mas também do tipo de corte adotado, do adesivo empregado, da qualidade da prensagem e do tempo de cura necessário para estabilização do

conjunto, entre outros fatores. No caso específico dos adesivos, formulações de base biológica têm recebido atenção crescente por sua compatibilidade com propostas de fabricação mais sustentáveis (VRABIČ-BRODNJAK, 2023). Diante disso, este trabalho teve como objetivo investigar o potencial de placas laminadas de papelão reaproveitado para uso em elementos construtivos leves, avaliando a influência tipo de corte adotado, adesivo empregado, orientação das ondas de papelão e do tempo de cura do adesivo.

Material e Métodos

A pesquisa teve caráter experimental e abordagem quantitativa. Foram avaliados quatro fatores: tipo de montagem dos corpos de prova, tipo de adesivo, orientação das ondas do papelão e tempo de secagem. Os corpos de prova foram confeccionados com papelão ondulado de parede dupla. Esses corpos, semelhantes a tábuas, conforme exemplo da Figura 3, resultaram da sobreposição sucessiva de camadas de papelão, com aplicação de cola entre as camadas, até atingirem dimensões finais aproximadas de 0,10 m de largura, 1,20 m de comprimento e 0,02 m de espessura. Em termos práticos, cada corpo de prova foi composto por seis camadas sobrepostas, sendo cada camada formada por uma ou mais placas de papelão com 0,10 m de largura e comprimento variável, conforme o tipo de montagem adotado. A espessura individual das placas variou entre 3 e 4 mm, valor comumente encontrado em caixas de papelão utilizadas para embalagens.

Foram explorados três tipos de montagem, denominados inteiriça, intercalada e emendada. Na montagem **inteiriça**, cada uma das seis camadas era formada por uma única placa de papelão de 0,10 m de largura por 1,20 m de comprimento. Na montagem **intercalada**, a primeira camada era composta por três placas de 0,10 m de largura por 0,40 m de comprimento. A segunda camada era formada por uma placa de 0,10 m de largura por 0,20 m de comprimento, seguida por duas placas de 0,10 m de largura por 0,40 m de comprimento e completada por uma placa de 0,10 m de largura por 0,20 m de comprimento. A terceira camada repetia a configuração da primeira, a quarta repetia a configuração da segunda, e assim sucessivamente, em arranjo semelhante ao de uma parede de tijolos. Na montagem **emendada**, cada uma das seis camadas era formada por duas placas de papelão de 0,10 m de largura por 0,60 m de comprimento, de modo que todas as emendas coincidiam exatamente no meio do comprimento do corpo de prova. Na Figura 1 apresenta-se um esquema das três montagens.

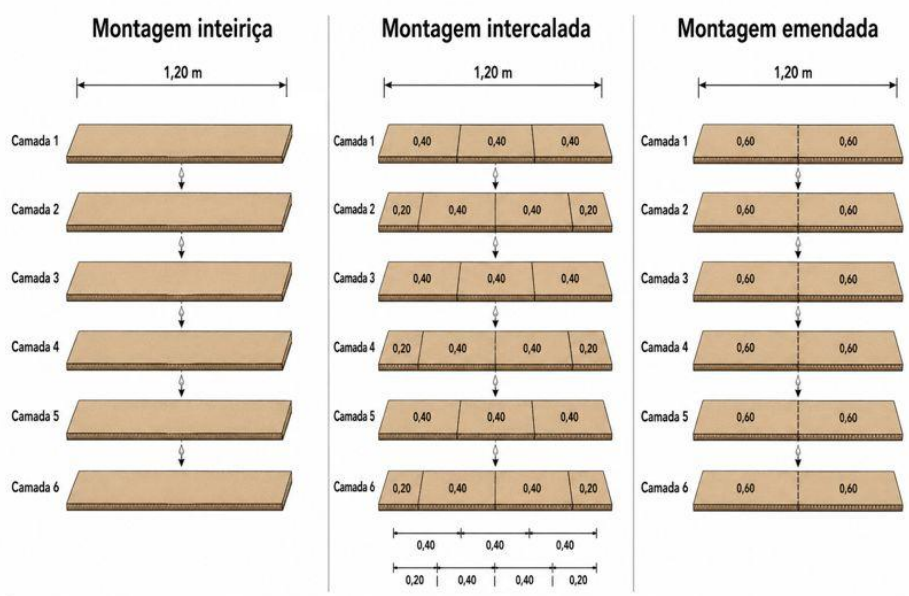


Figura 1: Tipos de montagem dos corpos de prova.
Fonte: autores (2025)

Nesta etapa, todas as placas foram dispostas com as ondas do papelão orientadas no sentido longitudinal. Isso significa que os canais internos do papelão ondulado foram posicionados paralelamente ao comprimento dos corpos de prova, isto é, alinhados à dimensão de 1,20 m. Além disso, todos os corpos de prova desta etapa foram confeccionados com o mesmo adesivo, denominado PVA Extra 1, conforme detalhado na etapa seguinte.

Após a montagem, as placas foram submetidas à prensagem por aproximadamente 24 horas, utilizando-se uma prensa manual construída com perfil metálico em U preenchido com concreto, conforme ilustrado na Figura 2. O emprego desse dispositivo teve por objetivo melhorar a aderência entre as camadas e reduzir a formação de vazios no processo de colagem, por meio da aplicação de pressão uniforme durante a cura inicial do adesivo, isto é, durante o processo de secagem da cola.

Após os ensaios comparativos entre os diferentes tipos de montagem, realizados com o mesmo adesivo, a montagem intercalada foi selecionada, com base nos resultados obtidos, para a etapa de avaliação de diferentes tipos de cola. Nessa etapa, foram testados cinco adesivos distintos. Dois deles correspondiam a colas comerciais líderes de mercado, ambas do tipo PVA extra, aqui denominadas **PVA Extra 1** e **PVA Extra 2**, reconhecidas por sua elevada performance na colagem de papelão. Também foi avaliada uma terceira cola do tipo PVA extra, de marca menos conhecida, adquirida por meio do processo de compra

institucional da universidade à qual os autores estão vinculados, aqui denominada **PVA Extra 3**. Além dessas, testou-se uma cola PVA de menor consistência e desempenho, usualmente empregada na colagem de materiais de divulgação externa, como outdoors, aqui denominada **Outdoor**, considerada uma alternativa de menor custo. Por fim, foi avaliada uma cola vegetal à base de amido de mandioca, de marca comercial pouco conhecida e custo semelhante ao da Outdoor, adquirida em plataforma de comércio eletrônico, aqui denominada **Vegetal**.



Figura 2: Prensa manual empregada para a cura das placas de papelão.
Fonte: autores (2025)

Com base nos resultados da etapa de comparação entre adesivos, a cola Vegetal foi selecionada para a continuidade do estudo. Essa escolha não decorreu exclusivamente do maior valor de carga observado na fase anterior, mas de um balanço entre desempenho, baixo custo e coerência ambiental, em consonância com a literatura recente sobre adesivos de base biológica aplicados ao papelão ondulado (VRABIČ-BRODNJAK, 2023). Dessa forma, considerando que a proposta central da pesquisa é explorar soluções construtivas mais sustentáveis, optou-se por privilegiar um adesivo de base biológica, mesmo reconhecendo que algumas colas sintéticas apresentaram valores absolutos superiores em ensaios específicos.

Após a seleção da cola Vegetal, foi realizada uma nova etapa experimental, destinada a avaliar a influência da orientação das ondas do papelão no desempenho dos corpos de prova. Para isso, foram consideradas três configurações: longitudinal, transversal e mista. Na configuração **longitudinal**, já adotada nas etapas anteriores, os canais internos do papelão ondulado foram posicionados paralelamente ao comprimento dos corpos de prova, isto é, alinhados à dimensão de 1,20 m, em todas as camadas. Na configuração **transversal**, esses canais foram posicionados ortogonalmente ao comprimento dos corpos de prova, ou seja, paralelamente à largura de 0,10 m, também em todas as camadas. Por fim, na configuração **mista**, as camadas foram alternadas entre as orientações longitudinal e transversal, de modo que o corpo de prova fosse composto por camadas com diferentes direções de ondas.

A partir das escolhas realizadas nas etapas anteriores, os corpos de prova utilizados nesta fase foram confeccionados com montagem intercalada, cola Vegetal e orientação mista das ondas do papelão. Com essa configuração, avaliou-se também a influência do tempo de cura do adesivo no desempenho dos corpos de prova. Para isso, foram considerados apenas tempos de cura entre 60 e 90 dias, intervalo definido com base nos resultados obtidos nos ensaios preliminares, conforme será apresentado na seção de Resultados e Discussão.

Os ensaios mecânicos foram conduzidos em configuração de flexão em três pontos, tendo como referência conceitual o método TAPPI T 820 (TAPPI, 2009), embora o procedimento tenha sido adaptado às condições e aos recursos experimentais disponíveis. Em todos os casos, cada placa foi apoiada em dois suportes, com vão livre de 1,0 m, e submetida a carregamento incremental concentrado no centro do vão, conforme ilustrado na Figura 3. A carga foi aplicada por meio de um recipiente progressivamente preenchido com água, em incrementos de 250 g, até a ruptura da peça.

Para cada condição experimental, foram ensaiados corpos de prova em triplicata, registrando-se a carga máxima suportada por cada amostra no instante do colapso. Para fins de apresentação e análise, foram consideradas as cargas máximas médias obtidas em cada triplicata. Esses valores médios foram organizados em tabelas, com o objetivo de identificar tendências de ganho de resistência associadas a cada condição avaliada.



Figura 3: Ensaio de flexão em três pontos com aplicação de carga concentrada no centro do vão.
Fonte: autores (2025)

Cabe destacar que os ensaios aqui relatados integram uma etapa exploratória da pesquisa, voltada à comparação inicial de configurações construtivas, adesivos, orientações das ondas do papelão e tempos de cura. Dessa forma, os resultados apresentados constituem evidências experimentais relevantes para a compreensão do comportamento mecânico dos corpos de prova, bem como para o refinamento metodológico, a seleção dos parâmetros de fabricação mais promissores e o planejamento das próximas campanhas de ensaio.

Resultados e Discussão

A primeira etapa dos ensaios teve como objetivo comparar o desempenho das diferentes configurações de montagem dos corpos de prova. Observou-se que as montagens intercalada e inteiriça apresentaram desempenho equivalente quando confeccionadas com a cola PVA Extra 1, ambas superiores à montagem emendada ao meio, conforme apresentado na Tabela 1. Esse resultado indica que a descontinuidade central presente na montagem emendada comprometeu a transferência de esforços e favoreceu a concentração de tensões em uma região crítica do elemento. Diante desse comportamento, a montagem intercalada foi selecionada para a continuidade dos ensaios, por apresentar desempenho semelhante ao da montagem inteiriça, mas com maior coerência construtiva para o reaproveitamento de placas menores de papelão.

Ensaio	Condição avaliada	Carga média (g)
Tipos de montagem com cola PVA Extra 1	Intercalada	1750,00
	Inteiriça	1750,00
	Emendada ao meio	1416,66
Tipos de cola em placa intercalada	PVA Extra 1	1750,00
	PVA Extra 2	2333,33
	PVA Extra 3	2416,66
	Outdoor	1416,66
	Vegetal	2083,33
Orientação das ondas do papelão com cola vegetal em placas intercaladas	Mista	4916,66
	Longitudinal	5083,33
	Transversal	3750,00

Tabela 1: Síntese dos primeiros ensaios para seleção de corte, adesivo e orientação.
Fonte: autores (2025)

Na comparação entre adesivos aplicados à placa intercalada, a maior carga média foi obtida com a cola PVA Extra 3, seguida pela PVA Extra 2. A cola Vegetal, embora não tenha apresentado o maior desempenho absoluto, mostrou resultado competitivo: sua carga média foi aproximadamente 14% inferior à da PVA Extra 3, mas 16% superior à obtida com a PVA Extra 1, uma das principais referências comerciais entre as colas do tipo PVA extra. Esse resultado indica que o desempenho mecânico observado não esteve associado exclusivamente ao reconhecimento comercial do adesivo, mas também às características específicas de sua formulação e de sua interação com o papelão. Considerando esse comportamento, optou-se pela cola Vegetal para a continuidade dos ensaios, em função de sua base renovável, menor custo e aderência satisfatória ao papelão, bem como de sua elevada aderência ao propósito socioambiental da pesquisa.

Em seguida, em nova rodada de testes com a cola Vegetal, avaliou-se a influência da orientação das ondas do papelão. A configuração longitudinal apresentou o maior valor médio de carga, seguida pela configuração mista, cujo desempenho foi apenas cerca de 3% inferior. Apesar dessa pequena diferença, a configuração mista foi considerada mais promissora para a continuidade do estudo, pois, em placas de maiores dimensões, tende a conferir resistência em duas direções principais, e não apenas no sentido longitudinal. Esse resultado indica que a orientação das ondas do papelão influencia a continuidade estrutural da placa e, consequentemente, sua resistência à flexão.

Além dos resultados discutidos anteriormente, chamou a atenção dos pesquisadores o fato de que a média das cargas obtidas nos ensaios de orientação das ondas foi aproximadamente 2,45 vezes superior à média verificada nos ensaios anteriores. A magnitude desse aumento indicava que a diferença observada dificilmente poderia ser explicada apenas pela orientação das ondas do papelão. A partir de uma análise posterior das condições de execução dos ensaios, verificou-se que, nos últimos testes, o intervalo entre a prensagem dos corpos de prova e a realização do ensaio mecânico havia sido substancialmente maior, em torno de três meses. Diante dessa constatação, optou-se por realizar uma nova rodada de ensaios para avaliar a influência do tempo de secagem/cura do adesivo sobre a resistência dos corpos de prova. Os resultados dessa avaliação são apresentados na Tabela 2.

Tempo de secagem (dias)	Carga média máxima (g)
60	4500
70	4500
80	4833,33
90	5833,33

Tabela 2: Carga média máxima em função do tempo de secagem.
Fonte: autores (2025)

Que podem ser melhor visualizados no gráfico da Figura 3.

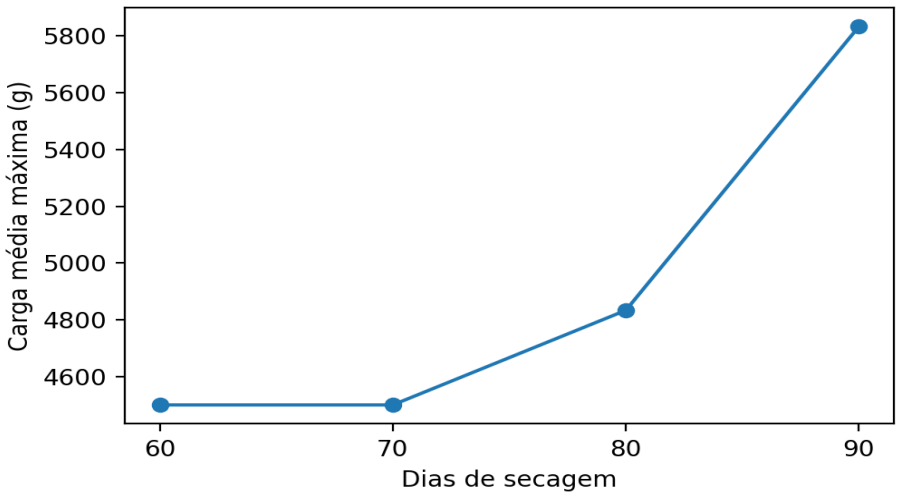


Figura 3: Evolução da carga média máxima em função do tempo de secagem.
Fonte: autores (2025)

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que o tempo de secagem exerceu influência direta sobre a resistência à flexão dos copos de prova. Entre 60 e 70 dias, não houve variação da carga média suportada, mantendo-se o valor de 4500 g. Aos 80 dias, verificou-se incremento moderado, com média de 4833,33 g, o que pode indicar o início de uma consolidação mais efetiva da interface adesiva. O comportamento mais expressivo ocorreu aos 90 dias, quando a carga média de ruptura atingiu

5833,33 g, correspondendo a um aumento de aproximadamente 29,6% em relação ao patamar registrado aos 60 e 70 dias. Esse resultado sugere que a cura do adesivo vegetal demanda período prolongado para desenvolver maior capacidade de transferência de esforços entre as camadas de papelão.

Esse comportamento reforça que a resistência do conjunto não depende apenas da geometria da placa, do tipo de adesivo ou da orientação das ondas do papelão, mas também do tempo necessário para a estabilização do adesivo, fator que, neste conjunto de ensaios, mostrou influência especialmente expressiva. Assim, avaliações realizadas com curto tempo de cura podem subestimar o potencial mecânico do material. Por outro lado, o ganho tardio de resistência impõe desafios práticos para aplicações construtivas, exigindo planejamento adequado das etapas de fabricação, estocagem e montagem. Dessa forma, novos ensaios em diferentes tempos de cura serão necessários para caracterizar com maior precisão a evolução da resistência mecânica em função do tempo de secagem.

Considerações finais

A montagem emendada ao meio apresentou o desempenho menos favorável entre as configurações avaliadas, indicando que a concentração das juntas em uma única seção transversal compromete a integridade estrutural do elemento sob flexão. Esse resultado é coerente com a hipótese de que a distribuição das descontinuidades ao longo do comprimento da placa, como ocorre na montagem intercalada, favorece a transferência de esforços entre as camadas e reduz a formação de regiões críticas. Assim, soluções construtivas com emendas coincidentes devem ser evitadas quando o objetivo for maximizar a capacidade resistente. Esse achado também aponta para um desafio relevante em aplicações reais, nas quais a união entre peças semelhantes às avaliadas neste estudo poderá exigir estratégias específicas de emenda, incluindo o eventual desenvolvimento ou seleção de adesivos apropriados para essas regiões de ligação.

Outro ponto relevante é que a cola Vegetal, embora não tenha alcançado o maior valor absoluto na comparação entre os adesivos avaliados, apresentou desempenho competitivo o suficiente para justificar sua permanência nas etapas seguintes da pesquisa. Essa escolha reforça a importância de avaliações multicritério em estudos voltados à sustentabilidade, nos quais o melhor resultado mecânico, tomado isoladamente, nem sempre corresponde à solução mais coerente do ponto de vista ambiental, econômico e construtivo.

A análise da orientação das ondas do papelão também trouxe contribuição importante para a compreensão do comportamento mecânico das placas. A orientação longitudinal apresentou o melhor desempenho no ensaio de flexão, o que indica a relevância do alinhamento dos canais internos do papelão com a direção principal dos esforços aplicados. No entanto, a configuração mista apresentou desempenho muito próximo, com redução de apenas cerca de 3% em relação à longitudinal, sugerindo que a alternância entre camadas longitudinais e transversais pode representar uma alternativa tecnicamente promissora. Em aplicações construtivas reais, especialmente em placas de maiores dimensões, essa configuração tende a ser mais interessante, pois pode conferir maior equilíbrio estrutural ao elemento, distribuindo a resistência em duas direções principais, em vez de concentrá-la predominantemente em uma única direção.

Entre os fatores avaliados, o tempo de secagem da cola Vegetal revelou-se o aspecto de maior impacto sobre o desempenho mecânico dos corpos de prova. O aumento expressivo da carga média suportada após períodos mais longos de cura indica que a resistência do sistema laminado não se estabiliza imediatamente após a secagem superficial do adesivo, mas continua evoluindo ao longo do tempo. Esse resultado altera a forma de interpretar o material: mais do que uma simples placa colada de papelão, trata-se de um compósito laminado cuja capacidade resistente depende fortemente da consolidação progressiva da interface adesiva entre as camadas. Assim, ensaios realizados com tempos de cura reduzidos podem levar à subestimação do desempenho mecânico das placas, enquanto aplicações construtivas futuras deverão considerar, desde o projeto, períodos adequados de cura, estocagem e montagem. Embora esse comportamento imponha desafios práticos ao processo construtivo, ele também representa um aspecto positivo, pois sugere que elementos produzidos com esse material podem continuar ganhando resistência com o passar do tempo.

Em conjunto, os resultados obtidos mostram que a transformação do papelão ondulado em placas laminadas com potencial construtivo não depende de uma única decisão de fabricação, mas da combinação entre montagem, adesivo, orientação das ondas e tempo de cura. A montagem intercalada mostrou-se mais adequada que a emendada por distribuir melhor as descontinuidades; a cola Vegetal, mesmo sem apresentar o maior desempenho absoluto, revelou-se compatível com a proposta de desenvolvimento de soluções de menor impacto ambiental; a orientação mista indicou um caminho promissor para equilibrar a resistência em diferentes direções; e o tempo de secagem demonstrou papel decisivo na consolidação mecânica do material. Assim, mais do que comprovar isoladamente a resistência de um corpo de prova específico, a pesquisa contribui para estabelecer critérios de projeto e fabricação de placas de papelão laminado, aproximando um material usualmente tratado como resíduo de uma possível aplicação técnica, sustentável e construtivamente viável.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) e ao Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABRECON. Pesquisa Setorial ABRECON 2022: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. São Paulo: ABRECON, 2024. ISBN 978-65-89190-35-6. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/390028837_Pesquisa_Setorial_ABRECON_2022_a_reciclagem_de_residuos_de_construcao_e_demolicao_no_Brasil. Acesso em: 28 abr. 2026.

BRUNDTLAND, Gro Harlem et al. Nosso futuro comum. Rio de Janeiro: FGV, v. 2, 1991. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/portaleducacaoambiental/sites/11/2024/05/Nosso-Futuro-Comum.pdf. Acesso em: 28 abr. 2026.

LEHNE, Johanna; PRESTON, Felix. Making concrete change. Innovation in low-carbon cement and concrete, p. 1-66, 2018. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/81558040/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston-final-libre.pdf?1646212038=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMaking_Concrete_Change_Innovation_in_Low.pdf&Expires=1777392728&Signature=KRHoMMPeaIlg2yz5upsgSWIrjYeGw7XRVBDwVBUzzWfZ6NsbwMA7kM6XEApeyXBFNmyvcRuFSoupnm~e5Ja61aLksTEhylsExLtoXtEwCzeudWPfNj8sgv5uGuZO1ulO9rNtwzbglklLGYEQF8gpDMqwAiOO2zK3ski0lVnyDn30wD8rYx~zX5w2gZV8p5WtraKlRbegoJ0zcY8nVbbGJ8wIGww8CEgpGvZJ~SpkppcTmJ~-jB2RLtbTqdz~VSKHo9w-~T1tZmTT2iZHKQcCp7eSFvP4ugFwI8CRgioaufdNNKH7MJdnTHCcg6Q95u3Oho1FcpJjied84jOfA2tL9w__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 28 abr. 2026.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. **São Paulo**, 2000. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37199623/CETESB-libre.pdf?1428068266=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DReciclagem_de_residuos_da_construcao.pdf&Expires=1777387255&Signature=Gy0NMjP3KxCBFCWUAI9DLBOjhxjHyKVwn6O4A-W2E5ijGLuQaF4NF6lQMzeyi~3mPcxFsyo1v8BdAV-jsGLWLKKbqE00eQt7J2Cycdma2x~fFp9KrKWHWiRoTzwmH3XmSZ0DRqEdrg9Ujct9qZKqBXhRATvx63o1-E2MllBE-VnrxuTQn1GvgSGJtebTNjAENOEYZsSWgXsfhX9hIvlHRrkdUIv9qacmE2bE1ifLJk5F8dQQ~1nXHxmLNzG~HajnM95oGskI24d5Je1Lzg2mQ9vO~ttZUQH2SL8WPntsUZuTQ3bNqXwcj~h89tmjy3wCnd68um4f~Jzr0GqaQVJYfQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 28 abr. 2026.

ŁĄTKA, Jerzy F. et al. Properties of paper-based products as a building material in architecture – An interdisciplinary review. Journal of Building Engineering, v. 50, p. 104135, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104135. Acesso em: 28 abr. 2026.

MAGALHÃES, Paulo G.; FIGUEIREDO, Paulo R. de A.; DEDINI, Franco G. Rigidez do papelão ondulado: comparação entre resultados experimentais e os obtidos por cálculo analítico. Engenharia Agrícola, v. 26, n. 1, p. 190-199, 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/j/eagri/a/VtppnxqWV8R3cBL5T3fRSZH/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 28 abr. 2026.

ONU. Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano. Estocolmo, 16 jun. 1972. Disponível em: https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972. Acesso em: 28 abr. 2026.

VRABIČ-BRODNJAK, Urška. Bio-based adhesives formulated from tannic acid, chitosan, and shellac for packaging materials. Polymers, v. 15, n. 5, p. 1302, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4360/15/5/1302. Acesso em: 28 abr. 2026.

MARINELLI, Andrea et al. Evaluation of coatings to improve the durability and water-barrier properties of corrugated cardboard. Coatings, v. 12, n. 1, p. 10, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/coatings12010010. Acesso em: 28 abr. 2026.

TAPPI. T 820 cm-09: Flexural stiffness of corrugated board. TAPPI Press, 2009. Disponível em: https://file.yizimg.com/175706/2013060409040838.pdf. Acesso em: 28 abr. 2026.

LI, Limei; QIAN, Xueren; SHEN, Jing. Flame-retardant, antibacterial, liquid-barrier, and wet-strength paper enabled by cellulosic fiber-derived additives. Carbohydrate polymers, v. 293, p. 119728, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119728. Acesso em: 28 abr. 2026.

OUAKARROUCH, Mohamed et al. Acoustic and thermal performances assessment of sustainable insulation panels made from cardboard waste and natural fibers. Applied Acoustics, v. 199, p. 109007, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109007. Acesso em: 28 abr. 2026.

O PANORAMA GLOBAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS HIDROLISADOS POR CELULASES FÚNGICAS: TENDÊNCIAS E LACUNAS

1Thiago Marques de Mello, 2Sergio de França Nunes Júnior, 3Rebeca de Lima Oliveira, 4Rayanne Regina Vasconcelos Fernandes 5Liliana Andréa dos Santos, 6André Felipe de Melo Sales Santos, 7Tatiana Souza Porto

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: thiago.mello@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: sergio.nunes@ufrpe.br; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: rebeca.limaoliveira@ufrpe.br; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: rayanne.fernandes@ufrpe.br; 5 Universidade Federal Rural de Pernambuco, liliana.santos@ufrpe.br; 6 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: andre.felipesantos@ufrpe.br; 7 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: tatiana.porto@ufrpe.br

Palavras-chave: Bibliometria; Biogás; Digestão anaeróbia.

Resumo

O crescimento da agroindústria traz como consequência direta a geração de grandes volumes de resíduos lignocelulósicos que possuem destinações e usos diversos. Seu potencial, entretanto, poderia ser melhor aproveitado com finalidades energéticas através da digestão anaeróbia, para produção de biogás e energia. Entretanto, a necessidade de pré-tratamento desses resíduos para a quebra dos compostos lignocelulósicos é um entrave a ser considerado. As enzimas podem ser aliadas na quebra desse paradigma técnico tornando o processo economicamente viável, mas seus custos elevados ainda são impeditivos econômicos importantes a serem resolvidos. Este estudo teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre a utilização de celulases na hidrólise desses resíduos visando a produção de biogás e metano. A pesquisa foi conduzida utilizando a base de dados Scopus, considerando operadores booleanos para a combinação dos termos *cellulase, biogas, methane, anaerobic digestion* e *lignocellulosic.* A triagem inicial identificou 106 documentos, dos quais 73 publicações foram selecionadas por sua relevância direta ao tema. Para a análise e visualização dos dados, utilizou-se o *software VOSviewer®*, aplicando o método *Visualization of Similarities* (VOS) para a construção de redes de coautoria, citações e co-ocorrência de palavras-chave. Ferramentas complementares como *Microsoft Excel®* e *MapChart®* auxiliaram na organização e representação geográfica dos dados. A análise bibliométrica revelou um crescimento expressivo na produção científica a partir de 2012, com o ápice de publicações registrado em 2016. A China consolidou-se como o país com o maior volume de documentos (20), enquanto os Estados Unidos apresentaram o maior impacto acadêmico, com média de 101,2 citações por artigo. A revista *Bioresource Technology* destacou-se como o principal veículo de difusão na área. Os agrupamentos temáticos (*clusters*) indicaram que as tendências de pesquisa estão concentradas na otimização da digestão anaeróbia para produção de metano, no uso de resíduos como milho e palha de trigo, e no emprego de bioaumentação e hidrólise enzimática para mitigar a recalcitrância da biomassa. Conclui-se que a área caminha para a integração da economia circular com foco na viabilidade econômica da hidrólise via celulases.

Introdução

A crescente demanda global por energia e a necessidade de mitigação dos impactos ambientais têm impulsionado a transição de matrizes energéticas fósseis para fontes renováveis. Nesse cenário, os resíduos lignocelulósicos, provenientes de diversas atividades agroindustriais e florestais, consolidam-se como uma das biomassas mais abundantes e promissoras para a bioeconomia (Kumar, Chandra, 2020). Esses materiais são caracterizados por uma estrutura complexa e recalcitrante, composta majoritariamente por uma matriz de celulose, hemicelulose e lignina (Zhu *et al., 2022*). Essa constituição química, embora confira resistência mecânica aos vegetais, representa um vasto reservatório de carbono biogênico que pode ser fracionado e convertido em bioprodutos de alto valor agregado (Kamperidou, Terzopoulou, 2021).

O aproveitamento sustentável dessas biomassas envolve rotas biotecnológicas que permitem a produção de uma ampla gama de biocombustíveis e insumos industriais. A desconstrução da parede celular vegetal, frequentemente mediada por processos de hidrólise, libera açúcares fermentáveis que servem de substrato para microrganismos em processos de fermentação e digestão (Xu *et al.*,2023). Entre as rotas de valorização energética, a digestão anaeróbia destaca-se por sua eficiência e versatilidade. Trata-se de um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio, onde consórcios microbianos degradam a matéria orgânica, resultando na geração de biogás uma mistura gasosa composta predominantemente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (Ma *et al.*, 2019).

A digestão anaeróbia destaca-se como uma rota de valorização estratégica ao converter biomassas lignocelulósicas em biogás rico em CH_4 e digestato, promovendo a economia circular e o alinhamento industrial às metas globais de descarbonização (IEA, 2020; Nicoloso *et al.*, 2019; Kunz *et al.*, 2019). Todavia, a eficiência da metanização é limitada pela complexidade estrutural da biomassa, exigindo o uso de pré-tratamentos ou a adição de enzimas hidrolíticas, como as celulases, para maximizar a degradação da lignocelulose e otimizar o rendimento energético (Čater *et al.*, 2014; Kamperidou, Terzopoulou, 2021).

A produção de celulases por fungos filamentosos assume um papel estratégico na superação dessa recalcitrância da biomassa, com destaque para o gênero *Aspergillus*, linhagem amplamente reconhecida por sua robustez metabólica e elevada

capacidade de secreção proteica (Boondaeng *et al.*, 2024). Esses microrganismos são capazes de sintetizar um complexo enzimático completo, incluindo endoglucanases, exoglucanases e β-glicosidases, essencial para a degradação da celulose em açúcares fermentáveis (Hareeri *et al.*, 2022). A obtenção dessas enzimas ocorre predominantemente por meio de duas rotas biotecnológicas: a fermentação em estado sólido (FES) e a fermentação submersa (FS). A distinção fundamental entre os processos reside na atividade de água, uma vez que a Fermentação em Estado Sólido caracteriza-se pelo cultivo de microrganismos em substratos sólidos com baixo teor de água livre, onde o resíduo atua simultaneamente como suporte físico e fonte de carbono, mimetizando o habitat natural fúngico (Chilakamarry *et al.,* 2020; Perwez, Al Asheh, 2025). Em contrapartida, a Fermentação Submersa ocorre em meio líquido com excesso de água livre, onde os nutrientes encontram-se solubilizados. Essa configuração permite uma maior transferência de massa e calor (Singh *et al.,* 2021).

Diante da vasta expansão da literatura técnica sobre essas tecnologias, ferramentas de análise quantitativa tornam-se indispensáveis para organizar o conhecimento e identificar lacunas de inovação que conectem a enzimologia industrial às energias renováveis (Donthu *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a bibliometria consolida-se como um campo da ciência da informação que utiliza métodos matemáticos e estatísticos para analisar a produção escrita e mapear o estado da arte de temas específicos. Através de *softwares* de visualização como o *VOSviewer®*, é possível transformar dados de bases como a *Scopus* em mapas bibliométricos que evidenciam redes de colaboração e tendências de palavras-chave. Diante da relevância do tema, o presente estudo justifica-se pela necessidade de fornecer um panorama estruturado sobre a aplicação de celulases na hidrólise de resíduos para a geração de biogás, traçando o perfil da pesquisa internacional e as principais frentes de investigação que conectam a enzimologia à engenharia de energias renováveis.

Materiais e Métodos

Levantamento Bibliométrico

A busca pelas publicações científicas foi realizada através da plataforma Portal Periódicos do *CapesCafe*, tendo como base de dados *Scopus*, que revelou resultados melhores e mais assertivos, quando comparada a outras bases de pesquisa. Tais resultados se conectaram melhor com a temática de "utilização de celulases na hidrólise de resíduos lignocelulósicos para aumentar a produção de biogás e metano." A Figura 01 mostra as etapas de coleta de dados e análise bibliométrica.

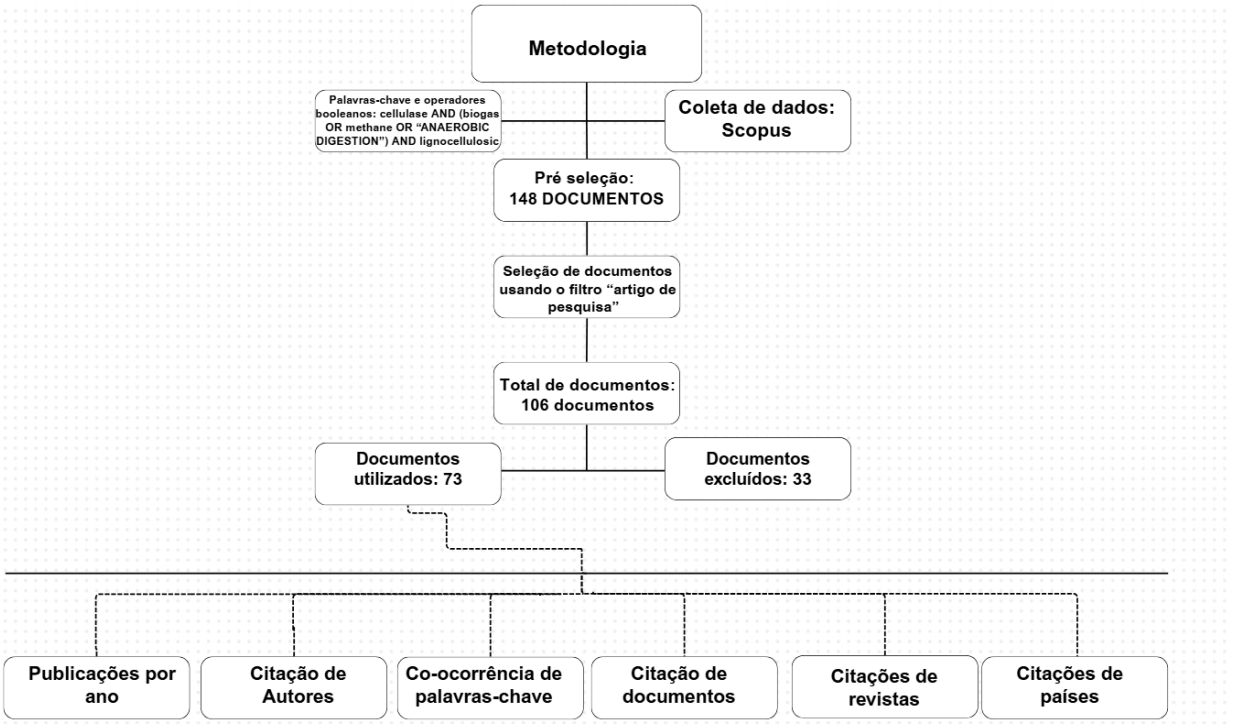


Figura 01: Esquema ilustrando as etapas de busca dos dados na plataforma *Scopus*, onde foi realizada a seleção e análise dos documentos relacionados ao tema para a bibliometria
Fonte: Os autores (2026)

A pesquisa utilizou a combinação de palavras-chave combinada com operadores booleanos *cellulase AND (biogas OR methane OR "ANAEROBIC DIGESTION") AND lignocellulosic* na base *Scopus*, resultando em 106 documentos. Após triagem, 73 documentos relevantes foram selecionados e exportados em formato Excel (CSV). Estes foram importados para o software *VOSviewer®* para construção e visualização de mapas bibliométricos e análise de métricas como citações de documentos, co-ocorrência de palavras-chave, citações de revistas, citações de autores e de países, além de analisar redes de publicações ao longo dos anos e outras métricas bibliométricas relevantes para compreender a estrutura e tendências da produção científica no tema estudado.

O estudo utilizou o software *VOSviewer*® para gerar e visualizar mapas bibliométricos, aplicando o método *Visualization of Similarities (*VOS) para representar graficamente relações como citações e coautorias. Complementarmente, empregou-se o *Microsoft Excel*® para organização, tabulação, análise de dados e criação de gráficos/quadros. O *MapChart*® foi usado para criar mapas personalizados, inserindo e visualizando informações geográficas.

Resultados e Discussão

Análise e categorização da produção científica

A Figura 02 apresenta a evolução das publicações científicas relacionadas à utilização de celulases na hidrólise de resíduos lignocelulósicos para aumento da produção de biogás no período compreendido entre 1986 e 2025. Essa análise teve como base um levantamento realizado na base de dados *Scopus*, a partir do qual foram identificados 106 documentos abordando diversas vertentes temáticas ligadas a resíduos agroindustriais.

Entretanto, para fins deste estudo, foram selecionados 73 artigos científicos, correspondendo a 68,87% do total, por apresentarem maior relevância e alinhamento com a proposta de investigação, centrada na aplicação de celulases na hidrólise de resíduos lignocelulósicos visando à maximização da produção de biogás e metano.

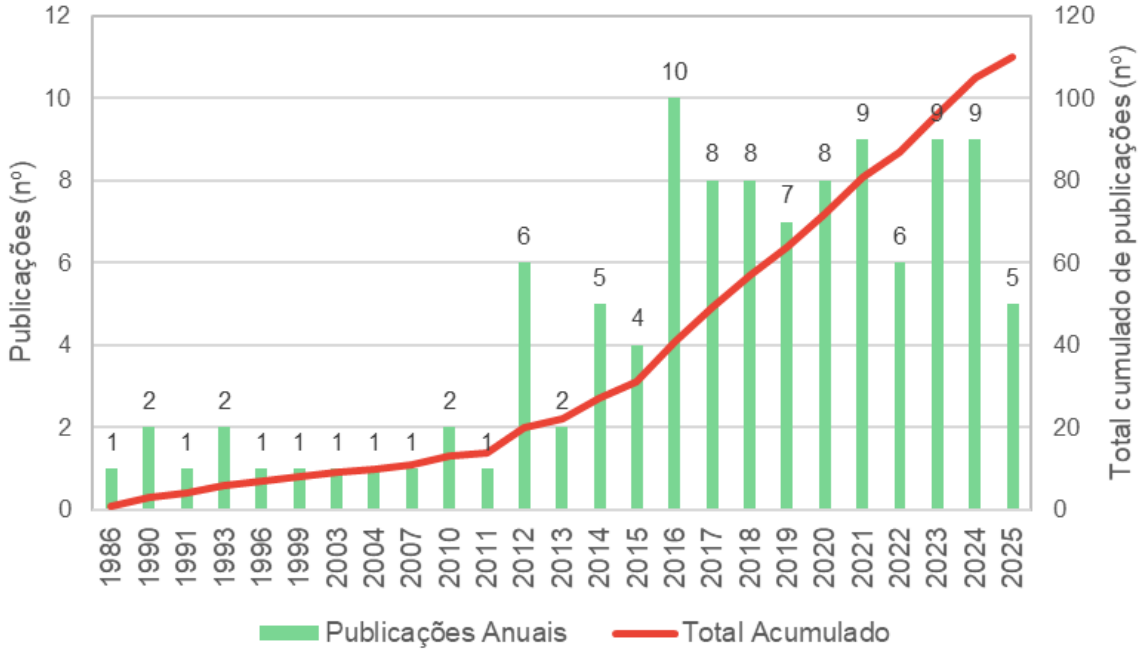


Figura 02: Evolução das publicações científicas sobre o bagaço de malte (1986-2025)
Fonte: Os autores (2026)

A análise da Figura 02 revela uma tendência de crescimento significativo no interesse da comunidade científica pela temática, especialmente a partir do ano de 2012. Durante os primeiros anos da série histórica observados entre 1986 e o início da década de 2000, o número de estudos publicados foi bastante reduzido, com cerca de uma ou duas publicações anuais. Esse baixo volume de produção científica pode ser atribuído à pouca visibilidade do tema na época, à limitada disponibilidade de tecnologias voltadas à bioconversão de resíduos e a um cenário global em que as preocupações com sustentabilidade e reaproveitamento de subprodutos agroindustriais ainda não eram prioritárias nas agendas de pesquisa.

A partir de 2012, observou-se um crescimento expressivo no número de publicações. Esse aumento coincide com o fortalecimento de políticas e discussões internacionais voltadas à sustentabilidade e à mitigação das mudanças climáticas, como o Acordo de Paris, firmado em 2015. Esse contexto impulsionou o desenvolvimento de tecnologias limpas e renováveis.

O pico no número de documentos ocorreu no ano de 2016, com dez publicações, marcando um maior interesse sobre a temática, que reflete o amadurecimento da linha de pesquisa e a consolidação de técnicas aplicadas à biotecnologia de resíduos. A partir desse ano, o número de publicações se mantém num patamar mais elevado, com médias anuais entre sete e nove artigos nos anos seguintes, o que demonstra que o tema não apenas ganhou relevância, mas se firmou como uma área de estudo contínua e estratégica.

Análise de citação de documentos

A Figura 03 mostra a rede bibliométrica dos 73 documentos. O tamanho do círculo representa o número de citações que cada documento recebeu.

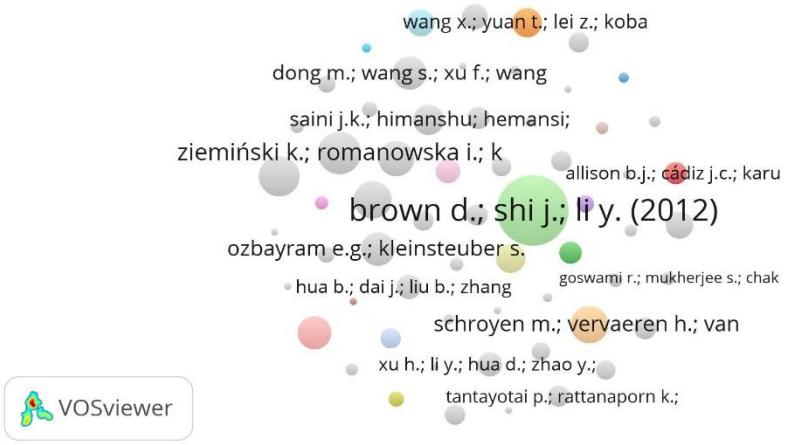


Figura 03: Rede bibliométrica de citação de documentos
Fonte: Os autores (2026)

A Figura 03 representa uma visualização de documentos mais citados, utilizando o *VOSviewer®* para exibir a rede de citações. Cada nó na rede bibliométrica representa um documento científico, e o tamanho do nó está relacionado à quantidade de vezes que esse documento foi citado em outros trabalhos dentro do mesmo campo temático. A proximidade entre os nós indica grau de co-citação, ou seja, documentos que frequentemente são citados juntos.

O documento que se destaca com maior relevância foi Brown D., Shi J. e Li Y. (2012), cujo nome aparece em maior destaque, indicando ser o mais citado da rede. Isso mostra que sua publicação exerce forte influência na área, sendo frequentemente utilizada como base ou referência em estudos posteriores.

As diferentes cores representam agrupamentos de co-citação, os quais refletem núcleos temáticos distintos dentro do campo de pesquisa analisado. Por exemplo, o *cluster* (agrupamento) onde se encontram Ziemiński K. e Romanowska I. indicam uma linha de pesquisa voltada para aspectos bioquímicos ou microbiológicos do aproveitamento de resíduos lignocelulósicos. Outros *clusters*, como o que envolve Wang X. e Yuan T., estão mais voltados a abordagens de engenharia ou tecnologias de conversão energética. A presença de diferentes *clusters* mostra a diversidade temática dentro da área, sugerindo subáreas bem definidas que se comunicam devido a afinidades temáticas e interesses convergentes.

Além disso, a visualização também permite identificar autores emergentes, cujos círculos são menores e estão mais afastados do centro da rede, indicando que, embora ainda não sejam amplamente citados, podem estar associados a linhas de pesquisa mais recentes ou inovadoras. O Quadro 01 apresenta o *ranking* dos 5 autores mais citados.

Posição	Autores/Ano	Nº de citações	Título do artigo	Revista	DOI
1	*Brown D.; Shi J.; Li Y.* (2012)	290	*Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production*	*Bioresource Technology*	https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.051
2	*Ziemiński K.; Romanowska I.; K* (2012)	120	*Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production*	*Waste management*	https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.016
3	*Schroyen M.; Vervaeren H.; Van* (2015)	95	*Effect of enzymatic pretreatment of various lignocellulosic substrates on production of phenolic compounds and biomethane potential*	*Bioresource Technology*	https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.051
4	*Saini J.K.; Himanshu; Hemansi* (2022)	67	*Strategies to enhance enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for biorefinery applications: A review*	*Bioresource Technology*	https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127517
5	*Wang X.; Yuan T.; Lei Z.; Koba* (2020)	61	*Supplementation of O_2-containing gas nanobubble water to enhance methane production from anaerobic digestion of cellulose*	*Chemical Engineering Journal*	https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125652

Quadro 01: *Ranking* dos 5 documentos mais citados (TOP 5)
Fonte: Os autores (2026)

Análise Bibliométrica da citação de países

A análise dos dados dos 73 documentos mostraram que 34 países publicaram documentos relacionados ao tema abordado (Figura 04). Países como China (20 documentos e 488 citações, 24,4 citações/documento) e Estados Unidos (5 documentos e 506 citações, 101,2 citações/documento) se destacam tanto pelo número de citações quanto pela relevância de suas publicações, evidenciando o protagonismo dessas nações em pesquisas de ponta no campo analisado. Na sequência, Alemanha (5 documentos e 247 citações, 54,8 citações/documento), Japão (5 documentos e 167 citações, 33,4 citações/documento) e Índia (10 documentos e 163 citações, 16.3 citações/documento) também apresentam números expressivos, reforçando seu papel ativo na geração de conhecimento. Neste sentido, em relação ao número de citações por documento, destacaram-se os estudos dos Estados Unidos com 101,2 citações/documento, revelando a qualidades dos trabalhos produzidos, apesar da baixa quantidade de publicações.

No geral, o ranking evidencia um panorama multinacional da produção científica, com fortes contribuições de potências tradicionais da ciência, mas também com a presença de países em desenvolvimento, sinalizando um interesse crescente e globalizado na temática analisada.

A Figura 05 apresenta a distribuição geográfica global dos dez países com maior número de publicações científicas, destacando-os em diferentes tonalidades de cor conforme a quantidade de documentos. Países como China e Índia se destacam na liderança em volume de publicações. A coloração mais escura nos mapas representa uma maior concentração de produção científica.

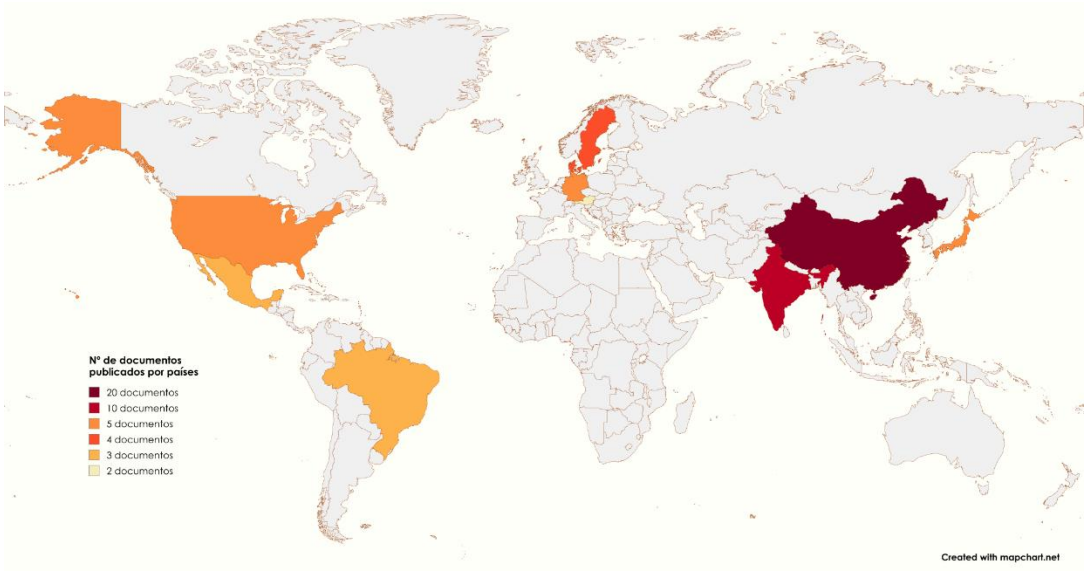


Figura 05: Disposição geográfica de documentos publicados pelos países.
Fonte: Os autores (2026)

A análise do número de publicações científicas relacionadas ao tema revela um Top 3 composto por China, Estados Unidos e Alemanha, países que se destacam significativamente na produção de conhecimento científico e tecnológico.

O compromisso chinês com o avanço da ciência, especialmente em áreas como biotecnologia, reaproveitamento de resíduos e sustentabilidade vem se refletindo na sua extensa produção científica e aplicações práticas. O alto número de citações sugere que os estudos chineses são amplamente utilizados e referenciados por outros pesquisadores, o que indica qualidade e aplicabilidade.

A alta taxa de citação revela que os trabalhos produzidos nos EUA são altamente relevantes, com grande repercussão na comunidade científica internacional.

Na terceira posição está a Alemanha, com 5 documentos publicados e um total de 247 citações. A presença alemã no topo do ranking reforça a tradição do país em pesquisa aplicada, inovação tecnológica e sustentabilidade. Assim como os Estados Unidos, a Alemanha mantém um alto índice de citação por publicação, demonstrando consistência e excelência científica.

Análise de citação de revistas

A Figura 06 apresenta o mapa biométrico de citação de revistas científicas gerado pelo *VOSviewer®*. Cada círculo representa uma revista científica, e o tamanho do círculo está relacionado à quantidade de vezes que essa revista foi mencionada ou utilizada como fonte nas publicações do conjunto analisado. Assim, revistas com círculos maiores, como *Bioresource Technology*, foram mais recorrentes e têm maior influência no tema estudado.

A proximidade entre as revistas indica temáticas semelhantes. Por exemplo, *Bioresource Technology* aparece centralizada e próxima de outras revistas relevantes como *Waste Management (*17 documentos e 998 citações, 58,7 citações/documento) e *Biotechnology for Biofuels* (5 documentos e 267 citações, 53,4 citações/documento), sugerindo que elas compartilham assuntos correlatos, como biotecnologia, reaproveitamento de resíduos e bioenergia. A terceira revista com maior

número de documentos e citações é a *Applied Biochemistry and Biotechnology* (4 documentos e 211 citações, 52,7 citações/documento), e as *Waste Management e Journal of Bioscience and Bioengineering* fecham o ranking das 5 revistas mais citadas, com 2 documentos e 196 citações (98 citações/documento) e 2 documentos e 69 citações (35 citações/documento), respectivamente.

As cores diferenciam *clusters* de revistas com forte inter-relação, podendo indicar subáreas dentro do campo de estudo. Esses *clusters* ajudam a entender as diferentes frentes de pesquisa dentro do tema geral, conforme ilustra a Figura 06.

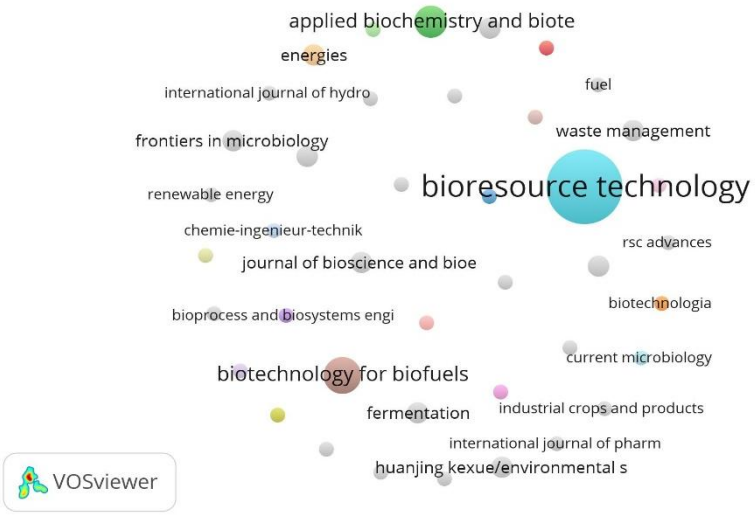


Figura 06: Rede bibliométrica de citação de revistas
Fonte: Os autores (2026)

Análise Bibliométrica de co-ocorrência de palavras-chave

Foram analisadas 40 palavras-chave divididas em oito clusters principais (Figura 07), cada uma representando um conjunto de termos que ocorrem com frequência conjunta em publicações científicas relacionadas ao tema.

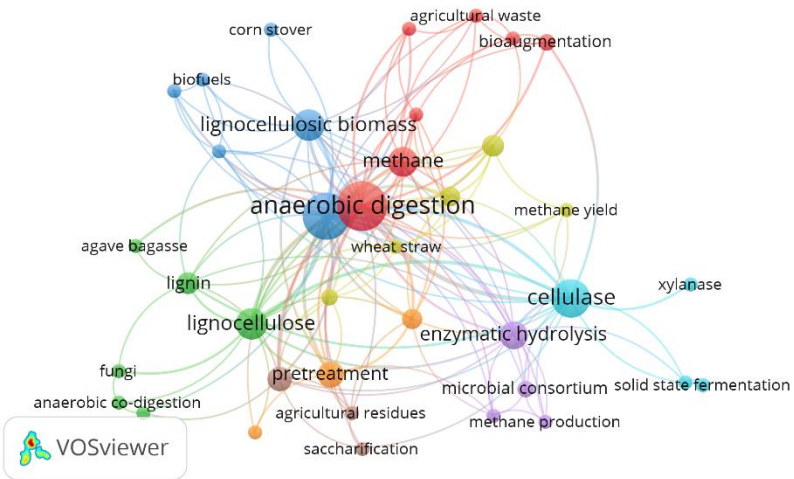


Figura 07: Rede bibliométrica de co-ocorrência de palavras-chave
Fonte: Os autores (2026)

O primeiro *cluster*, destacado em vermelho, representa o núcleo central da temática e está fortemente relacionado à digestão anaeróbica e à produção de metano, com palavras-chave de maior frequência como: *anaerobic digestion* (digestão anaeróbica), *methane* (metano), *agricultural waste* (resíduos agrícolas) e *bioaugmentation* (bioaumentação). Esse grupo reflete os estudos focados na otimização do processo de digestão anaeróbica e no aumento da eficiência da produção de biogás a partir de resíduos orgânicos, especialmente agrícolas.

O segundo *cluster*, em azul, é centrado na biomassa lignocelulósica como matéria-prima, contendo palavras-chave frequentes como *lignocellulosic biomass* (biomassa lignocelulósica), *corn stover* (resíduos de milho), *biofuels* (biogás) e *wheat straw* (palha de trigo). Esse agrupamento representa os esforços científicos voltados à identificação, caracterização e utilização de diferentes tipos de biomassa lignocelulósica no processo de digestão anaeróbica, com foco na conversão eficiente para energia renovável.

O terceiro *cluster,* representado na cor verde, agrupa os termos relacionados à estrutura da biomassa e sua composição química, e as palavras-chave de maior repetição foram: *lignocellulose* (lignocelulose), *lignin* (lignina), *fungi* (fungos), *anaerobic co-digestion* (co-digestão anaeróbica) e *agave bagasse* (bagaço de agave). Este grupo destaca os estudos que investigam os desafios da recalcitrância da biomassa, o papel das enzimas e microrganismos na degradação da lignina e estratégias para facilitar a digestão da matéria orgânica complexa.

Esses três *clusters* são os maiores, mais próximos e mais conectados. Os demais cinco clusters complementam essas abordagens, explorando temas como pré-tratamentos, consórcios microbianos, uso de celulases e técnicas de hidrólise enzimática.

Comentários finais

A análise bibliométrica realizada demonstrou de forma quantitativa o amadurecimento e a relevância estratégica da pesquisa voltada à integração entre enzimas celulolíticas e a produção de biogás. A partir do mapeamento de 73 publicações na base *Scopus*, ficou evidente que o uso de ferramentas como o *VOSviewer*® permitiu identificar com precisão as principais redes de colaboração global e as tendências de investigação que priorizam a economia circular e o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos. Os resultados apontam que, embora consolidada, a área ainda apresenta oportunidades de expansão voltados à otimização de processos de hidrólise enzimática, reafirmando a importância da bibliometria como etapa fundamental para o direcionamento de novos estudos experimentais e para o fortalecimento da gestão sustentável de resíduos agroindustriais.

Agradecimentos

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio institucional, ao Núcleo de Biotecnologia (NUBIOTEC) e ao Laboratório de Bioprocessos e Bioprodutos (LBB) pelo suporte técnico e infraestrutura. De modo especial, agradecemos à Dra. Liliana Andréa dos Santos e à Dra. Tatiana Porto pela orientação dedicada e pelo suporte científico fundamental em todas as etapas de execução deste trabalho.

Referências

BEY, H. et al. Structure and properties of native and unfolded lysing enzyme from *T. harzianum*: chemical and pH denaturation. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 92, p. 860–866, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.08.001.

BOONDAENG, A. et al. Cellulase production under solid-state fermentation by *Aspergillus* sp. IN5: parameter optimization and application. *Heliyon*, v. 10, n. 5, e26601, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26601.

CATER, M. et al. Biogas production from brewery spent grain enhanced by bioaugmentation with hydrolytic anaerobic bacteria. *Bioresource Technology*, v. 186, p. 261–269, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.029

CHILAKAMARRY, C. R. et al. Advances in solid-state fermentation for bioconversion of agricultural wastes to value-added products: opportunities and challenges. *Bioresource Technology*, v. 343, 126065, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126065

DONTHU, N.; KUMAR, S.; PANDEY, N. How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285–296, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070.

HAREERI, R. H. et al. *Aspergillus ochraceus*: metabolites, bioactivities, biosynthesis, and biotechnological potential. *Molecules*, v. 27, n. 19, 6759, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules27196759.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Outlook for biogas and biomethane: prospects for organic growth. Paris: IEA, 2020. Disponível em: https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth.

KAMPERIDOU, V.; TERZOPOULOU, P. Anaerobic digestion of lignocellulosic waste materials. *Sustainability*, v. 13, n. 22, p. 12810, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su132212810.

KUMAR, A.; CHANDRA, R. Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment. *Heliyon*, v. 6, n. 2, e03170, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03170.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 210 p. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1110058/fundamentos-da-digestao-anaerobia-purificacao-do-biogas-uso-e-tratamento-do-digestato.

LOPES, C. D. et al. Caracterização físico-química do bagaço de malte proveniente da indústria cervejeira artesanal da cidade de Dourados - MS. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE, 2., 2015, Dourados. *Anais [...]*. Dourados: SBERA, 2015. Disponível em: https://www.sbera.org.br/2sigera/obras/t167.pdf.

MA, S. et al. Methane production performances of different compositions in lignocellulosic biomass through anaerobic digestion. *Energy*, v. 189, 116190, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116190.

NICOLOSO, R. da S.; BARROS, E. C.; WUADEN, C. R.; PIGOSSO, A. Uso do digestato como fertilizante. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do (eds.). Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2019. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1109216/1/final9157.pdf..

PERWEZ, M.; ASHEH, S. A. Valorization of agro-industrial waste through solid-state fermentation: mini review. *Biotechnology Reports*, v. 25, e00373, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00873.

SINGH, A. et al. Evaluation of cellulase production from *Aspergillus niger* and *Aspergillus heteromorphus* under submerged and solid-state fermentation. *Environmental Sustainability*, v. 4, p. 437–442, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s42398-021-00173-x.

XU, C. et al. Cellulase immobilization to enhance enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: an all-inclusive review. *Carbohydrate Polymers*, v. 319, 121319, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121319.

ZHU, X. et al. Elucidation of the interaction effects of cellulose, hemicellulose and lignin during degradative solvent extraction of lignocellulosic biomass. *Fuel*, v. 327, 125141, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125141.

MAPEAMENTO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE A APLICAÇÃO DA QUITOSANA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS DE PROCESSO NA MINERAÇÃO DE FERRO

1 Maria Eduarda Hartmann das Chagas, 2 Danielli Martins Sanderi, 3 André de Camargo Azevedo
1 Universidade federal do Rio Grande do Sul, e-mail: mariae.hchagas@gmail.com; 2 e-mail: danisanderi@gmail.com;

Palavras-chave: Quitosana; minério de ferro; mapeamento sistematizado.

Resumo

Este estudo apresenta um mapeamento sistematizado da literatura científica acerca da aplicação da quitosana no tratamento de águas e efluentes, com foco nas águas de processo da mineração de ferro, visando identificar o estágio atual da literatura científica na transição para reagentes sustentáveis. A metodologia consistiu em um funil de refinamento na base de dados Scopus, abrangendo o período de 2015 a 2026. Os resultados indicam uma consolidação global da quitosana em tratamentos hídricos generalistas, com o volume de publicações saltando de 98 em 2015 para um pico de 480 em 2025, sob liderança produtiva da China e da Índia. Contudo, identificou-se uma lacuna crítica no setor mineral: enquanto o termo geral "quitosana e tratamento de água" apresenta um montante superior a 3.600 documentos, as buscas específicas para o nicho de minério de ferro revelaram apenas 25 publicações. Embora todos os registros possuam mérito científico, 24 deles foram desconsiderados por não apresentarem aderência temática ao escopo operacional deste estudo, restando apenas uma obra com relevância técnica direta ao beneficiamento de ferro. Essa escassez documental (0,027% do total mapeado) é atribuída a desafios operacionais como a sensibilidade do biopolímero ao pH e a complexidade reológica das polpas em escala industrial. Conclui-se que a pesquisa nesta área é embrionária, representando uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento de técnicas de biofloculação que permitam a substituição definitiva de polímeros sintéticos em circuitos fechados de mineração.

1. Introdução

O minério de ferro é um dos pilares fundamentais para o avanço econômico e tecnológico mundial, dependendo de forma intrínseca dos recursos hídricos, que figuram como insumo vital e onipresente em quase todas as suas operações, principalmente no beneficiamento do minério (SAMPAIO et al., 2010). No cenário brasileiro, essa demanda hídrica é particularmente expressiva, uma vez que a água pode compor até 85% do volume da polpa em etapas críticas, como a flotação (ANA; IBRAM, 2013; SAMPAIO et al., 2010). Diante de cenários de escassez hídrica e de crescentes exigências regulatórias ambientais, a implementação de circuitos fechados para o reuso de água consolidou-se como uma estratégia indispensável para garantir a sustentabilidade e a segurança operacional das usinas (ANA; IBRAM, 2013; KINNUNEN et al., 2021).

Historicamente, no contexto operacional da mineração, uma parcela significativa dessas correntes líquidas era direcionada diretamente para as barragens de rejeitos, onde a água permanecia armazenada juntamente com o material sólido decantado (SAMPAIO et al., 2010). Embora o reaproveitamento hídrico por bombeamento de retorno já ocorresse, a prática limitava-se majoritariamente à separação primária, não havendo uma exigência sistemática para a adoção de tratamentos específicos voltados à reintegração integral da água ao circuito produtivo (SAMPAIO et al., 2010). Entretanto, o cenário regulatório brasileiro sofreu mudanças rigorosas impulsionadas por recentes desastres socioambientais decorrentes do rompimento de barragens, resultando em legislações que alteraram a Política Nacional de Segurança de Barragens e determinaram a descaracterização de estruturas construídas pelo método a montante (TOTTI, 2024). Embora normativas federais (como a Lei nº 14.066/2020) e estaduais (como a Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784/2019) não exijam explicitamente o tratamento avançado das águas de processo, seus severos critérios de segurança intensificaram a necessidade de reduzir drasticamente os volumes hídricos armazenados e os riscos associados às gigantescas estruturas de contenção de rejeitos líquidos (TOTTI, 2024; MUÑOZ et al., 2026).

Diante desse contexto, tornou-se relevante o desenvolvimento de estratégias para maximizar a recuperação e o reuso de água no interior das próprias instalações de beneficiamento (LIMA et al., 2025). O grande obstáculo tecnológico, no entanto, é que a água de processo recirculada frequentemente não possui a qualidade físico-química adequada para o retorno direto às etapas de concentração. A contínua recirculação acumula reagentes orgânicos residuais (como aminas e amido), partículas coloidais e cátions polivalentes (como Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{3+} e Al^{3+}, entre outros) que alteram o potencial zeta das partículas de ganga e minério, provocam o consumo excessivo de depressores e comprometem a estabilidade operacional da espuma na flotação catiônica reversa (OLIVEIRA; MONTE, 2021; SAMPAIO et al., 2010; CRUZ, D. G. et al, 2015; CRUZ, D. G. et al, 2021; DZINGAI, M. et al, 2020; PINHEIRO, V. S. et al, 2012; TANG, M. et al, 2019; WANG, D. et al, 2022). Nesse contexto, o tratamento adequado dessas águas de processo deixa de ser apenas uma etapa operacional e passa a representar um fator crítico para a eficiência e sustentabilidade do circuito mineral.

Contudo, o tratamento dessas águas de processo representa um desafio técnico complexo (LIANG et al., 2021). Os efluentes gerados nas etapas de moagem e classificação apresentam alta carga de sólidos suspensos ultrafinos (lamas), além de uma composição química variável que inclui espécies iônicas dissolvidas e reagentes residuais do circuito de flotação, como aminas e outros coletores (LIANG et al., 2021; SAMPAIO et al., 2010). Atualmente, a indústria depende

predominantemente de polímeros sintéticos, a exemplo das poliacrilamidas (PAM), para os processos de coagulação e floculação dessas lamas (LIANG et al., 2021). Embora apresentem elevada eficiência na rápida sedimentação, as PAM possuem baixa biodegradabilidade, e sua degradação química ou mecânica pode liberar monômeros de acrilamida, compostos com reconhecido potencial neurotóxico, mutagênico e carcinogênico (ORCHARD, 2024).

Como alternativa sustentável alinhada aos princípios da economia circular e da química verde, destaca-se a quitosana, um biopolímero natural extraído da quitina de crustáceos (MATEBESE, 2024). A presença de grupos funcionais hidrofílicos em sua estrutura, especificamente hidroxilas e aminas, confere à quitosana uma versatilidade ímpar, permitindo tanto a interação eletrostática com partículas coloidais carregadas negativamente quanto a quelação de metais pesados (MATEBESE, 2024). No entanto, apesar de sua eficácia ser amplamente demonstrada em escala laboratorial, a transição do uso de biofloculantes para a escala industrial na mineração permanece em estágio embrionário (ORCHARD, 2024). Barreiras como os altos custos de produção em larga escala, a sensibilidade dos flocos ao alto cisalhamento em tubulações e a necessidade de validar o desempenho em polpas reais de alta densidade ainda restringem sua adoção operacional (ORCHARD, 2024).

Nesse contexto, este estudo apresenta uma análise sistematizada da literatura científica, com o propósito de mapear a carência tecnológica e científica associada ao uso da quitosana no tratamento de águas de processo da mineração de ferro. O foco reside em investigar o estado da arte dessa aplicação, buscando não apenas identificar lacunas na literatura atual, mas também subsidiar futuras pesquisas voltadas à substituição de reagentes sintéticos por soluções naturais, contribuindo para uma transição tecnológica mais limpa, segura e eficiente na indústria mineral.

2. Metodologia

O presente estudo fundamenta-se em uma abordagem de natureza exploratória, com aplicação de uma análise bibliométrica sistematizada da literatura científica para o mapeamento da produção relacionada ao uso da quitosana no tratamento de águas de processo na mineração de minério de ferro. A análise concentra-se em indicadores quantitativos básicos, como a frequência de publicações, a evolução temporal e a distribuição geográfica dos estudos, com o objetivo de identificar tendências, lacunas tecnológicas e o estado atual do conhecimento sobre o tema. A coleta de dados foi realizada em abril de 2026, utilizando a base de dados Scopus (Elsevier). A escolha da Scopus justifica-se por sua ampla cobertura multidisciplinar e pelo rigor no processo de indexação de periódicos, sendo reconhecida como uma das principais bases de dados de resumos e citações da literatura científica revisada por pares. No contexto das engenharias e ciências ambientais, a base apresenta metadados consistentes para estudos relacionados a processos de coagulação e floculação aplicados ao tratamento de águas de processo.

Para assegurar transparência, organização e reprodutibilidade na seleção dos documentos, o processo foi conduzido com base nas diretrizes do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), adaptadas ao caráter exploratório e sistematizado do estudo. Nesse contexto, o protocolo foi utilizado como referência para a estruturação das etapas de identificação, triagem e elegibilidade dos trabalhos, não sendo aplicado em sua totalidade. Foram considerados apenas artigos originais e de revisão, de modo a garantir que os estudos analisados passaram por processos de avaliação por pares. A busca foi restrita a publicações em inglês e português, considerando a predominância do inglês na comunicação científica global e a relevância do Brasil no setor de mineração de ferro. Não foi aplicado limite inferior de data, permitindo a identificação de estudos seminais e a análise da evolução histórica da temática.

A estratégia de recuperação dos dados foi estruturada em um modelo de refinamento progressivo, demonstrada através do funil de seleção proposto pelo PRISMA (PAGE et al., 2021), partindo de um escopo amplo para um recorte específico da temática. Foram utilizados operadores booleanos para estabelecer relações entre os termos de busca. Na etapa inicial, utilizou-se a expressão de busca TITLE-ABS-KEY (chitosan AND "water treatment"), no qual o uso de aspas garantiu a recuperação do termo composto. Essa etapa resultou na identificação de 3.680 registros, estabelecendo a base de referência para a análise da produção científica global relacionada ao uso da quitosana em tratamentos hídricos.

Posteriormente, realizou-se o refinamento temático por meio do cruzamento entre o termo quitosana e o contexto da mineração de ferro, incorporando termos associados a efluentes, águas de processo e operações unitárias de tratamento. Para isso, foram utilizadas diferentes variações de expressões de busca com operadores booleanos, visando ampliar a sensibilidade e a abrangência da busca. As estratégias de busca foram estruturadas no campo TITLE-ABS-KEY da base Scopus, incluindo as seguintes combinações: TITLE-ABS-KEY (chitosan AND "iron ore" AND ("effluent" OR "tailings" OR "wastewater")); TITLE-ABS-KEY (chitosan AND "iron ore" AND (flotation OR sedimentation OR coagulation OR flocculation OR "dewatering")); TITLE-ABS-KEY (chitosan AND "iron ore" AND (wastewater OR effluent OR "process water")); e TITLE-ABS-KEY ("chitosan" AND "iron ore") AND ("wastewater" OR "effluent" OR "process water" OR "tailings") AND ("flocculation" OR "coagulation" OR "sedimentation" OR "flotation"). A utilização de múltiplas combinações teve como objetivo minimizar possíveis vieses associados à indexação dos termos e ampliar a recuperação de documentos potencialmente relevantes ao escopo da pesquisa. Como resultado dessa etapa, foram identificados 25 registros inicialmente aderentes ao tema investigado.

A terceira etapa consistiu na análise manual dos 25 documentos pré-selecionados na fase de triagem. Este procedimento teve como objetivo a identificação e eliminação de "falsos positivos", registros que, embora contenham os termos de busca, possuem escopo temático divergente do tratamento de efluentes e águas de processo da mineração de ferro. Os critérios de exclusão técnica foram estruturados conforme o Quadro 1, fundamentado nos temas recuperados na base Scopus.

Quadro 1 - Matriz de exclusão técnica aplicada na seleção dos estudos.

Categoria da Exclusão	Justificativa Técnica para o Descarte	Exemplos de Temas Recuperados	Referências de Apoio (Base Scopus)
Tratamento de Efluentes Têxteis	Foco na adsorção de moléculas orgânicas (corantes) por afinidade química, sem aplicação em separação sólido-líquido de polpas minerais.+1	Remoção de Methyl Orange e Reactive Black 5 utilizando filmes ou resinas de quitosana magnética. +3	(Jiang, Ru et.al, 2012)
Remediação Ambiental de Metais Pesados	Uso da quitosana apenas como suporte para captura de íons metálicos dissolvidos (adsorção), e não como reagente para floculação de partículas de minério.+3	Adsorção de Cobre (Cu2+), Tório (Th4+), Cádmio e Arsênio em águas residuárias generalistas. +2	(Rouhi Broujeni B. et al, 2018); (Liu, Xiaowang et al, 2009)
Aplicações Biomédicas e Nanotecnologia	Pesquisas voltadas à síntese de nanopartículas de ferro para liberação de fármacos, hipertermia ou contraste de ressonância magnética (MRI).	Filmes de quitosana-alginato para alinhamento de nanopartículas de hematita com fins médicos.	(Sreeram, Kalarical Janardhanan et al, 2009)
Ciência dos Materiais e Engenharia Civil	Estudos focados em propriedades estruturais de compósitos, concretos leves ou propriedades elétricas de eletrólitos biopoliméricos.+2	Desenvolvimento de Greencrete, fibras compostas e estudos de corrosão ou geotecnia sem foco em processamento mineral. +2	(Singh, Anup et al, 2023)
Material de Controle ou Referência	Trabalhos onde a quitosana é citada apenas para comparação de eficiência com novos materiais, não sendo o objeto central do estudo de ferro.+3	Comparação entre areias de rejeito modificadas e argilas modificadas com quitosana para remoção de cianobactérias. +3	(Wang, Yichao et al, 2025)

Fonte: Autoria própria, 2026

Após a aplicação dos critérios de exclusão técnica apresentados no Quadro 1, obteve-se o portfólio final de documentos aderentes ao escopo da pesquisa. Esse conjunto de estudos foi utilizado como base para as análises subsequentes, permitindo a avaliação quantitativa e a interpretação do estado da produção científica sobre o uso da quitosana no tratamento de águas de processo na mineração de ferro.

3. Resultados e discussão

3.1. Evolução quantitativa e distribuição geográfica global

Ao avaliar o comportamento da produção científica relacionada à aplicação da quitosana no tratamento de água, com base nos resultados obtidos a partir da expressão de busca de busca TITLE-ABS-KEY (chitosan AND "water treatment") na base de dados Scopus, observa-se um aumento no número de publicações ao longo do período analisado (Figura 1). O total de estudos evoluiu de 98 trabalhos em 2015 para 480 em 2025. A partir de 2020, verifica-se a manutenção de valores superiores a 200 publicações anuais, com registros acima de 300 estudos por ano entre 2021 e 2024, indicando a consolidação da quitosana como um material amplamente investigado em aplicações de tratamento de água. A redução observada em 2026 pode estar associada à limitação temporal da indexação de dados na base consultada, não refletindo necessariamente uma diminuição efetiva da produção científica. Esse comportamento reforça o papel da quitosana como um biopolímero de interesse consolidado, em função de sua biodegradabilidade e de sua atuação em processos de coagulação e floculação.

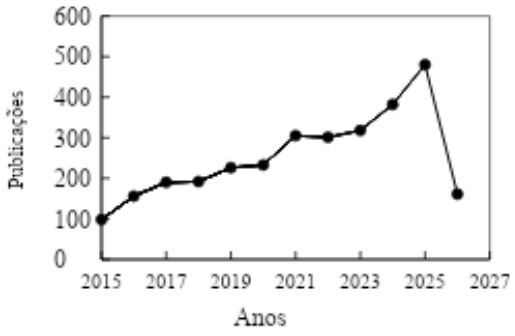


Figura 1 - Evolução do número de publicações ao longo dos anos (2015–2026) relacionadas à aplicação de quitosana no tratamento de água, obtidas a partir da expressão de busca *TITLE-ABS-KEY (chitosan AND "water treatment")* na base de dados Scopus.
Fonte: Autoria própria, 2026

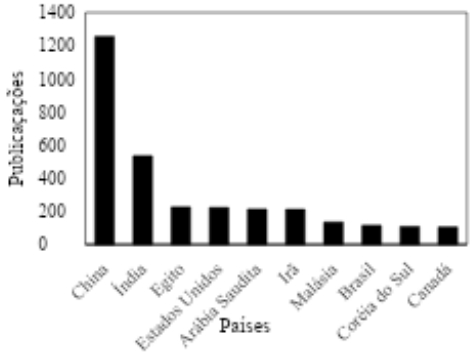


Figura 2 - Distribuição do número de publicações por país/território relacionadas à aplicação de quitosana no tratamento de água, obtidas a partir da expressão de busca *TITLE-ABS-KEY (chitosan AND "water treatment")* na base de dados Scopus.
Fonte: Autoria própria, 2026

Além da evolução temporal, a análise espacial da produção científica permite compreender a distribuição geográfica dessa produção científica, a fim de identificar os principais países responsáveis pelo desenvolvimento de pesquisas nessa temática. Nesse contexto, a Figura 2 apresenta a distribuição do número de publicações por país. A análise da distribuição geográfica das publicações (Figura 2) evidencia uma forte concentração da produção científica em países asiáticos, com destaque para a China, que apresenta o maior número de artigos (1256), seguida pela Índia (535). Outros países como Egito (226), Estados Unidos (223), Arábia Saudita (213) e Irã (212) também apresentam contribuições relevantes. Países como Malásia (135), Brasil (115), Coreia do Sul (108) e Canadá (105) apresentam menor volume relativo de publicações, indicando uma distribuição desigual da produção científica global nessa temática.

A influência da China (1.256 artigos) e da Índia (535 artigos) na produção científica sobre a quitosana (Figura 2) não é meramente quantitativa, mas reflexo de necessidades mineralógicas e estratégias de inovação industrial (FERNANDES et al, 2025). A liderança chinesa está intrinsecamente ligada ao porte de seu parque industrial e ao investimento massivo em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) focado em "Química Verde" (Buckley et al, 2026). O país tem buscado converter materiais de baixo custo, como rejeitos de ferro modificados, em soluções para problemas ambientais complexos, consolidando a quitosana como um biopolímero versátil para processos de coagulação e floculação em larga escala (Buckley et al, 2026).

No caso da Índia, a liderança é impulsionada por desafios mineralógicos específicos, como o beneficiamento de slimes (lamas) de minério de ferro com alto teor de alumina e a necessidade de suprir o rápido crescimento de sua indústria siderúrgica interna (FERNANDES et al, 2025). Estudos indianos (KUMAR, D. et al, 2019) utilizam técnicas avançadas, como a Teoria do Funcional da Densidade (DFT), um método que permite calcular as propriedades de sistemas complexos baseando-se na densidade eletrônica do estado fundamental, em vez de funções de onda. (MARQUES et al). Para o estudo da quitosana, observa-se detalhadamente a distribuição da densidade eletrônica e as características das ligações químicas nas superfícies interativas das moléculas (MARQUES et al; GONÇALVES, 2025). Isso indica que a quitosana atua como floculante seletivo superior, formando ligações coordenadas mais fortes com os átomos de ferro (Fe) do que com os de alumínio (Al). Essa estabilidade na seletividade de ligação pode estar associada à minimização do funcional de energia total do sistema e aos efeitos exatos de troca e correlação mapeados pelas equações da DFT, um nível de precisão que justifica o alto volume de pesquisas voltadas à recuperação de finos de minério nesse país.

A posição relativa do Brasil (115 artigos) sugere uma área ainda a ser explorada, historicamente condicionada pelo modelo de gestão de efluentes baseado em barragens de rejeitos (RODRIGUES et al, 2024). Tradicionalmente, a abundância de grandes estruturas de contenção permitia a sedimentação natural dos sólidos, tornando o tratamento avançado das águas de processo uma demanda menos imediata (RODRIGUES et al, 2024). Contudo, a indústria nacional depende de volumes hídricos expressivos, onde a água compõe até 85% da polpa em etapas como a flotação, reforçando a urgência de estratégias de reúso (RODRIGUES et al, 2024). Entretanto, o cenário regulatório brasileiro sofreu mudanças rigorosas impulsionadas por recentes desastres socioambientais, resultando em legislações que alteraram a Política Nacional de Segurança de Barragens (RODRIGUES et al, 2024) e determinaram a descaracterização de estruturas construídas pelo método a montante (RODRIGUES et al, 2024). Embora normativas federais (como a Lei nº 14.066/2020) e estaduais (como a Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784/2019) não exijam explicitamente o tratamento avançado, seus severos critérios de segurança intensificaram a necessidade de reduzir drasticamente os volumes hídricos armazenados (RODRIGUES et al, 2024).

Este novo paradigma legal atua como um catalisador para que as pesquisas em biofloculantes sejam incentivadas no Brasil. A transição para circuitos fechados e o abandono de barragens líquidas exigem reagentes que garantam a adequação físico-química imediata da água para o reúso, sem comprometer etapas sensíveis como a flotação. Assim, o Brasil detém a oportunidade estratégica de liderar a aplicação industrial da quitosana e dos reagentes biodegradáveis (CARVALHO et al, 2025), convertendo a atual lacuna bibliográfica em um diferencial competitivo sustentável e em um pilar de responsabilidade ambiental para o setor mineral no século XXI.

3.2. O funil de seleção e as limitações da estratégia de busca

Para complementar a análise global da produção científica, torna-se necessário avaliar o comportamento dos dados em um nível mais específico, considerando o recorte temático da mineração de ferro. Nesse contexto, a aplicação da estratégia de refinamento bibliográfico, estruturada em modelo de funil de seleção, permite analisar a redução progressiva do universo de publicações até o nicho de interesse deste estudo.

A partir desse processo, observa-se que a transição de um escopo geral para um recorte específico resulta em uma redução significativa do número de registros, conforme apresentado na Tabela 1. A base inicial de 3.680 publicações é reduzida para 25 documentos potencialmente relevantes, evidenciando a baixa representatividade de estudos voltados ao uso da quitosana no contexto do processamento de minério de ferro.

Tabela 1 – Comparativo quantitativo de publicações indexadas na base Scopus: correlação entre a abrangência das expressões de busca e o nicho do uso de quitosana no tratamento de águas na mineração de ferro.

EXPRESSÕES DE BUSCA	Artigos encontrados	Artigos de interesse
1. Quitosana + tratamento de água (geral)	3680	-
2. Quitosana + minério de ferro + efluentes e rejeitos	5	0
3. Quitosana + minério de ferro + processos de separação e tratamento	7	1

4. Quitosana + minério de ferro + águas de processo e efluentes	3	0
5. Quitosana + minério de ferro + tratamento integrado (processos, águas e rejeitos)	10	1

Fonte: Autoria própria, 2026

É de relevância ressaltar que a precisão desses resultados está intimamente ligada à estratégia de busca e à indexação de metadados na base Scopus. A grande maioria dos documentos recuperados inicialmente foi desconsiderada após uma triagem manual, motivada pela identificação de recorrentes "falsos positivos". Observou-se que a versatilidade química da quitosana gera um elevado volume de ruído bibliográfico, onde o minério de ferro é citado apenas de forma tangencial ou divergente do escopo de beneficiamento mineral. Após o processo de elegibilidade, restou-se um portfólio técnico restrito, onde várias expressões de busca convergiram para o mesmo registro seminal de Ali, S. Akbar, 2010. Esta convergência demonstra a existência de uma lacuna: a pesquisa voltada especificamente ao contexto produtivo do minério de ferro representa uma pequena fração de aproximadamente 0,027% do montante global de estudos sobre o polímero. Adicionalmente, torna-se necessário levantar a hipótese de que a escassez documental identificada possa estar associada a limitações ligadas a indexação nas bases de dados consultadas. É possível que estudos tecnicamente relevantes utilizem nomenclaturas genéricas para as matrizes de minério de ferro ou que a quitosana seja citada apenas como um reagente secundário, dificultando sua recuperação integral pelas expressões de busca utilizados nesta revisão. Este cenário de escassez documental não indica uma inviabilidade do material, mas sim um estágio de desenvolvimento ainda embrionário, fundamentando a urgência de investigações experimentais que fundamentam a transição tecnológica para reagentes sustentáveis.

O trabalho de Ali, S. Akbar, 2010 foi identificado como o principal estudo de interesse real para a pesquisa na área da mineração de ferro. Nesta investigação, os autores exploraram a funcionalização da quitosana via incorporação de grupos catiônicos (CHPTAC) em solução alcalina, buscando correlacionar o peso molecular e a densidade de carga do biopolímero com sua eficiência como biofloculante em suspensões de pó de minério de ferro. Os achados demonstram que, embora a quitosana em sua forma nativa já atue como um agente floculante eficaz para esse tipo de suspensão mineral, o desempenho pode ser otimizado mediante modificações químicas moderadas, ressaltando a complexidade de ajustes precisos para cada aplicação desejada.

3.3. Leis Ambientais como gatilho para novas tecnologias

A identificação de um único estudo datado de 2010, em um total de mais de 3.600 publicações globais sobre o biopolímero, evidencia não apenas uma lacuna temática, mas também indica que a aplicação da quitosana no contexto da mineração de ferro ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento. Esse cenário pode ser associado, em parte, ao histórico do setor mineral, no qual o tratamento avançado de águas de processo não era uma exigência operacional prioritária, em função do uso consolidado de barragens de rejeitos. Nesse contexto, as mudanças recentes no regulamento brasileiro, especialmente após a promulgação da Lei nº 14.066/2020, que reforça os critérios de segurança de barragens e estabelece diretrizes mais rigorosas para sua gestão, tendem a atuar como um fator que induz para o avanço de pesquisas voltadas ao tratamento e reúso de água em circuitos minerais.

3.4. Barreiras técnicas, econômicas e perspectivas de escalonamento

A literatura aponta que a maioria dos resultados positivos relacionados ao uso de biopolímeros e coagulantes naturais é obtida em ensaios em escala laboratorial, havendo uma escassez de testes em escala real que comprovem a eficiência desses materiais sob condições operacionais de estações de tratamento (ANG; MOHAMMAD, 2020). Essa lacuna entre a escala de bancada e a aplicação industrial representa um dos principais entraves para sua adoção, uma vez que a transição para a realidade operacional passa a depender da superação de incertezas logísticas e técnicas, especialmente no que se refere à manutenção de um fornecimento contínuo em larga escala, com qualidade padronizada e estabilidade de armazenamento.

Além dessas limitações operacionais, somam-se desafios de natureza econômica, já que ainda são insuficientes as avaliações que comprovem o custo-benefício dessas tecnologias frente aos coagulantes sintéticos convencionais (ANG; MOHAMMED, 2020). Nesse contexto, a adoção de biopolímeros pela indústria esbarra não apenas em dificuldades técnicas, mas também em restrições econômicas e de escalonamento, evidenciando a necessidade de aprofundar a compreensão das barreiras que limitam o uso da quitosana no tratamento de águas de processo da mineração de ferro.

Alinhado a esses desafios práticos e à lacuna bibliográfica identificada anteriormente, torna-se de grande relevância discutir os fatores específicos que podem estar associados à escassa aplicação da quitosana no contexto da mineração de ferro.

Nesse sentido, destacam-se duas hipóteses principais. A primeira barreira é na transição das bancadas de pesquisa para a realidade das usinas, processo que ainda esbarra em obstáculos econômicos (ORCHARD, 2024). Atualmente, o mercado é dominado por polímeros sintéticos como as poliacrilamidas (PAM), que possuem uma base de dados técnicos consolidada e custos de produção otimizados (ORCHARD, 2024). O desenvolvimento de biofloculantes em escala industrial enfrenta o desafio dos custos de produção em larga escala e a necessidade de validar a eficiência do biopolímero em suspensões reais complexas, que apresentam alta concentração de sólidos (ORCHARD, 2024). Sem investimentos que visem o escalonamento da produção de quitosana, a indústria mineral tende a manter a dependência de reagentes petroquímicos, apesar de sua baixa biodegradabilidade e toxicidade (ORCHARD, 2024).

A segunda hipótese foca na especificidade química da quitosana nativa, da qual a eficácia é altamente dependente de um meio ácido para a protonação de seus grupos funcionais (Jiang & Xu, 2017; ORCHARD, 2024). A literatura destaca que essa

característica representa uma limitação prática, já que grande parte das operações de beneficiamento de minério de ferro, como os circuitos de flotação reversa, ocorrem tipicamente em meios fortemente alcalinos, frequentemente com pH superior a 9 (Jiang & Xu, 2017; ORCHARD, 2024). Embora o tratamento de águas de rejeito permita teoricamente o ajuste de pH, a aplicação dessa estratégia em extensos fluxos industriais gera um dilema operacional. O ajuste de pH em volumes monumentais de efluentes indica a necessidade de um consumo elevado de corretores químicos, o que pode invalidar a sustentabilidade econômica e ambiental do processo.

Como a água tratada deve retornar ao circuito fechado para garantir a segurança hídrica, alterações bruscas de pH ou aumento da carga iônica na água de recirculação podem prejudicar etapas sensíveis do beneficiamento como a flotação (KINNUNEN et al., 2021; SAMPAIO et al., 2010). Nesse contexto, o estudo de Ali, S. Akbar demonstra ser uma exceção, ao investigar a funcionalização da quitosana com a incorporação de grupos catiônicos (CHPTAC). A pesquisa provou que a modificação química é necessária para que o biopolímero mantenha o desempenho em soluções alcalinas, evidenciando que o fomento à pesquisa sobre a aplicação da quitosana no tratamento de águas da mineração de ferro possibilita o desenvolvimento de inovações tecnológicas fundamentais para tornar o processo técnica e economicamente viável.

A baixa densidade de publicações nessa temática pode ser interpretada como um fator limitante para o avanço tecnológico no setor, uma vez que reduz a disponibilidade de dados experimentais e referências aplicadas ao contexto industrial. Nesse sentido, o desenvolvimento de investigações científicas direcionadas torna-se de extrema importância para a compreensão de desafios operacionais associados ao uso da quitosana em sistemas reais. Entre esses desafios, destacam-se a necessidade de avaliar a estabilidade dos flocos formados sob condições de alto cisalhamento, típicas de sistemas de bombeamento industrial (ORCHARD et al., 2024), bem como a validação do desempenho do biopolímero em suspensões complexas que contêm reagentes residuais de flotação, como aminas e ácidos graxos (ANA; IBRAM, 2013; LIANG et al., 2021). Esses aspectos indicam que a ampliação do conhecimento técnico-científico sobre o tema pode contribuir para o desenvolvimento de soluções mais robustas e adaptadas às condições operacionais da indústria mineral.

Conclusões

As evidências compiladas nesta análise sistematizada da literatura científica consolidam a existência de uma lacuna na literatura científica global: o uso da quitosana no beneficiamento de minério de ferro permanece em estágio embrionário. Embora a produção científica geral sobre o biopolímero apresente uma tendência de crescimento, com pico de publicações registrado em 2025, a aplicação específica no contexto da mineração de ferro representa uma fração de aproximadamente 0,027% do volume total de estudos mapeados. O impacto deste estudo reside na identificação de uma oportunidade relevante de pesquisa e desenvolvimento. Do ponto de vista científico, a validação da quitosana como agente floculante em suspensões minerais pode viabilizar o desenvolvimento de modificações estruturais capazes de superar limitações associadas aos polímeros sintéticos. Nesse sentido, essa transição tecnológica pode contribuir para a implementação de circuitos fechados de reúso de água, em consonância com as crescentes exigências de segurança hídrica e com o processo de descaracterização de barragens no Brasil.

É necessário reconhecer que os resultados obtidos estão ligados às escolhas metodológicas desta pesquisa. Primeiramente, o uso exclusivo da base de dados Scopus, embora justificado por seu rigor técnico, impõe uma limitação ao possivelmente omitir registros relevantes presentes em repositórios regionais ou bases de patentes. Somado a isso, a aplicação de filtros linguísticos restringindo a busca aos idiomas inglês e português pode ter excluído contribuições fundamentais de grandes produtores minerais, como Rússia e China, que possuem um volume expressivo de publicações em suas línguas nativas. Por fim, a especificidade das expressões de busca adotada, ao focar em termos exatos, pode não ter capturado estudos que utilizam nomenclaturas correlatas ou subprodutos da quitina não identificados pelos descritores selecionados.

Em suma, a superação da atual lacuna científica exige que o setor mineral brasileiro assuma o protagonismo nessa inovação, convertendo o conhecimento acumulado em protocolos operacionais de larga escala. O avanço tecnológico necessário não visa apenas a eficiência técnica, mas a garantia da resiliência operacional em um cenário de escassez hídrica e alta demanda de preservação ambiental. O Brasil contém o potencial para transformar esse vazio bibliográfico em um diferencial competitivo sustentável, consolidando uma mineração de menor impacto ambiental para o século XXI.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) pelo suporte institucional. Agradecem também ao CNPq pelo financiamento de bolsa de Iniciação Científica e à CAPES pelo financiamento por meio de bolsas de pós-graduação e custeio no âmbito do PROEX/PPGE3M, processo nº [88881.844968/2023-01].

Declaração de uso de Inteligência Artificial

Os autores declaram que utilizaram o ChatGPT (OpenAI, versão GPT-5) exclusivamente como ferramenta de apoio para correção gramatical, revisão linguística e aprimoramento da clareza textual do manuscrito.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil); INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: ANA; IBRAM, 2013.

ALI, S. A. et al. Flocculation performance of modified chitosan in an aqueous suspension. Antigo Journal of Applied Polymer Science, 2010.

ANG, W. L; MOHAMMAD, A.W. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment, 2020

BUCKLEY, T.; POLLARD, M. Raw Power: China locks-in global dominance of critical minerals and metals with $120bn outbound investment surge. Sydney: Climate Energy Finance, 2026.

CARVALHO, T. S. C. et al. Uso da quitosana na biorremediação do derramamento de óleo: o potencial produtivo e biotecnológico brasileiro. Conhecimento em Rede: Explorando a Multidisciplinaridade 3ª Edição. Rio de Janeiro: Impacto Editora, 2025.

CRUZ, D. G. et al. Influence of Mn2+ ion in reverse cationic flotation of iron ore. REM: Revista Escola de Minas, 2015.

CRUZ, D. G. et al. Efeito dos íons Ca2+ e Mg2+ na flotação catiônica reversa de minério de ferro itabirítico. HOLOS, 2021.

DZINGAI, M. et al. Simulating the Effect of Water Recirculation on Flotation through Ion-Spiking: Effect of Ca2+ and Mg2+. Minerals, 2020.

ELWAKEEL, K. Z. Removal of Reactive Black 5 from aqueous solutions using magnetic chitosan resins. Journal of Hazardous Materials, 2009.

FERNANDES, P. D. et al. Descarbonização na indústria siderúrgica: oportunidade para agregar valor e aumentar a competitividade. BNDES Set., Rio de Janeiro, 2025.

GONÇALVES, M. A. Aplicações da Química Computacional na Catálise Heterogênea: uma Revisão. Revisão. Revista Processos Químicos, 2025.

JIANG, W. L.; XU, H. F. Treatment and Recycling of the Process Water in Iron Ore Flotation of Yuanjiacun Iron Mine. Journal of Chemistry, 2017.

JIANG, R. et al. Removal of methyl orange from aqueous solutions by magnetic maghemite/chitosan nanocomposite films: Adsorption kinetics and equilibrium. Journal of Applied Polymer Science, 2012.

JIANG, R. et al. Removal of Methyl Orange from Aqueous Solutions by Magnetic Maghemite/Chitosan Nanocomposite Films: Adsorption Kinetics and Equilibrium. Journal of Applied Polymer Science, 2012.

KINNUNEN, P. et al. Review of closed water loops with ore sorting and tailings valorisation for a more sustainable mining industry. Journal of Cleaner Production, v. 278, 123237, 2021.

KUMAR, D. et al. Chitosan as a selective flocculant for beneficiation of high alumina containing Indian iron ore slimes: A theoretical and experimental study. Conference Paper, 2019.

LIANG, G. et al. Treatment and reuse of process water with high suspended solids in low-grade iron ore dressing. Journal of Cleaner Production, v. 278, 123493, 2021.

LIMA, J. P. M. et al. Sustainable water management in the mining industry: Paving the way for the future. Journal of Water Process Engineering, 2025.

LIU, X. et al. Magnetic chitosan nanocomposites: A useful recyclable tool for heavy metal ion removal. Langmuir, 2009.

MARQUES, M. A. L.; BOTTI, S. O que é e para que serve a Teoria dos Funcionais da Densidade (DFT). Coimbra/Palaiseau: Centro de Física Computacional / Laboratoire des Solids Irradiés.

MATEBESE, F. et al. Mining wastewater treatment technologies and resource recovery techniques: A review. Heliyon, v. 10, e24730, 2024.

MUÑOZ, P. et al. Chemical pretreatment enhances vacuum filtration of slime-rich iron ore tailings. Minerals Engineering, 2026.

OLIVEIRA, F. V.; MONTE, M. B. M. Avaliação da recirculação da água de processo e potencial redução de coletor catiônico na flotação reversa de minério de ferro. Rio de Janeiro: XII Jornada do Programa de Capacitação Institucional - PCI/CETEM, 2023.

ORCHARD, M. J. et al. Development of bioflocculants for mineral processing. Materials Today Sustainability, v. 28, 100965, 2024.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 2021.

PINHEIRO, V. S. et al. Flotação com amina: a importância da qualidade da água. REM: Revista Escola de Minas, 2012.

RODRIGUES, T.; SANDERS FILHO, L. P. A geografia histórica das barragens de rejeito de minério de ferro em Minas Gerais, Brasil. Revista NERA, Presidente Prudente, v. 28, n. 3, e10861, 2024.

ROUHI BROUJENI, B. et al. Preparation and characterization of chitosan/Fe2O3 nano composite for the adsorption of thorium (IV) ion from aqueous solution. Water Science and Technology, 2018.

SAMPAIO, J. A. et al. Água no Processamento Mineral. In: LUZ, A. B. da et al (ed.). Tratamento de Minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Cap. 17.

SINGH, A. et al. Emerging Materials in Advanced Oxidation Processes for Micropollutant Treatment Process. Advanced Oxidation Processes for Micropollutant Remediation, 2023.

SREERAM, K. J. et al. Synthesis of aligned hematite nanoparticles on chitosan-alginate films. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2009.

TANG, M. et al. Effects of Cations/Anions in Recycled Tailing Water on Cationic Reverse Flotation of Iron Oxides. Minerals, 2019.

TOTTI, Emilcy das Graças Guimarães. Reprocessamento de um rejeito de minério de ferro por meio de concentração magnética e flotação. 2024. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

WANG, D. et al. Effects of Al(III) Ions at Magnetite Flotation from Quartz by Dodecylamine Al(III). Minerals, 2022.

WANG, Y. et al. Cyanobacterial bloom removal by rapid flocculation and settling using modified iron tailings sand materials. Journal of Oceanology and Limnology, 2025.

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM ARGAMASSAS: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL À SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO

1Daniela Parissenti, 2Jhulis Marina Carelli, 3Maiara Foiato, 4Rodrigo Limana Salla, 5Helena Paula Nierwinski, 6Barbara Jade Alves

1Universidade do Oeste de Santa Catarina, d.parissenti@gmail.com; 2Universidade do Oeste de Santa Catarina, jhulis.carelli@unoesc.edu.br; 3Universidade do Oeste de Santa Catarina, maiara.foiato@unoesc.edu.br; 4Universidade do Estado de Santa Catarina, rodrigosalla77@gmail.com; 5Universidade do Estado de Santa Catarina, helnier@gmail.com; 6Universidade Federal de Santa Catarina, barbara.jade.alves@grad.ufsc.br

Palavras-chave: Argamassa; Resídio de Areia de Fundição; Resistência à compressão.

Resumo

O resíduo de areia de fundição (RAF) é um subproduto industrial gerado no processo de fundição de materiais metálicos, amplamente utilizado na fabricação de peças para os setores siderúrgico, automobilístico, entre outros. No Brasil, sua elevada geração está associada ao crescimento populacional e à intensificação das atividades industriais, o que torna seu destino final um desafio significativo, sendo comumente encaminhado a aterros sanitários. Nesse contexto, estudos têm demonstrado o potencial do RAF como matéria-prima alternativa na construção civil. Sua incorporação em argamassas contribui para a redução de impactos ambientais e para a diminuição de custos de produção, configurando-se como uma solução sustentável. Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da utilização do RAF por meio da substituição parcial do agregado miúdo em argamassas. Foram analisados teores de substituição de 10%, 30% e 50% em massa de areia natural, utilizando cimento e cal como aglomerantes, em um traço de referência 1:2:9 (cimento:cal:areia). Foram moldados corpos de prova prismáticos para a realização de ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão. Os melhores desempenhos foram observados nos teores de 10% e 30% de substituição. Para a tração na flexão, os valores máximos obtidos foram de 0,67 MPa e 0,86 MPa, respectivamente, enquanto na compressão foram de 1,57 MPa e 1,80 MPa. Os traços com 30% e 50% apresentaram redução na trabalhabilidade, atribuída ao elevado teor de finos do resíduo, exigindo maior relação água/cimento. Embora nenhum traço tenha superado os valores do traço de referência, os resultados indicam viabilidade técnica, especialmente para o teor de 10%, que apresentou menor fissuração em aplicação prática, destacando-se como a substituição mais adequada.

Introdução

Com a crescente conscientização acerca da preservação dos recursos naturais e da redução das emissões de poluentes, a busca por materiais, no setor da construção civil, que sejam de fácil obtenção e apresentem baixo impacto ambiental tem se intensificado. Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de soluções construtivas que conciliem desempenho técnico, viabilidade econômica e menor degradação ao meio ambiente.

A reutilização do resíduo de areia de fundição (RAF) destaca-se como uma alternativa promissora, tanto para mitigar a disposição inadequada desse resíduo quanto para reduzir a dependência de materiais naturais amplamente utilizados, como areias e argilas. Dessa forma, é possível minimizar a extração de recursos naturais e contribuir para a redução dos impactos ambientais associados à construção civil (Coutinho, 2004).

De acordo com a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2008), são gerados aproximadamente 3 milhões de toneladas de RAF no Brasil por ano, sendo a região sul responsável por quase 35% desta quantidade.

Diante desse elevado volume, tem-se intensificado a busca por alternativas para a reutilização RAF, com o objetivo de reduzir sua destinação a aterros sanitários e promover práticas mais sustentáveis. Nesse contexto, destaca-se como alternativa promissora a substituição parcial do agregado miúdo convencional utilizado na produção de argamassas pelo RAF, contribuindo tanto para a mitigação de impactos ambientais quanto para a conservação de recursos naturais.

Este resíduo de fundição é nomeado como areia verde, sendo que em sua composição encontra-se uma porcentagem de areia de sílica, aditivo de carbono, argila e água. Proveniente do uso como molde para a fabricação de peças de aço e ferro fundido, o resíduo utilizado para este artigo é oriundo da empresa Francisco Lindner S/A Industria e Comércio, localizada na cidade de Luzerna – SC. Sua classificação segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) é de Classe II A – Não perigosa e não inerte, conforme dados obtidos na empresa.

Na pesquisa desenvolvida por Gonçalves e Cangussu (2020), foram avaliadas as propriedades de argamassas com a incorporação de RAF. Para isso, foram adotados teores de substituição da areia natural por RAF de 25%, 50%, 75% e 100%, além de um traço de referência composto exclusivamente por areia natural. A análise química indicou elevada concentração de sílica e a presença de elementos como vanádio e lantânio em baixos teores, sem influência significativa no desempenho mecânico. Foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão aos 7, 14, 21 e 28 dias, sendo que os resultados de tração na flexão mostraram melhor desempenho para o teor de 25% aos 21 dias.

Diversos estudos pode ser encontrados com a reutilização do RAF, sendo indicado para composição asfáltica, misturas cimentícias e materiais cerâmicos. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da utilização do RAF em

argamassas, por meio da substituição parcial do agregado miúdo, buscando analisar seu desempenho mecânico e suas implicações quanto à trabalhabilidade, de modo a contribuir para o desenvolvimento de soluções tecnicamente adequadas e ambientalmente sustentáveis.

Metodologia

Para a elaboração dos traços, foram utilizados agregados miúdos, tendo a areia natural como material de referência. Considerando que o objetivo da pesquisa foi avaliar a incorporação RAF em argamassas, procedeu-se à substituição parcial da areia natural por esse resíduo.

A fim de garantir a padronização dos resultados, todos os materiais foram coletados em um único momento, evitando variações que pudessem influenciar o desempenho das misturas. O cimento Portland empregado foi do tipo CP IV-32-RS, da marca Votoran, escolhido por sua adequada aplicação em argamassas de assentamento, elevada resistência a sulfatos e baixo calor de hidratação. Utilizou-se também cal hidratada do tipo II, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade da mistura, reduzir a porosidade e minimizar a ocorrência de manifestações patológicas, como o bolor. A areia natural foi proveniente do Laboratório de Solos da Unoesc. O RAF, por sua vez, foi obtido na empresa Francisco Lindner S/A Indústria e Comércio, localizada em Luzerna – SC, sendo todo o material proveniente de um único lote.

Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, incluindo análise granulométrica e determinação da massa unitária para a areia natural e para o RAF, foram determinados a granulometria, a massa específica, a massa unitária e o teor de umidade. A análise granulométrica foi conduzida conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003); a massa específica foi determinada conforme indica a NBR 16605 (ABNT, 2017); a massa unitária foi obtida de acordo com a NBR 7251 (ABNT, 1982); e o teor de umidade foi avaliado conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016). A Figura 1a apresenta o RAF utilizado na pesquisa e a Figura 1b e 1c parte do ensaio de massa específica do RAF.



(a) (b) (c)

Figura 11: (a) RAF utilizado na pesquisa (b) frasco com querosene (c) Frasco com querosene mais o RAF.
Fonte: Os autores (2025)

O traço adotado para a moldagem dos corpos de prova e aplicação em substrato foi de 1:2:9 (cimento:cal:areia), definido com base no estudo de Gonçalves e Cangussu (2020). Não foram utilizados aditivos nas dosagens, sendo esse traço considerado como referência para comparação com as misturas contendo RAF. Para a incorporação do RAF, foram adotados teores de substituição da areia natural de 10%, 30% e 50%. Com o objetivo de garantir a organização e a precisão das dosagens, os materiais foram previamente pesados em balança de precisão e acondicionados separadamente em recipientes, conforme ilustrado na Figura 2.

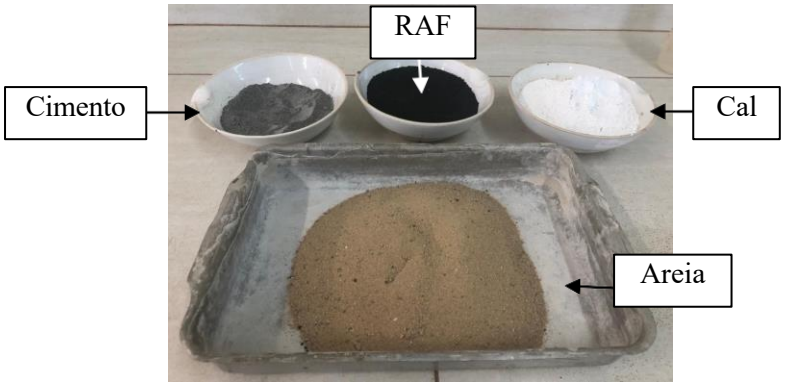


Figura 12: Materiais utilizados para o traço da argamassa com RAF.
Fonte: Os autores (2025)

Foram confeccionados seis corpos de prova (CPs) para cada idade de ruptura, com o objetivo de avaliar as resistências à tração na flexão e à compressão. A moldagem foi realizada em moldes prismáticos metálicos de 4 × 4 × 16 cm, sendo cada molde composto por três CPs, utilizando mesa de adensamento por queda e régua metálica. A preparação da argamassa seguiu os procedimentos estabelecidos na NBR 13276 (ABNT, 2016).

Previamente à moldagem, determinou-se o índice de consistência das argamassas no estado fresco, conforme a ABNT NBR 13276 (ABNT, 2016), por meio da mesa de consistência, sendo o valor obtido pela média dos diâmetros ortogonais após aplicação de 30 golpes.

Os moldes foram previamente lubrificados com óleo mineral para facilitar a desmoldagem. O preenchimento ocorreu em duas camadas, com 30 golpes de adensamento cada, seguido do rasamento com régua metálica.

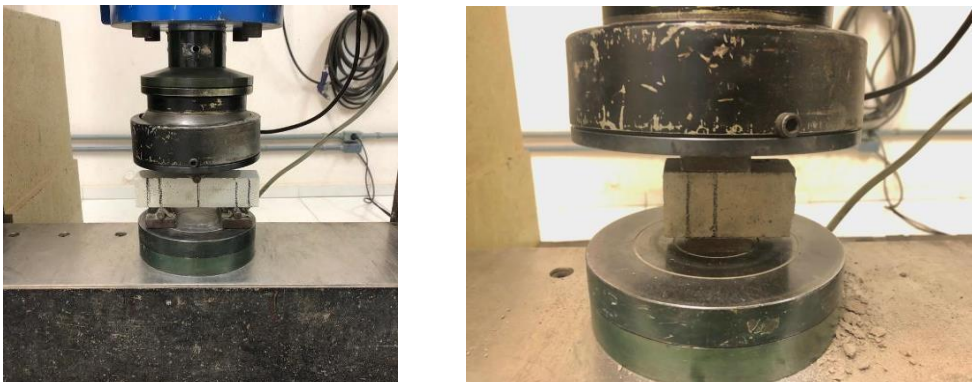
Os corpos de prova permaneceram nos moldes por 48 horas, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). Para os traços com 30% e 50% de substituição RAF, observou-se maior tempo de endurecimento, sendo necessário estender esse período para 5 a 7 dias. Após a desmoldagem, a cura foi realizada ao ar, em ambiente de laboratório. Os corpos de prova moldados são apresentados nas Figura 3a sendo o traço referência, Figura 3b o traço com 10% de substituição, Figura 3c traço com 30% de substituição e a Figura 3d traço com 50% de substituição.



(a) (b) (c) (d)

Figura 13: (a) Traço referência (b) Traço com 10% RAF (c) Traço com 30% RAF (d) Traço com 50% RAF.
Fonte: Os autores (2025)

A determinação das resistências à tração na flexão e à compressão foi realizada conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), no laboratório da Unoesc Joaçaba – SC. Os ensaios foram conduzidos aos 14, 21 e 28 dias, utilizando máquina universal da marca EMI, com capacidade de até 300 kN. Para a tração na flexão, foram ensaiados três corpos de prova, cujas metades resultantes foram posteriormente utilizadas nos ensaios de compressão, totalizando seis amostras por idade. As Figuras 4a e 4b apresentam a execução dos ensaios.



(a) (b)

Figura 14: (a) Ensaio de tração na flexão (b) Ensaio de compressão.
Fonte: Os autores (2025)

A aplicação prática da pesquisa foi realizada em substrato conforme a NBR 7200 (ABNT, 1998), em um muro de alvenaria cerâmica localizado em Joaçaba – SC, com dimensões de 0,70 × 5,00 m e incidência de aproximadamente 5 horas diárias de insolação direta. O substrato já apresentava chapisco e encontrava-se limpo, atendendo às recomendações normativas.

Os traços utilizados foram os mesmos do laboratório, sendo a argamassa preparada *in loco*, com materiais previamente pesados em balança de precisão e mistura manual em carrinho de mão. Foram aplicados apenas os traços de referência, 10% e 30% de substituição, uma vez que o traço com 50% apresentou baixa resistência à compressão, inviabilizando sua utilização.

Cada traço foi executado em uma área de 0,70 m², com espessura de 2 cm. A execução do emboço iniciou-se com a fixação de taliscas para controle de espessura, nivelamento e prumo, seguida da execução das mestras. Após seu enrijecimento, realizou-se o lançamento da argamassa com colher de pedreiro, retirada das taliscas, preenchimento dos vazios, regularização com régua e posterior sarrafeamento, conforme ilustrado nas Figuras 5a, 5b e 5c.



(a) (b) (c)

Figura 15: (a) Aplicação - Traço de referência (b) Aplicação - Traço de 10% (c) Aplicação - Tração de 30%
Fonte: Os autores (2025)

Resultados e Discussão

Com relação a caracterização física dos materiais, os valores encontrados para a areia natural em relação à massa unitária foram de 1,527 kg/dm³. Segundo Basílio (1995, apud. MEIER, 2011), a maioria dos agregados miúdos que produzem misturas cimentícias possuem massa unitária próxima a 1,5kg/dm³, sendo assim o valor atingido vem de encontro com o autor.

Com relação a caracterização do RAF, massa específica de 2,44 g/cm³, massa unitária de 1,24 g/cm³, o teor de umidade de 1,54%, entretanto um teor de umidade abaixo de 2% é pouco significativo para a produção de argamassas (UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, 2012).

As definições da relação a/c dos traços das argamassas foram estabelecidas por meio da trabalhabilidade, na Tabela 1 pode se observar a relação a/c utilizada para cada traço.

Traço	Relação a/c
Referência	2,21
10%	2,22
30%	2,23
50%	2,24

Tabela 8: Relação água cimento dos traços.
Fonte: Os autores (2025)

O aumento na relação a/c, apesar de pouco significativo, foi devido à diminuição da trabalhabilidade da argamassa ao aumentar a porcentagem do resíduo no qual possui elevado teor de finos, não alcançando o índice de consistência desejado.

Para o ensaio de índice de consistência, seguiu-se a NBR 13276 (ABNT, 2016). A Tabela 3 demonstra os resultados e média dos índices de consistência obtidos.

Tabela 3: Índice de consistência

Traço	Referência	10%	30%	50%
Índice de consistência (mm)	233	229	230	227
	234	230	232	229
	236	231	233	229
Média (mm)	**234**	**230**	**232**	**228**

Tabela 9: Índice de consistência.
Fonte: Os autores (2025)

De forma geral, observa-se que a incorporação de RAF promove maior variabilidade no comportamento resistente à tração na flexão das argamassas ao longo do tempo, em comparação ao traço de referência. Enquanto a mistura sem substituição apresenta evolução progressiva e consistente da resistência com a idade, os traços com RAF exibem respostas menos uniformes, com ganhos e reduções mais acentuados entre as idades analisadas conforme demonstrado na Figura 6.

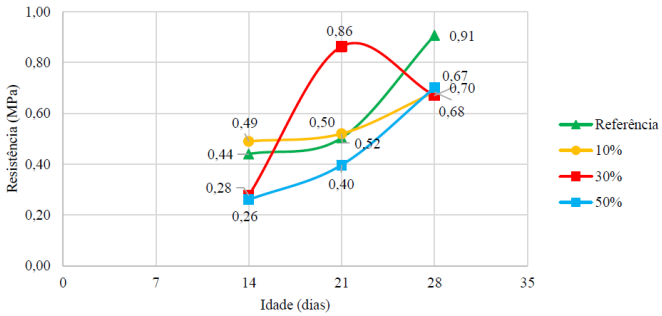


Figura 16: Resultados da resistência à tração na flexão.
Fonte: Os autores (2025)

Dentre os traços com substituição, o teor de 30% se destaca por apresentar o maior valor de resistência aos 21 dias, superando significativamente os demais, o que indica um possível efeito positivo da fração fina do resíduo no empacotamento das partículas e na matriz cimentícia em idades intermediárias. No entanto, esse mesmo traço apresenta redução aos 28 dias, evidenciando um comportamento não linear, já observado na literatura, como em Gonçalves e Cangussu (2020), podendo estar associado à heterogeneidade do material ou à variabilidade experimental.

O traço com 50% de substituição, por sua vez, apresenta baixos valores iniciais, mas evolução mais expressiva ao longo do tempo, com aumento significativo da resistência entre 14 e 28 dias. Esse comportamento sugere que maiores teores de RAF podem retardar o desenvolvimento inicial das propriedades mecânicas, possivelmente devido ao aumento da demanda de água e à menor reatividade do material, mas ainda assim permitem ganhos posteriores.

Já o traço com 10% apresenta comportamento mais estável, com variações menos abruptas entre as idades, indicando que baixos teores de substituição tendem a preservar a regularidade do desenvolvimento da resistência, ainda que sem ganhos expressivos em relação ao traço de referência.

Os valores de desvio padrão indicam, de modo geral, maior dispersão nos resultados dos traços com RAF, especialmente para o teor de 30%, reforçando a hipótese de maior variabilidade associada à incorporação do resíduo. Esse aspecto evidencia a necessidade de um maior número de repetições experimentais para melhor consolidação dos resultados.

A Tabela 3 apresenta os resultados de tração na flexão, juntamente com o desvio padrão de cada traço.

Traço	14 dias de idade	21 dias de idade	28 dias de idade	Desvio padrão
Referência	0,44	0,50	0,91	0,25
10%	0,49	0,52	0,68	0,10
30%	0,28	0,86	0,67	0,30
50%	0,26	0,40	0,70	0,23

Tabela 10: Resultados da resistência à tração na flexão e desvio padrão
Fonte: Os autores (2025)

O desvio padrão apresentado na Tabela 3 indica que os resultados de resistência à tração na flexão para o traço com 10% de substituição mantiveram-se próximos da média, evidenciando baixa variabilidade e comportamento mais uniforme ao longo das idades analisadas. Embora tenha apresentado maior resistência inicial, o ganho aos 28 dias foi de aproximadamente 40%, resultando em valores próximos aos dos demais traços. Por outro lado, os maiores desvios padrão observados nos demais traços indicam maior dispersão dos resultados e maior influência da idade no valor da resistência.

Em relação aos ensaios de compressão o traço de 50% não atingiu os resultados esperados, apresentando valores de resistência muito baixos, tornando-o desprezível. Rubio e Nogueira (2000, apud OLIVEIRA, 2014, p. 41) citam que a baixa resistência à compressão pode ser explicada devido ao alto teor de finos.

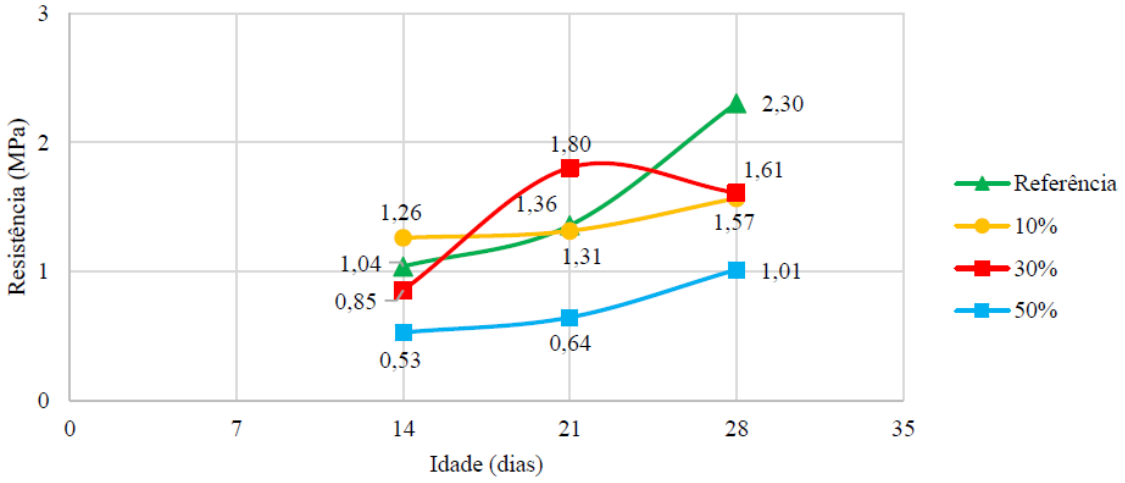


Figura 17: Resultados ensaio de compressão.
Fonte: Os autores (2025)

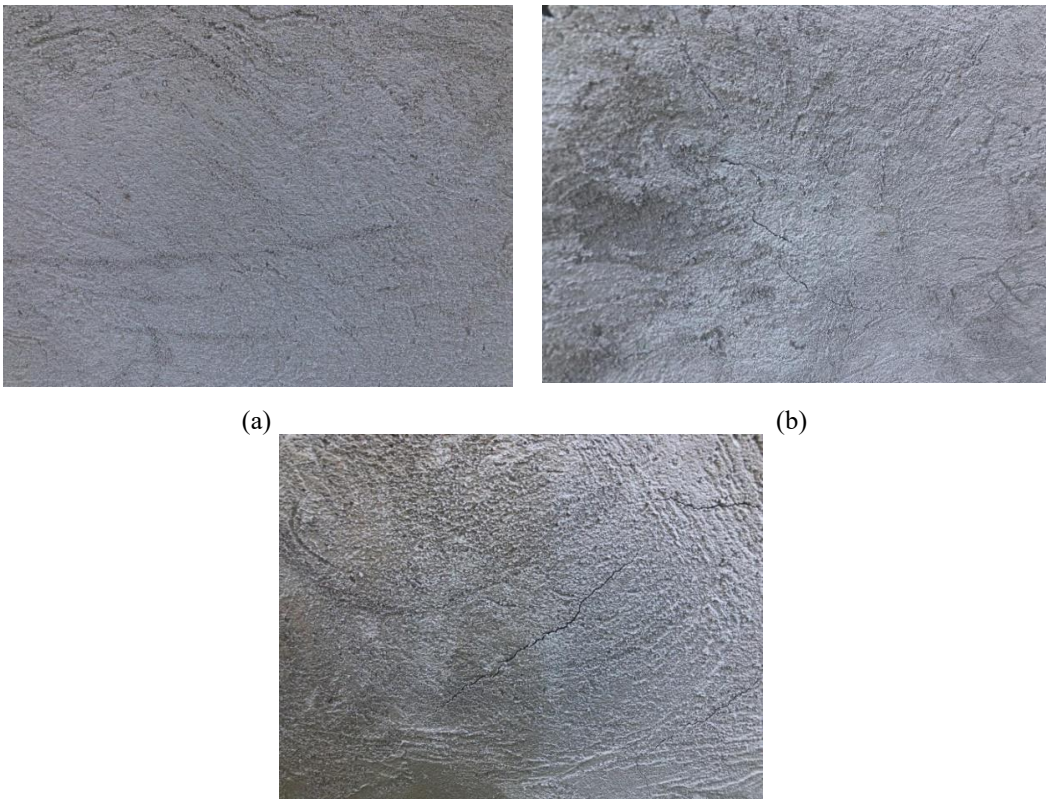
A dosagem com 30% de substituição apresentou, aos 21 dias, resistência superior à observada aos 14 dias, com incremento de aproximadamente 210%. Contudo, aos 28 dias verificou-se uma redução de cerca de 10%, indicando comportamento não uniforme ao longo do tempo. Ainda assim, esse traço manteve desempenho superior em relação aos demais com substituição, evidenciando seu potencial de aplicação. Destaca-se que os ensaios foram repetidos para os traços de 30% e 50%, em nova moldagem, em função da queda observada, sendo os resultados consistentes com os inicialmente obtidos. A Tabela 4 apresenta os valores de resistência à compressão e os respectivos desvios padrão dos traços.

Traço	14 dias de idade	21 dias de idade	28 dias de idade	Desvio padrão
Referência	1,04	1,36	2,30	0,66
10%	1,26	1,31	1,57	0,16
30%	0,85	1,80	1,61	0,50
50%	0,53	0,64	1,01	0,25

Tabela 11: Resultados de resistência à compressão.
Fonte: Os autores (2025)

Os desvios padrão apresentados na Tabela 4 indicam que o traço com 10% de substituição apresentou baixa variabilidade, com resultados próximos à média. O traço com 50% também apresentou comportamento relativamente uniforme, com desvio padrão inferior ao observado para o traço de referência e para o traço com 30%, cujos resultados evidenciaram maior dispersão. Ainda assim, o traço com 30% de substituição destacou-se por apresentar a maior resistência à compressão entre os traços com RAF, indicando seu potencial de aplicação. Embora nenhum dos traços tenha superado os valores de referência, a utilização do RAF mostra-se viável, contribuindo para a redução da destinação de resíduos a aterros sanitários e para sua valorização como matéria-prima na produção de argamassas.

Em relação à aplicação prática, observou-se a ocorrência de fissuração após 7 dias no substrato. O traço com 10% de substituição (Figura 8a) apresentou menor incidência de fissuras em comparação ao traço de referência (Figura 8b), sendo estas perceptíveis apenas a olho nu. Esse comportamento indica que a incorporação de RAF nesse teor contribuiu positivamente para o desempenho da argamassa em campo.



(a) (b)

(c)

Figura 18: (a) Aplicação de 10% RAF (b) Aplicação referência (a) Aplicação de 30% RAF.
Fonte: Os autores (2025)

O traço com 30% de substituição apresentou elevada incidência de fissuração na ordem de 1 mm (Figura 9), comprometendo a integridade superficial e o desempenho estético do revestimento. Conforme a NBR 13749 (ABNT, 2013), tais manifestações patológicas são classificadas como fissuração mapeada, normalmente associada à retração por secagem. Esse comportamento pode ser atribuído ao elevado teor de finos do RAF, que aumenta a demanda de água da mistura, potencializa a retração e favorece o desenvolvimento de tensões internas, resultando na formação de fissuras.

Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a incorporação do resíduo de areia de fundição (RAF) influenciou diretamente a trabalhabilidade das argamassas, especialmente nos maiores teores de substituição. Esse comportamento está associado à granulometria fina do resíduo, que apresentou módulo de finura de 1,92, elevando a demanda de água das misturas

à medida que seu teor foi aumentado. Adicionalmente, o elevado conteúdo de material pulverulento contribuiu para maior perda de água, refletindo negativamente no desempenho mecânico, sobretudo no traço com 50% de substituição, que apresentou baixas resistências à compressão, tornando sua utilização inviável.

Quanto ao desempenho mecânico, o traço com 30% de substituição apresentou os maiores valores de resistência à tração na flexão (0,86 MPa) e à compressão (1,80 MPa) aos 21 dias. Entretanto, observou-se redução aos 28 dias, indicando possível instabilidade no desenvolvimento das propriedades ao longo do tempo. Além disso, sua aplicação em substrato evidenciou fissuração significativa, com aberturas da ordem de 1 mm, o que compromete sua aplicabilidade.

Por sua vez, o traço com 10% de substituição apresentou resistências de 0,68 MPa à tração na flexão e 1,57 MPa à compressão, valores próximos aos obtidos para 30%. Na aplicação prática, esse traço apresentou menor incidência de fissuras, com manifestações pouco perceptíveis a olho nu, superando inclusive o desempenho do traço de referência.

Dessa forma, conclui-se que a substituição de 10% de RAF é a mais adequada, conciliando desempenho técnico e viabilidade prática, além de contribuir para a redução do descarte de resíduos em aterros e para a diminuição do consumo de agregados naturais, configurando-se como alternativa sustentável para a produção de argamassas.

Referências Bibliográficas

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. Resíduos de fundição: solução a caminho. **Revista Fundição & Matérias-primas.** 95ª ed. São Paulo, março, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

COUTINHO NETO, B. Reaproveitamento do Resíduo de Fundição em Misturas Asfálticas. 2004 Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

GONÇALVES, Deyvid Ricardo Ramos; CANGUSSU, Nara Miranda de Oliveira. Utilização de areia de fundição em substituição ao agregado natural na produção de argamassas mistas. **Humanidade & Tecnologia em Revista (FINOM)**, Minas Gerais, v. 22, p. 96-108, jan./jul. 2020. Disponível em: http://revistas.icesp.br/index.php/FINOM_Humanidade_Tecnologia/article/view/1095.

MEIER, Denis. **Análise da qualidade do agregado miúdo fornecido em Curitiba e Região Metropolitana**. Curitiba, 2011, 72 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento Acadêmico de Construção Civil, Curso de Tecnologia em Concreto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ecoville.

OLIVEIRA, Débora Ferreira. **Caracterização dos finos de areia de uma fundição e sua incorporação em argamassas de cimento.** Bauru, 2014, 57 p. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

PROPOSTA DE UM MODELO DE GESTÃO E PLANEJAMENTO SUSTENTÁVEL DE LABORATÓRIOS DE ENSINO E PESQUISA EM QUÍMICA: UMA ABORDAGEM BASEADA NOS PRINCÍPIOS DA *GREEN CHEMISTRY*

1 Matheus de Moura Sampaio, 2 Heloisa Andréa Acciari, 3 Ronaldo Spezia Nunes, 4 Thiago Averaldo Bimestre

1 Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista UNESP, e-mail: matheus.m.sampaio@unesp.br; 2 Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista UNESP, e-mail: heloisa.acciari@unesp.br; 3 Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista UNESP, e-mail: ronaldo.spezia@unesp.br; 4 Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista UNESP, e-mail: thiago.bimestre@unesp.br

Palavras-chave: *green chemistry; chemical waste management; sustainable chemistry*.

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de modelo de gestão e planejamento sustentável para laboratórios de ensino e pesquisa em química, fundamentada nos princípios da Química Verde (*Green Chemistry*). A pesquisa justifica-se pela grande diversidade de insumos e resíduos perigosos gerados no ambiente acadêmico, que representam riscos significativos para usuários, trabalhadores e o meio ambiente. A metodologia empregada baseia-se no Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) e na análise de Fichas com Dados de Segurança (FDS) para quantificar o perigo intrínseco das substâncias utilizadas. Como inovação, o estudo propõe uma escala de pontuação de perigo de três níveis, derivada diretamente das palavras de advertência do GHS ("Perigo", "Atenção" e "Sem Palavra"). Foram analisados 14 guias experimentais de Química Analítica e Inorgânica, abrangendo 62 produtos químicos. Os resultados demonstraram que a substituição de experimentos e reagentes críticos, como o dicromato de potássio, permitiu reduções de até 63,6% no índice de perigo total em disciplinas de Química Analítica. Em Química Inorgânica, a adoção de estratégias como a química em microescala e aulas demonstrativas resultou em uma redução de aproximadamente 75% no quantitativo de reagentes utilizados e resíduos gerados, provando ser um modelo eficaz para a promoção da segurança laboral e sustentabilidade institucional. O modelo proposto apresenta potencial de aplicação em diferentes contextos laboratoriais acadêmicos.

Introdução

A crescente preocupação com os impactos ambientais e os riscos ocupacionais associados ao uso de substâncias químicas tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias voltadas à sustentabilidade em ambientes laboratoriais. O crescimento das atividades científicas e tecnológicas nas últimas décadas tem intensificado o consumo de reagentes químicos em instituições acadêmicas, aumentando proporcionalmente a geração de resíduos e a exposição a substâncias potencialmente perigosas. Nesse contexto, torna-se fundamental adotar práticas que promovam a segurança dos usuários e minimizem os impactos ambientais decorrentes das atividades laboratoriais.

Nesse cenário, a Química Verde (*Green Chemistry*) surge como uma abordagem científica e tecnológica que busca reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas ao longo dos processos químicos, promovendo maior segurança e menor impacto ambiental. Os princípios da Química Verde estabelecem diretrizes para o desenvolvimento de métodos mais seguros e sustentáveis, incentivando a prevenção da poluição, a substituição de reagentes tóxicos e a redução do consumo de recursos naturais (KRASNODĘBSKI, 2024). Além disso, a aplicação desses princípios em ambientes acadêmicos contribui para a formação de profissionais mais conscientes quanto às responsabilidades ambientais e à segurança química.

Nas instituições acadêmicas, laboratórios de ensino e pesquisa utilizam ampla variedade de reagentes químicos, resultando na geração de resíduos potencialmente perigosos. Esses resíduos podem apresentar características tóxicas, corrosivas, inflamáveis ou reativas, representando riscos significativos à saúde humana e ao meio ambiente quando não são devidamente gerenciados. A ausência de estratégias sistematizadas para avaliação de riscos e priorização de intervenções pode levar a práticas inadequadas de armazenamento, manipulação e descarte, aumentando os riscos para usuários e para o meio ambiente (GIOVANNI et al., 2021). Dessa forma, torna-se essencial implementar ferramentas que permitam identificar substâncias críticas e orientar ações preventivas em ambientes laboratoriais.

O Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) constitui uma ferramenta internacionalmente reconhecida para comunicação de perigos químicos, sendo adotado em diversos países e regulamentado no Brasil por normas técnicas específicas. Esse sistema permite a padronização das informações relacionadas aos perigos das substâncias químicas, facilitando a identificação de riscos e a adoção de medidas de controle adequadas. A utilização das informações presentes nas Fichas com Dados de Segurança (FDS) permite identificar perigos físicos, à saúde humana e ao meio ambiente associados às substâncias químicas, contribuindo significativamente para o aprimoramento das práticas de segurança em laboratórios (WALLAU; DOS SANTOS JÚNIOR, 2013).

Estudos recentes têm demonstrado que a aplicação dos princípios da Química Verde em ambientes laboratoriais pode contribuir significativamente para a redução de riscos e geração de resíduos, especialmente por meio da substituição de reagentes perigosos, da implementação de práticas de reutilização e da adoção de técnicas em pequena escala. A utilização de química em microescala, por exemplo, tem sido amplamente reconhecida como uma estratégia eficaz para reduzir o consumo de reagentes e minimizar a geração de resíduos sem comprometer os objetivos didáticos das atividades experimentais. No entanto, ainda há necessidade de ferramentas que permitam avaliar e comparar de forma prática os níveis de perigo associados aos experimentos laboratoriais, possibilitando a priorização de intervenções e a tomada de decisão baseada em critérios objetivos (GOH et al., 2019; POURZAMANI et al., 2019).

Além disso, observa-se que muitos laboratórios acadêmicos ainda carecem de modelos estruturados que integrem conceitos de segurança química, gestão de resíduos e planejamento experimental sustentável. A ausência de metodologias simples e aplicáveis no cotidiano laboratorial dificulta a implementação sistemática de práticas sustentáveis, especialmente em ambientes com grande rotatividade de estudantes e diversidade de atividades experimentais. Dessa forma, torna-se relevante o desenvolvimento de modelos que possam ser facilmente aplicados por professores, técnicos e gestores laboratoriais.

Diante desse cenário, este trabalho propõe um modelo de gestão e planejamento sustentável baseado na classificação de perigos químicos utilizando o sistema GHS e na aplicação de uma escala simplificada de pontuação derivada das palavras de advertência. O objetivo principal é desenvolver uma metodologia que auxilie na identificação de experimentos prioritários para intervenção e na adoção de estratégias sustentáveis em laboratórios acadêmicos, contribuindo para a melhoria das condições de segurança e para a redução dos impactos ambientais associados às atividades experimentais.

Material e Métodos

Seleção dos experimentos analisados

Foram selecionados 14 guias experimentais pertencentes às disciplinas de Química Analítica (10 experimentos) e Química Inorgânica (4 experimentos), totalizando a análise de 62 substâncias químicas utilizadas em atividades laboratoriais de ensino.

As substâncias foram identificadas a partir dos roteiros experimentais e suas respectivas FDS foram consultadas para obtenção das classificações de perigo segundo o sistema GHS. No Brasil, o GHS é aplicado através da NBR 14.725 para a classificação de produtos químicos perigosos (MURCIA et al., 2023; LITHNER et al., 2011).

Classificação das substâncias químicas

A classificação dos perigos foi realizada considerando três categorias principais previstas no sistema GHS, sendo elas perigos físicos, perigos à saúde humana e perigos ao meio ambiente. As palavras de advertência presentes nas FDS foram utilizadas como base para a criação de uma escala simplificada de pontuação composta por três níveis: Perigo (maior nível de severidade), Atenção (nível intermediário) e sem palavra (menor nível de severidade).

Cada substância recebeu uma pontuação conforme sua classificação, sendo posteriormente calculado o índice total de perigo para cada experimento a partir da soma das pontuações individuais dos reagentes utilizados.

Avaliação de estratégias de redução de risco

Após a identificação dos experimentos com maior índice de perigo, foram propostas estratégias de redução de risco, incluindo substituição de reagentes perigosos por alternativas menos tóxicas, eliminação de experimentos considerados críticos, adoção de química em microescala e implementação de aulas demonstrativas conduzidas por professores ou técnicos.

Os índices de perigo foram recalculados após a aplicação das intervenções propostas, permitindo avaliar quantitativamente os ganhos obtidos.

Resultados e Discussão

Avaliação inicial dos experimentos

As Figuras 1 e 2 ilustram a distribuição dos índices de perigo para os experimentos avaliados nas disciplinas escolhidas, permitindo identificar aqueles que demandam intervenções prioritárias.

A análise inicial dos 14 experimentos revelou significativa variação nos níveis de perigo associados às substâncias utilizadas. Entre os reagentes analisados, o dicromato de potássio apresentou os maiores índices de perigo devido às suas propriedades carcinogênicas, mutagênicas e tóxicas à reprodução.

Nos experimentos da disciplina de Química Analítica, destacaram-se os experimentos identificados como 6A e 9A, que apresentaram os maiores índices de perigo total. Esses resultados indicaram a necessidade de priorização dessas atividades para intervenções corretivas.

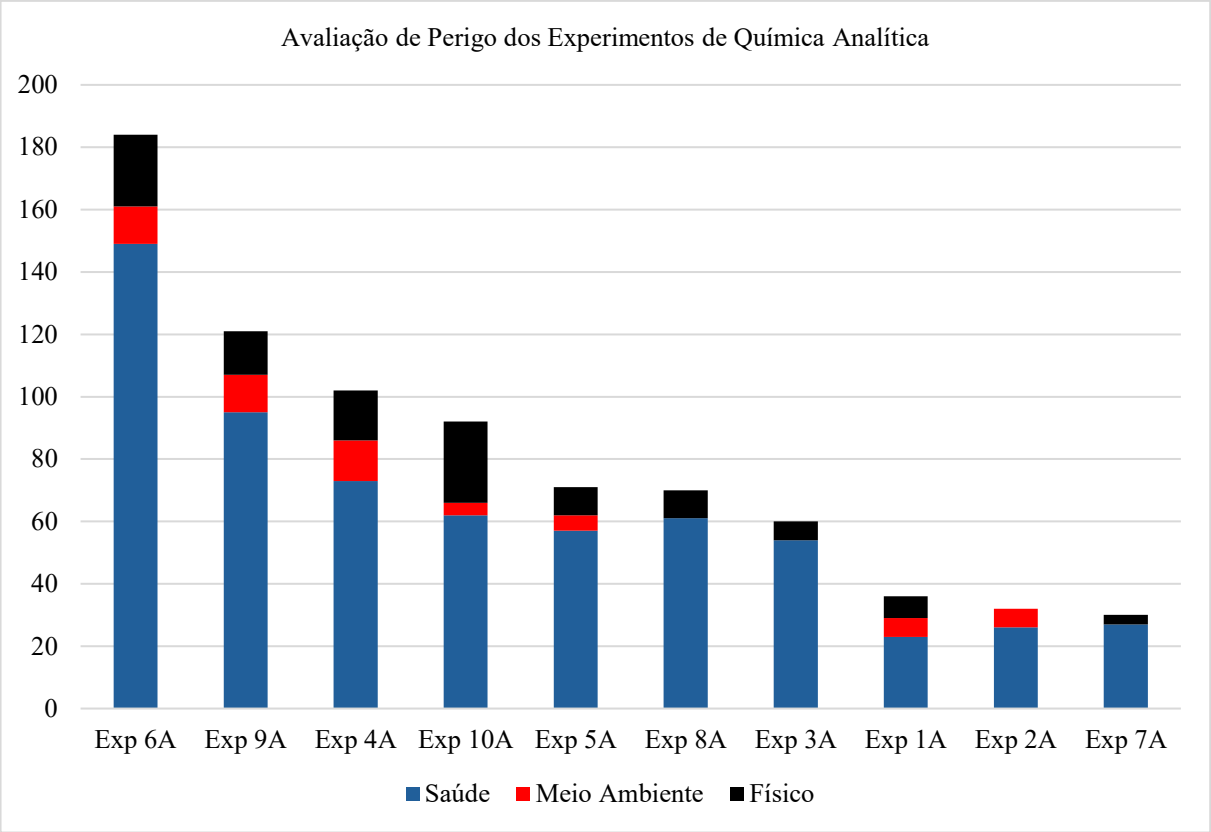


Figura 1 – Gráfico de Avaliação de Perigo dos Experimentos de Química Analítica
Fonte: Elaborado pelo autor, (2026)

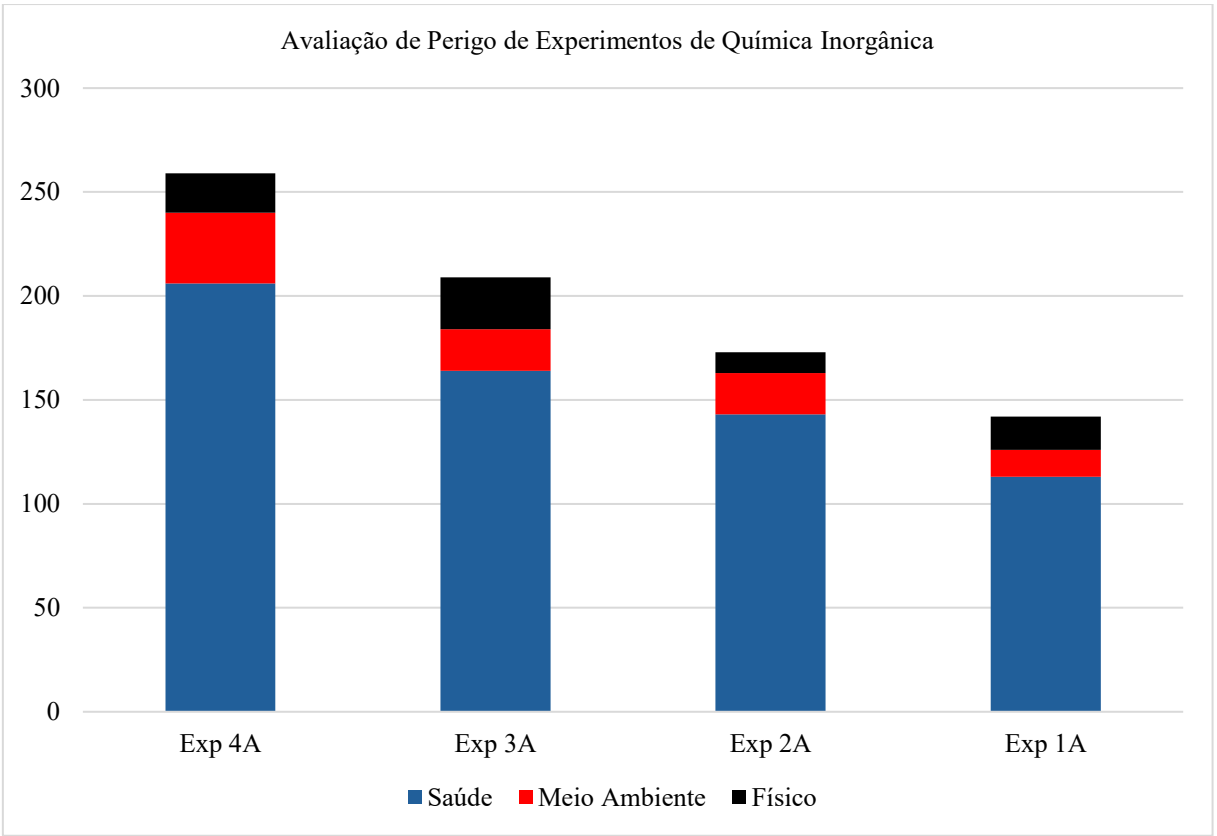


Figura 2 - Gráfico de Avaliação de Perigo dos Experimentos de Química Inorgânica.
Fonte: Elaborado pelo autor, (2026).

Os valores apresentados na Tabela 1 sintetizam os índices totais de perigo calculados para cada experimento de Química Analítica analisado.

Experimento	Saúde	Meio Ambiente	Físico	Índice total	Reagente crítico principal
Exp 6A	149	12	23	184	Dicromato de Potássio
Exp 9A	95	12	14	121	Dicromato de Potássio
Exp 4A	73	13	16	102	Cromato de Potássio
Exp 10A	62	4	26	92	Ácido Nítrico
Exp 5A	57	5	9	71	Hidróxido de Amônio
Exp 8A	61	0	9	70	Ácido Clorídrico / Ácido Acético
Exp 3A	54	0	6	60	Hidróxido de Sódio / Ácido Sulfúrico
Exp 1A	23	6	7	36	Permanganato de Potássio
Exp 2A	26	6	0	32	Sulfato de Cobre Pentahidratado
Exp 7A	27	0	3	30	Hidróxido de Sódio

Tabela 1 – Resumo dos índices iniciais de perigo por experimento de Química Analítica.
Fonte: Elaborado pelo autor, (2026).

Os experimentos de Química Inorgânica possuem, em média, índices de perigo maiores do que aqueles vistos em Química Analítica, mas os reagentes críticos possuem índices significativamente menores.

Os valores apresentados na Tabela 2 sintetizam os índices totais de perigo calculados para cada experimento de Química Inorgânica.

Experimento	Saúde	Meio Ambiente	Físico	Índice total	Reagente crítico principal
Exp 4A	206	34	19	259	Sulfato de Níquel hexahidratado
Exp 3A	164	20	25	209	Nitrato de Chumbo
Exp 2A	143	20	10	173	Tetracloreto de Carbono
Exp 1A	113	13	16	142	Tetracloreto de Carbono

Tabela 2 – Resumo dos índices iniciais de perigo por experimento de Química Inorgânica.
Fonte: Elaborado pelo autor, (2026).

Redução de perigo em Química Analítica

A Figura 3 apresenta a comparação direta entre os índices de perigo antes e após a substituição dos experimentos críticos, evidenciando a eficácia das estratégias propostas.

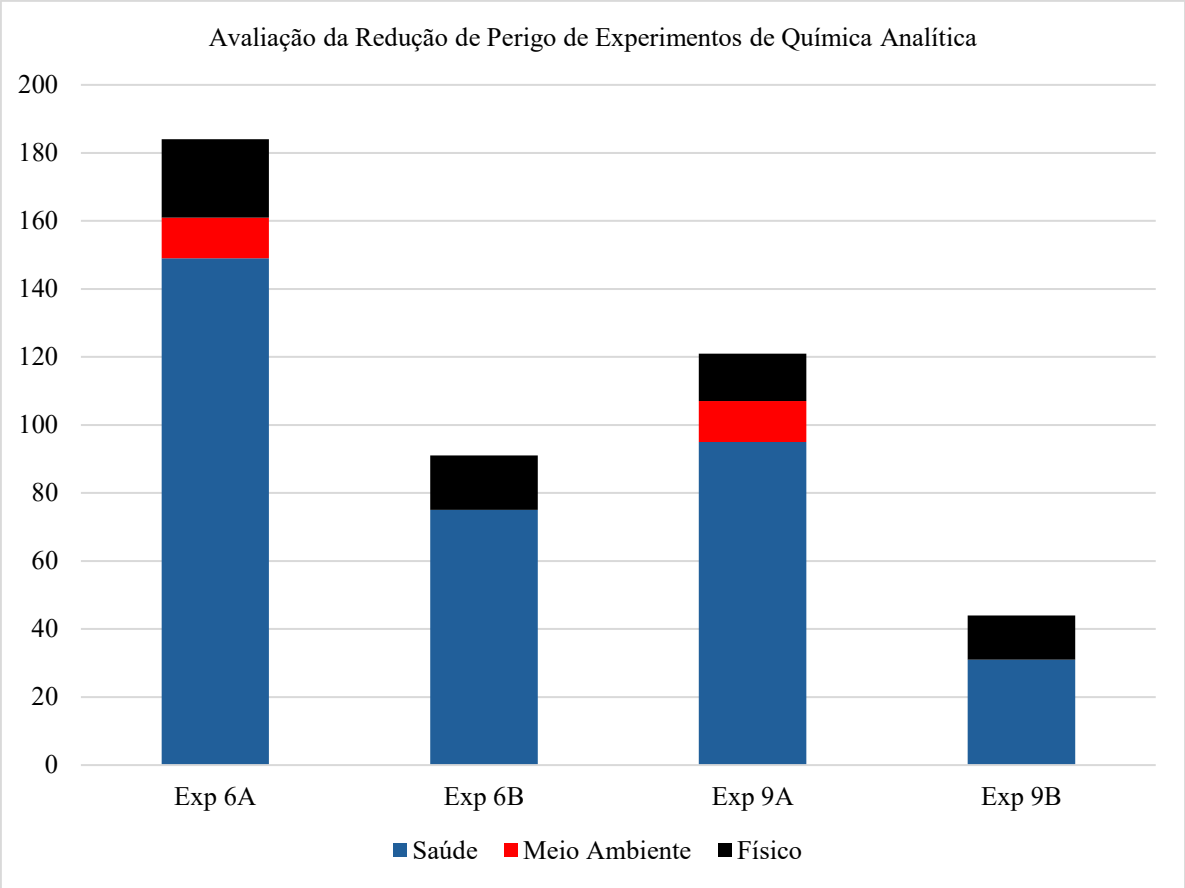


Figura 3 – Avaliação da Redução de Perigo de Experimentos de Química Analítica
Fonte: Elaborado pelo autor, (2026).

A substituição de experimentos contendo reagentes altamente perigosos mostrou-se uma estratégia eficaz para redução dos índices de risco. No caso do experimento 6A, a substituição das técnicas de dicromatometria e permanganatometria por iodometria resultou na redução do índice total de perigo de 184 para 91 pontos, correspondendo a uma diminuição de aproximadamente 50,5%.

Além disso, a substituição do reagente mais crítico permitiu reduzir significativamente a pontuação máxima individual de substâncias perigosas, demonstrando o impacto positivo da seleção adequada de reagentes no planejamento experimental.

A eliminação de experimentos considerados não essenciais também contribuiu para a redução global dos riscos associados às atividades laboratoriais.

Redução de perigo em Química Inorgânica

Nos experimentos da disciplina de Química Inorgânica, a substituição direta de reagentes mostrou-se limitada devido à necessidade de manutenção dos objetivos pedagógicos. Nesse contexto, a adoção de química em microescala e aulas demonstrativas apresentou resultados expressivos.

A aplicação dessas estratégias resultou em reduções médias de aproximadamente 75% no consumo de reagentes e na geração de resíduos químicos. Essa abordagem permitiu manter a qualidade didática dos experimentos ao mesmo tempo em que reduziu significativamente os riscos associados às atividades laboratoriais.

Avaliação do modelo proposto

A Tabela 3 apresenta um resumo comparativo das principais estratégias adotadas e das respectivas reduções obtidas nos índices de perigo (%).

O modelo baseado em uma escala simplificada de três níveis, diretamente relacionados à classificação do GHS, demonstrou ser adequado para a identificação de substâncias críticas e priorização de intervenções. Diferentemente de métodos mais complexos baseados em múltiplas categorias numéricas e critérios regionais, a abordagem proposta apresenta maior facilidade de aplicação e interpretação em ambientes acadêmicos.

A utilização das palavras de advertência do sistema GHS como base para a pontuação mostrou-se eficiente, pois mantém alinhamento com padrões internacionais já consolidados, facilitando sua adoção por diferentes instituições.

Os resultados obtidos evidenciam que a aplicação sistemática desse modelo pode contribuir para a melhoria das práticas laboratoriais e para a promoção de uma cultura de segurança e sustentabilidade em instituições de ensino e pesquisa.

Estratégia aplicada	Experimento	Índice inicial	Índice final	Redução (%)	Observação
Substituição de experimento (Química Analítica)	6A → 6B	184	91	50,54%	Substituição de reagente crítico
Substituição de experimento (Química Analítica)	9A → 9B	121	44	63,64%	Substituição de reagente crítico
Substituição da substância mais perigosa (Química Analítica)	Exp. 6 e 9	85	20	76,47%	Redução do reagente crítico principal
Química em microescala e aulas demonstrativas (Química Inorgânica)	Todos	—	—	≈ 75%	Redução de reagentes e resíduos
Eliminação de experimento	Exp. 1A	36	0	100%	Remoção completa do risco associado

Tabela 3 –Comparação resumida entre estratégias aplicadas e reduções obtidas (%).
Fonte: Elaborado pelo autor, (2026).

Considerações Finais

O modelo de gestão e planejamento sustentável proposto neste trabalho demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a avaliação e redução de riscos associados ao uso de substâncias químicas em laboratórios acadêmicos. A integração dos princípios da Química Verde com o sistema GHS permitiu estabelecer uma metodologia estruturada para identificação de substâncias críticas e priorização de intervenções. A principal contribuição do estudo consiste na proposta de uma escala simplificada de três níveis baseada nas palavras de advertência do sistema GHS, possibilitando uma análise objetiva dos perigos associados às substâncias químicas.

Os resultados demonstraram que estratégias como substituição de reagentes perigosos, eliminação de experimentos críticos e adoção de química em microescala podem reduzir significativamente os índices de perigo e a geração de resíduos químicos, sem comprometer os objetivos pedagógicos das disciplinas. Dessa forma, o modelo proposto apresenta potencial para aplicação em diferentes contextos acadêmicos, contribuindo para o fortalecimento das práticas sustentáveis e para a promoção da segurança em ambientes laboratoriais.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14725. Produtos químicos - Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente - Aspectos gerais do Sistema Globalmente Harmonizado (GHS), classificação, FDS e rotulagem de produtos químicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

GIOVANNI, C.; MARQUES, F. L. N.; GÜNTHER, W. M. R. Resíduos químicos laboratoriais: classificação de perigo pelo GHS e risco no transporte. Revista de Saúde Pública, [s. l.], v. 55, p. 102–102, 2021.

GOH, H. Y.; WONG, W. W. C.; ONG, Y. Y. A Study To Reduce Chemical Waste Generated in Chemistry Teaching Laboratories. Journal of Chemical Education, [s. l.], p. 87–96, 2019.

KRASNODĘBSKI, M. The bumpy road to sustainability: Reassessing the history of the twelve principles of green chemistry. Studies in History and Philosophy of Science, [s. l.], v. 103, p. 85–94, 2024.

LITHNER, D.; LARSSON, A.; DAVE, G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. Science of The Total Environment, [s. l.], v. 409, n. 18, p. 3309–3324, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-011-5862-6_5. Acesso em: 25 mar. 2026.

MURCIA, J. E.; MARTINEZ, S.; MARTINS, V.; HERRERA, D.; BUITRAGO, C.; VELASQUEZ, A.; RUIZ, F.; TORRES, M. Risk assessment and green chemistry applied to waste generated in university laboratories. Heliyon, [s. l.], v. 9, n. 5, p. e15900, 2023.

POURZAMANI, H.; DARVISHMOTEVALLI, M.; AKHYARI, S. H.; HADI, S.; MOMENI, F.; BAKHTIYARI, S. G.; FADAEI, S. Method for quantitative and qualitative evaluation of hazardous waste in laboratories of Isfahan University of Medical Sciences, Iran. MethodsX, [s. l.], v. 6, p. 377–382, 2019.

WALLAU, W. M.; DOS SANTOS JÚNIOR, J. A. O sistema globalmente harmonizado de classificação e rotulagem de produtos químicos (GHS) -uma introdução para sua aplicação em laboratórios de ensino e pesquisa acadêmica. Quimica Nova, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 607–617, 2013. Disponível em: Acesso em: 10 set. 2025.

AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE GÁS DO EFEITO ESTUFA EM LAGOA COM MACRÓFITAS APLICADAS NO POLIMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS

1Gabriela Farias Seben, 2Lindamara Pereira Marques 3Luis Antônio Bueno 4Victor Schneider Lacerda 5 Rodrigo de Almeida Mohedano 6Paulo Belli Filho

1 Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, e-mail: gabrielafseben@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, e-mail: lindamaramarques2021@gmail.com; 3 Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, e-mail:luisbueno.esa@gmail.com; 4 Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, e-mail: victorschnela@gmail.com; 5 Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, e-mail: rodrigo.mohedano@ufsc.br; 6 Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, e-mail: paulo.belli@ufsc.br

Palavras-chave: Gases do Efeito Estufa; Soluções Baseadas na Natureza; Lagoa com Lemnas

Resumo

O tratamento de esgotos é uma fonte relevante de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), tornando necessária a reavaliação de tecnologias quanto a mitigação climática. Este trabalho teve como objetivo quantificar as emissões de CO_2 e avaliar o desempenho de uma lagoa de lemnas (Landoltia punctata) em escala-piloto no tratamento de esgoto doméstico. O estudo foi realizado em uma lagoa experimental em Florianópolis (SC), com análises físico-químicas do efluente (DQO, DBO_5, ortofosfato e nitrogênio). Foram realizadas medições diretas de CO_2, com câmara estática acoplada a um analisador Testo 435, com registros a cada 10 minutos das 8h às 17h. Os resultados demonstraram elevada eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal (90,4%), nitrato (86,6%), nitrogênio total (57,1%) e DBO (55,1%), enquanto a DQO apresentou remoção de 36,6% e o ortofosfato aumentou 47,6%. As emissões de CO_2 exibiram picos nos períodos da manhã e final da tarde, coincidindo com os momentos de transição fotoperíodo. A lagoa de lemnas apresentou elevado potencial para polimento de efluentes, especialmente na remoção de nitrogênio. Porém o manejo do sedimento é necessário para otimizar a remoção de fósforo. Os dados mostraram absorção de CO_2, implicando na redução de sua emissão para a atmosfera e de modo positivo na redução da mudança climática. Os estudos futuros irão incluir medições de CH_4 e N_2O para um balanço completo de GEEs.

Introdução

O acúmulo acelerado de Gases do Efeito Estufa (GEEs) na atmosfera devido a atividades antrópicas, apresenta-se como uma das causas mais agravantes das mudanças climáticas (SEEG, 2024). O tratamento de esgotos é reconhecido como uma fonte relevante de emissões de GEEs, especialmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), cuja geração está diretamente associada aos processos biológicos empregados (Von Sperling, 2002). De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa, o setor de efluentes domésticos no Brasil em 2024 emitiu o total de 25,2 Megatoneladas de CO2 (SEEG, 2026). Nesse contexto, é indiscutível a necessidade de reavaliação das tecnologias utilizadas no tratamento de efluentes, com foco não apenas na eficiência de remoção de poluentes, mas também na mitigação de impactos climáticos.

As Soluções Baseadas na Natureza (SbNs) se mostram como tecnologias alternativas consolidadas para tratamentos de efluentes e mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2022). Em particular, as lagoas de lemnas utilizam macrófitas flutuantes no polimento de esgotos devido à sua efetiva capacidade de remoção de nutrientes, além do alto potencial como uma tecnologia sustentável (Mohedano et al, 2019). As lemnas são angiospermas da subfamília *Lemnoideae*, caracterizadas por sua alta taxa de crescimento e elevada produtividade de biomassa, além de apresentarem potencial de fixação de CO_2 (Mohedano, 2019). Essas plantas contribuem para a remoção de nutrientes por meio da absorção direta de compostos nitrogenados e fosfatados da água, incorporando-os à sua biomassa (Körner & Vermaat, 1998).

Considerando que a tendência é aumentar a implantação de ETEs no Brasil é pertinente avaliar os impactos relacionados com as emissões de GEE. As estações de tratamento de esgoto convencionais apresentam elevado potencial de emissões de (CO_2, CH_4 e N_2O). No entanto, as lagoas de lemnas se apresentam como alternativa na redução destas emissões (Mohedano, 2019). A quantificação e avaliação das emissões desses sistemas são necessárias, a fim de avaliar seu desempenho e seu papel como tecnologia de baixo carbono para o saneamento e na descarbonização deste setor.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de uma lagoa de lemnas aplicada ao tratamento de esgoto doméstico como tecnologia de baixo carbono, através da relação entre a emissão de Gás do Efeito Estufa (dióxido de carbono), a eficiência do polimento de efluente e no combate às mudanças climáticas.

Métodos e Materiais

O estudo foi desenvolvido em um sistema em escala-piloto do Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos na Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis, SC). A lagoa faz parte de uma unidade experimental integrada a um tanque séptico e 3 sistemas de Wetland Construídos (WC), com uma vazão de 800 L.d-1. A Figura 1 apresenta o sistema

experimental, composto inicialmente por um poço de visita e elevatória (1) e tanque séptico (2). Em seguida, o efluente é direcionado para os WCs (3, 4 e 5) e posteriormente, é encaminhado por meio de uma elevatória (6) ao tanque de equalização (7) e, por fim, à lagoa de lemnas (8). As análises foram realizadas na edificação de apoio (9).

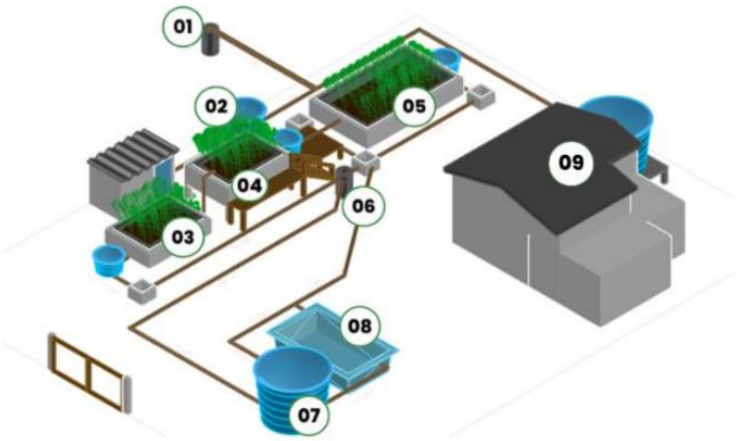


Figura 01: Esquema do sistema experimental de tratamento analisado
Fonte: LABEFLU

A Lagoa com Lemnas, apresentada na Figura 2, foi construída em uma piscina de fibra de vidro, com dimensões 2,40 m de largura, 4,20 m de comprimento, 1,10 m de altura total e 0,45 m de lâmina d'água útil (4.500L de volume útil). A espécie da Lemna utilizada é a *Landoltia punctata*. A alimentação da lagoa é realizada por bateladas de 4.500L do efluente armazenado no reservatório à jusante, com tempo de detenção de 15 dias.



Figura 02: Vista da lagoa de lemnas utilizada na pesquisa.
Fonte: Autoria própria.

Para o monitoramento da lagoa, foram realizadas diariamente análises físico-químicas do efluente no centro da lagoa, em triplicata, conforme metodologia apresentada na Tabela 1, no período de 24 a 27 de março de 2026. O efluente armazenado no reservatório antes da alimentação da lagoa também foi analisado.

Parâmetro	**Metodologia**
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Standard Methods 5220 (APHA Method)
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO_5)	Standard Methods 5210 (APHA Method)
Fósforo Ortofosfato	Standard Methods 4500-P (APHA Method)
Nitrogênio Total	Standard Methods 4500-N (APHA Method)
Nitrogênio Amoniacal (NH_4^+)	Método colorimétrico de Nessler 4500- NH_4^+ C
Nitrato (NO_3^-)	Standard Methods 4500- NO_3^- E (APHA, 2005)
Nitrogênio na biomassa de lemnas	Método Kjeldahl de macrotubos
Fósforo na biomassa de lemnas	Digestão úmida seguida de análise colorimétrica de ortofosfato (diluição de 50 vezes)

Tabela 01: Parâmetros físico-químicos monitorados e respectivas metodologias.

Durante o período de análise, o controle de produtividade da biomassa foi realizado através da colheita de lemnas no primeiro e no último dia, a fim de se manter uma densidade de 600g/m² na lagoa, e garantir a eficiência do sistema. A biomassa coletada nesses dois dias foi submetida a secagem a 55°C durante 24h e posteriormente triturada em mesh 30 para a quantificação do teor de nitrogênio e fósforo.

Para a medição em campo de CO2, foi utilizado um sistema composto por uma câmara estática com 0.1257 m² de área e volume de 30L, ligada ao analisador multifuncional Testo 435 (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt), composto por uma sonda IAQ para avaliar a quantidade de CO2, que também avalia a umidade, temperatura e pressão absoluta dentro da câmara. Sua faixa de medição é de 0 a 10.000 ppm, com precisão de 0 a 5.000 ppm. O sistema descrito foi posicionado na superfície da lagoa, e realizava uma medição a cada 10 minutos, com o início da medição as 9 horas e término às 17 horas de cada dia analisado.



Figura 03: Figura do sistema câmara-analisador.
Fonte: Autoria Própria

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos permitiram avaliar o comportamento das lagoas de lemnas quanto às emissões de CO2 e sua relação com as variáveis operacionais e de qualidade do efluente. Na Figura 04, são apresentados os resultados dos parâmetros físico-químicos analisados.

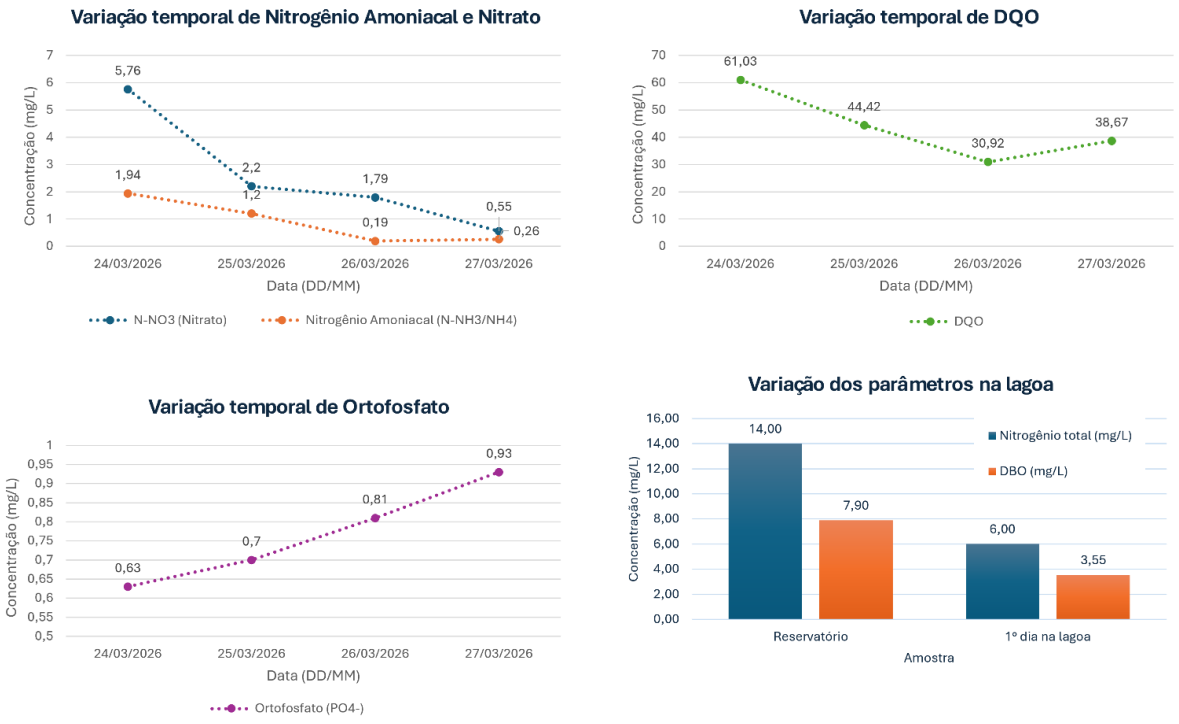


Figura 04: Variação temporal das concentrações de NH_4^+, NO_3^-, DQO, PO_4^{3-} Nitrogênio total e DBO na lagoa de lemnas.

Os parâmetros de NH_4^+ e NO_3^- tiveram reduções significativas ao longo dos dias, com uma remoção de 90,4% e 86,6%, respectivamente. Em estudo realizado na mesma lagoa experimental, Bueno (2025) obteve remoções de 75,9% para nitrogênio amoniacal e 85,6% para nitrato, indicando que o sistema operou com eficiência consistente entre diferentes períodos de monitoramento. A elevada eficiência em remoção de nitrogênio pode estar relacionada à alta capacidade de absorção de nutrientes por plantas flutuantes como a *Landoltia punctata*. Espécies do gênero Lemna podem remover até 100% da amônia em menos de 8 dias (Hendriks et al., 2023). A remoção ocorre principalmente por assimilação direta na biomassa vegetal e por processos de nitrificação e desnitrificação facilitados pelo biofilme nas raízes (Sims et al., 2013).

O Ortofosfato teve um aumento ao longo dos dias de 47,6%. Esse comportamento foi observado também por Hendriks et al. (2023), que relataram um aumento da concentração de fósforo nos três primeiros dias de operação em lagoas de lemnas, atribuindo à liberação do nutriente a partir do sedimento de fundo. Tu et al. (2021) explica que o sedimento tem a capacidade de armazenar e posteriormente liberar fósforo para a coluna d'água. Entretanto, a concentração desse nutriente não ultrapassou 1 mg/L, o que pode ser considerado baixo e não vir a representar perigo ao ecossistema aquático.

A DQO teve uma redução significativa nos três primeiros dias, seguida de um aumento no 4° dia, resultando numa remoção de 36,6%. Esse resultado é compatível com o valor obtido por Tu et al (2021), em que obteve 36,5% de eficiência em um estudo com a presença de sedimento no fundo da lagoa, condição semelhante do presente estudo. Apesar disso, as concentrações observadas nos quatro dias analisados são condizentes com o efluente terciário e podem representar a capacidade máxima de remoção de DQO. Ainda, a média desse parâmetro nos três últimos dias foi de 38,07% com desvio padrão de 6,79% para mais e para menos, que pode ser interpretado como um decaimento significativo de DQO apenas do primeiro para o segundo dia.

Em relação às análises do efluente antes do início do ciclo (Reservatório), e de após 24h do início do novo ciclo, foi observado um decaimento na concentração de Nitrogênio Total e de DBO de 57,1% e 55,1%, respectivamente. A remoção da DBO_5 pode indicar boa eficiência na degradação da matéria orgânica, estando dentro da faixa esperada para sistemas com plantas flutuantes (Sims et al., 2013). A redução de Nitrogênio Total em apenas 24 horas pode ser resultado da rápida adaptação e eficiência do sistema no polimento de efluentes, sendo superior à eficiência média anual de 45,03% reportada por Tu et al. (2021) para sistemas com lemnas.

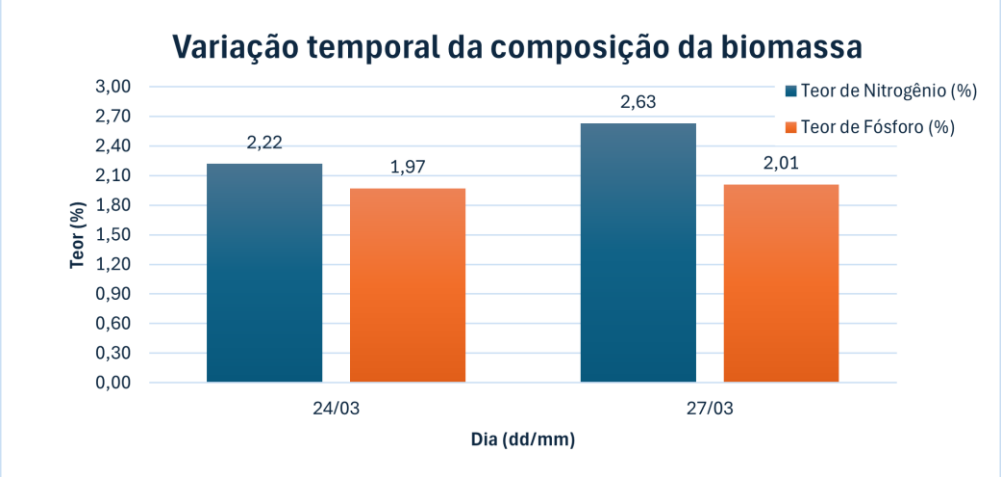


Figura 05: Variação temporal da composição da biomassa da lagoa.

Quanto à composição da biomassa, conforme a figura 05, ao longo do tempo foi verificado um aumento do teor de Nitrogênio após o período de 4 dias, de 0,41 pontos percentuais, que pode indicar que pelo menos após quatro dias já é observado o aumento desse nutriente nas lemnas. Quanto ao fósforo, as lemnas apresentaram cerca de 2% do peso seco, que está inserido na faixa de 1 a 3% descrita na literatura (Shilton; Powell; Guieysse, 2012; Tu et al., 2021). Observa-se que, tanto no efluente quanto na biomassa, houve um incremento da concentração de fósforo ao final do período analisado, embora as diferenças entre as medições intermediárias estejam dentro da faixa de desvio padrão. Esse evento indica que a capacidade de absorção pelas plantas foi exercida, mas a liberação simultânea a partir do sedimento (Tu et al., 2021; Zhao et al., 2022) pode ter resultado no balanço líquido positivo observado no efluente, o que evidencia a complexidade da dinâmica do fósforo em sistemas com macrófitas e a importância do gerenciamento do sedimento para otimizar a remoção desse nutriente.

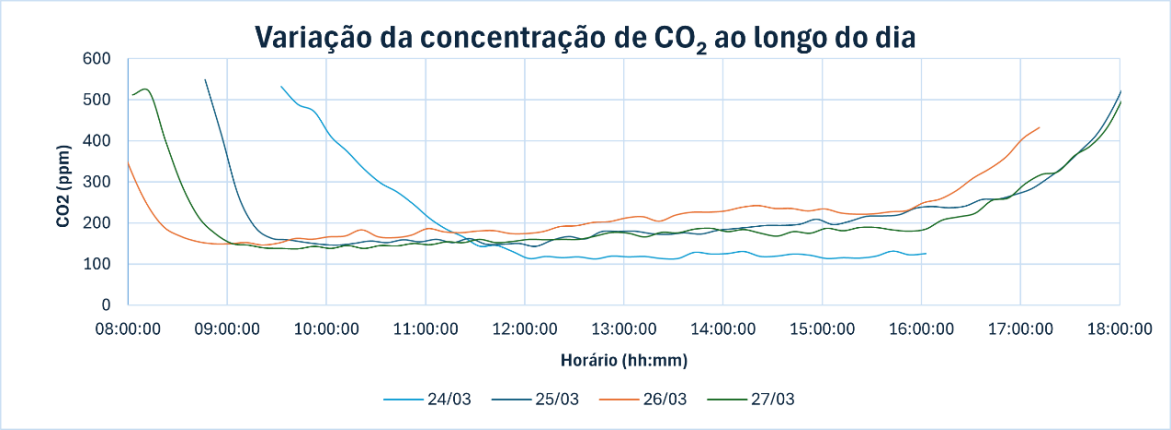


Figura 06: Variação da concentração de CO2 ao longo do dia na câmara estática.

Conforme observado na Figura 06, a concentração de CO_2 ao longo do dia apresentou maiores emissões nos períodos das 8h às 9h e das 17h às 18h, coincidindo com os momentos de transição entre os ciclos de luz e escuro. Esse comportamento é explicado por Mohedano et al. (2019) em lagoas de tratamento com lentilha-d'água. Ao final do dia, a fotossíntese cessa com o pôr do sol, mas a respiração das plantas e a decomposição da matéria orgânica por microrganismos continuam resultando em acúmulo e emissão de CO_2 (Tu et al, 2021). Já no início do dia, embora a fotossíntese seja retomada com a incidência de luz, observa-se um pico de CO_2, que pode ser explicado pelo resíduo do gás presente no ambiente quando a câmara é posicionada na lagoa; e pelo tempo necessário para o sistema se estabilizar, com a fotossíntese passando a consumir CO_2 e reduzindo sua concentração na câmara. Esse comportamento de pico pela manhã também foi percebido por Körner & Vermaat (1998) como característico de sistemas aquáticos com alta atividade biológica. Verifica-se que durante o dia se constata reduzida emissão de GEE, referenciado- se ao CO_2.

Considerações finais

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que a lagoa de lemnas avaliada demonstrou ser uma tecnologia de tratamento de efluentes com elevada eficiência para remoção de nitrogênio amoniacal (90,4%) e nitrato (86,6%), valores que se destacam positivamente quando comparados aos reportados por Bueno (2025) para o mesmo sistema (75,9% e 85,6%). A rápida remoção de nitrogênio total em 24 horas (57,1%) evidencia o potencial do sistema para o polimento de efluentes domésticos tratados. Em relação à matéria orgânica, a eficiência de remoção de DQO mostrou-se compatível com o valor reportado por Tu et al. (2021) para sistemas com sedimento, enquanto a remoção de DBO esteve dentro da faixa esperada para sistemas com plantas flutuantes (Sims et al., 2013). Esses resultados indicam que a lagoa de lemnas contribui significativamente para o polimento final do efluente.

A dinâmica do fósforo revelou-se mais complexa, com aumento da concentração de ortofosfato no efluente e na biomassa. Esse comportamento, também observado por Hendriks et al. (2023) e Tu et al. (2021) como consequência da liberação do fósforo a partir do sedimento, aponta para uma limitação importante do sistema quando há acúmulo de sedimento, o que mostra a necessidade de manutenção periódica ou de estratégias para garantir a remoção efetiva desse nutriente. Quanto às emissões de dióxido de carbono, o padrão observado de maiores emissões nos períodos da manhã (8h–9h) e final da tarde (17h–18h) coincide com os momentos de transição fotoperíodo, que está de acordo com estudos de Mohedano et al. (2019) e Tu et al. (2021). Esse comportamento reforça a importância de considerar os ciclos diários de luz nos protocolos de quantificação de GEEs.

Por fim, ao comparar os resultados obtidos com os de outros autores, evidencia-se que a lagoa de lemnas estudada apresenta desempenho consistente e, em alguns parâmetros superior ao reportado em condições semelhantes. Sobre GEE, as observações indicam que o é uma tecnologia para a redução da emissão de CO_2, comparada com otros modelos de tratamento de águas residuárias, os estudos futuros neste sistema experimental irão avaliar as emissões de CH_4 e N_2O, para uma avaliação mais completa de seu impacto sobre GEE e a aplicação das Lagoas com Lemnas no combate às mudanças climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem às equipes do Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos (LABEFLU) e do Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), ambos da Universidade Federal de Santa Catarina e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Referências Bibliográficas

BUENO, Luís Antônio. **Lagoa de lemnas**: o polimento de efluente doméstico integrado à produção de biomassa proteica. 2025. Projeto de Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.

HENDRIKS, L. et al. Polishing wastewater effluent using plants: floating plants perform better than submerged plants in both nutrient removal and reduction of greenhouse gas emission. **Water Science & Technology**, v. 88, n. 1, p. 23-34, 2023. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2023.203

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change: Scientific Assessment of Climate Change – Working Group I. Cambridge; New York; Melbourne: Cambridge University Press; World Meteorological Organization (WMO); **United Nations Environment Programme (UNEP)**, 1990. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc_far_wg_I_full_report.pdf. Acesso em: 12 abr. 2026.

KÖRNER, S.; VERMAAT, J. E.; VEENSTRA, S. The capacity of duckweed to treat wastewater: ecological considerations for a sound design. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, n. 5, p. 1583-1590, 2003. DOI: https://doi.org/10.2134/jeq2003.1583.

MOHEDANO, R. A. et al. Does duckweed ponds used for wastewater treatment emit or sequester greenhouse gases? **Science of the Total Environment**, v. 691, p. 1043-1050, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.169.

SEEG. Relatório Analítico do SEEG 2026: emissões de gases de efeito estufa no Brasil. São Paulo: **SEEG**, 2026. Disponível em: https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2026/03/SEEG13-relatorio-analitico-BR.pdf. Acesso em: 12 abr. 2026.

SIMS, A. et al. Nutrient removal and greenhouse gas emissions in duckweed treatment ponds. **Water Research**, v. 47, n. 3, p. 1390-1398, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.12.009.

SHILTON, Andrew N.; POWELL, Nicola; GUIEYSSE, Benoit. Plant based phosphorus recovery from wastewater via algae and macrophytes. Current Opinion in Biotechnology, v. 23, n. 6, p. 884–889, dez. 2012.

TU, Q. et al. Long-term effect of sediment on the performance of a pilot-scale duckweed-based waste stabilization pond. **Science of the Total Environment**, v. 770, p. 145216, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145216

VON SPERLING, M. Lagoas de Estabilização: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2002a. 196 p.

ZHAO, Y. et al. Long-term effects of duckweed cover on the performance and microbial community of a pilot-scale waste stabilization pond. **Journal of Cleaner Production**, v. 371, p. 133531, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133531.

RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) NA PAVIMENTAÇÃO: ANÁLISE MULTIESCALAR E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PARA APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL

1 Flaviane Beltrão Silva, 2 Giovanna Monique Alelvan, 3 Rodrigo César Pierozan

1 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail:flaviane.beltrao@hotmail.com; 2 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: giovannaalelvan@etg.ufmg.br; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: rodrigopierozan@utfpr.edu.br

Palavras-chave: RAP; sustentabilidade; resíduos; caracterização multiescalar de materiais.

Resumo

Diante dos desafios ambientais e da necessidade de soluções sustentáveis na engenharia rodoviária, o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) apresenta-se como alternativa para redução do consumo de agregados naturais e mitigação de impactos associados à extração de jazidas e geração de resíduos. Este estudo avaliou o comportamento do RAP por meio de caracterização física, mecânica e microestrutural, com foco em sua aplicabilidade em pavimentação. O material, coletado na rodovia MG-176 (MG), foi submetido a ensaios de granulometria, massa específica, teor de ligante, Índice de Suporte Califórnia (ISC), abrasão Los Angeles, sanidade e compactação, além de análises por MEV, DRX e XRF. Os resultados indicaram predominância de fração graúda, baixo teor de finos e comportamento não plástico, com teor de ligante de 5,5%, evidenciando presença de betume envelhecido aderido aos agregados, além de índice suporte Califórnia (ISC) de 17,7%. Observou-se ainda boa estabilidade volumétrica, baixa expansão e resistência ao desgaste dentro dos limites normativos (<55%). A análise microestrutural por XRF revelou predominância de SiO_2 (39,83%), CaO (22,05%), Al_2O_3 (10,96%) e Fe_2O_3 (5,03%), indicando baixa reatividade química. O DRX confirmou a presença predominante de quartzo e feldspatos cálcicos, enquanto o MEV evidenciou partículas angulares recobertas por ligante asfáltico envelhecido. A análise integrada demonstrou que o comportamento do RAP é controlado pela interação entre a matriz mineral resistente e o ligante betuminoso envelhecido, resultando em desempenho mecânico intermediário, boa estabilidade física e resistência ao desgaste. Do ponto de vista ambiental, seu reaproveitamento contribui para a redução da exploração de jazidas naturais, do consumo energético e das emissões associadas à produção de agregados, além da minimização da disposição de resíduos asfálticos. Conclui-se que o RAP possui viabilidade técnica para aplicação em camadas de menor solicitação estrutural, em substituição a agregados convencionais de jazidas, especialmente em sub-bases e sistemas drenantes.

Introdução

O setor de infraestrutura está entre os maiores consumidores de recursos naturais e geradores de resíduos em escala global, apresentando impactos ambientais significativos ao longo de toda a cadeia produtiva. Nesse contexto, a infraestrutura deve ser confiável, sustentável, de alta qualidade e promover o bem-estar humano (Nações Unidas, 2015; Tsakoumaki; Plati, 2024). A intensificação da exploração de agregados minerais aumenta a pressão sobre jazidas naturais, elevando o consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa. Sob a ótica dos princípios ESG (Environmental, Social and Governance), a pavimentação passa a ser avaliada não apenas pelo desempenho técnico e pela viabilidade econômica, mas também por seus impactos ambientais e sociais. A construção e manutenção de pavimentos são atividades intensivas em energia e materiais, responsáveis por parcela significativa das emissões de carbono (Choi, 2019), além de demandarem grandes volumes de agregados naturais. Estima-se que cerca de 20% dos agregados da construção civil estejam associados à infraestrutura de transporte, totalizando aproximadamente 3 bilhões de toneladas anuais (UEPG, 2021). Nesse cenário, os agregados representam cerca de 95% das misturas asfálticas e são fundamentais para a resistência estrutural dos pavimentos. O desempenho desses materiais é determinante para a durabilidade das estruturas (Santos, 2021; Taylor, 2000; Dagostin *et al*., 2026). As atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos geram grandes volumes de resíduos, com destaque para o RAP, cuja destinação inadequada pode implicar impactos ambientais e econômicos relevantes (Zhang *et al.,* 2022). Em escala global, estima-se a geração de dezenas de milhões de toneladas anuais de RAP, com mais de 90 milhões de toneladas nos Estados Unidos (NAPA, 2021). No Brasil, estimativas indicam a geração de mais de 1,5 milhão de toneladas em rodovias federais concedidas entre 2018 e 2022 (Lopes *et al*., 2024). A reutilização do RAP como substituto de agregados naturais surge como alternativa para mitigação desses impactos. O RAP é composto por agregados minerais recobertos por ligante asfáltico envelhecido, possibilitando seu reaproveitamento e contribuindo para a economia circular (Ransinchung; Kumar, 2017; Lima *et al.,* 2023). Apesar dos avanços, ainda predominam abordagens fragmentadas, focadas isoladamente em propriedades físicas ou mecânicas, sem integração com a composição microestrutural. No contexto brasileiro, são escassos os estudos que correlacionam dados de DRX e MEV com o desempenho mecânico. Nesse contexto, este estudo propõe uma análise multiescalar do RAP, integrando sua caracterização física, mecânica e microestrutural, com o objetivo de correlacionar sua composição mineralógica ao desempenho mecânico. Como principal contribuição, estabelece correlações diretas entre a composição mineralógica (DRX/XRF) e o comportamento mecânico (ISC e abrasão), ampliando a compreensão do desempenho do material em aplicações geotécnicas e avaliando sua viabilidade técnica e ambiental em pavimentação.

Materiais

O RAP utilizado nesta pesquisa foi coletado no município de Abaeté, no estado de Minas Gerais, ao longo da rodovia MG-176. O trecho selecionado apresentava pavimento em avançado estado de degradação, com manifestações de trincamentos, deformações permanentes e afundamentos, decorrentes do esgotamento da vida útil de projeto. A fresagem foi realizada em 2024, em uma área aproximada de 40.000 m², como etapa preparatória para a reabilitação do pavimento. O processo consistiu na remoção a frio da camada asfáltica por meio de equipamento fresador, com tambor rotativo equipado com ferramentas de corte, promovendo desagregação por impacto e cisalhamento. A profundidade de corte variou entre 3 e 5 cm, correspondente à espessura da camada removida. A técnica a frio contribuiu para a preservação das características dos agregados e do ligante asfáltico, favorecendo o reaproveitamento do material.



Figura 01: Processo de Fresagem do pavimento.
Fonte: Autores (2026)

Coleta do Material

Foram coletadas três amostras representativas do material fresado (RAP), totalizando aproximadamente 200 kg, as quais foram encaminhadas ao laboratório para a realização dos ensaios experimentais.



Figura 02: Material Fresado.
Fonte: Autores (2026)

Programa experimental

O programa experimental foi dividido em três etapas: (i) caracterização física, (ii) caracterização mecânica e (iii) análise microestrutural.

Caracterização física

A caracterização física foi realizada por meio de análise granulométrica, conforme a ABNT NBR 7181:2016, visando à determinação da distribuição do tamanho das partículas do RAP. A massa específica foi determinada conforme a ABNT NBR 6458:2016. O teor de ligante foi obtido pelo método DNER-ME 053/94, utilizando extrator centrífugo tipo Rotarex. Aproximadamente 1000 g de amostra foram submetidos à extração com percloroetileno em ciclos sucessivos, até completa remoção do ligante.

Caracterização mecânica

A caracterização mecânica foi realizada por meio de ensaios laboratoriais. O desgaste superficial do material foi avaliado pelo ensaio de abrasão Los Angeles, conforme a norma DNIT 451/2024, visando à determinação de sua resistência mecânica. O material seco foi previamente classificado por análise granulométrica e enquadrado nas faixas normativas B, C e D, sendo realizados três ensaios independentes. Para cada ensaio, o material foi introduzido no tambor da máquina Los Angeles com a carga abrasiva correspondente (11, 8 e 6 esferas) e submetido ao número de rotações estabelecido pela norma. Ao final, o material foi peneirado na peneira de 1,70 mm; o material retido foi lavado, seco em estufa (105–110 °C) e pesado para determinação da perda por abrasão. A durabilidade do material foi avaliada por meio do ensaio de sanidade, conforme a norma DNER-ME 089/94, que consiste em submeter o agregado a ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio, simulando os efeitos de intempéries e avaliando sua resistência à desintegração. Como critério de aceitação, adotam-se valores de perda

inferiores a 12% (DNER, 1994). O Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi determinado conforme a ABNT NBR 9895:2016, visando avaliar a capacidade de suporte do material para aplicação em camadas de pavimentos. Além disso, foi realizado o ensaio de compactação conforme a ABNT NBR 7182:2020, para a determinação das condições ótimas de compactação.

Análise Microestrutural

A análise microestrutural foi realizada com o objetivo de caracterizar a morfologia, a composição mineralógica e a composição elementar do RAP, por meio das técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (XRF), com espectroscopia de energia dispersiva EDS acoplada ao MEV. O MEV foi realizado conforme a ASTM E1508-21, permitindo a análise da morfologia e microestrutura das partículas. A técnica baseia-se na interação de um feixe de elétrons com a superfície da amostra, possibilitando a obtenção de imagens de alta resolução para avaliação da forma, textura e distribuição das partículas. A composição elementar local foi determinada por EDS, permitindo a identificação qualitativa dos elementos presentes com base na radiação característica emitida pela amostra. O ensaio de fluorescência de raios X (XRF) foi realizado para determinar a composição química global do RAP, em termos de óxidos majoritários e elementos-traço. O ensaio de difração de raios X (DRX) foi conduzido conforme a ASTM C1365-20, com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes. As amostras foram peneiradas na malha de 0,42 mm (nº 40) e analisadas em difratômetro Rigaku, operando a 22 keV e 11,3 mA, com varredura no intervalo de 2θ entre 2° e 100°.

Resultados

A curva granulométrica média do RAP em estudo está representada conforme a Figura 3.

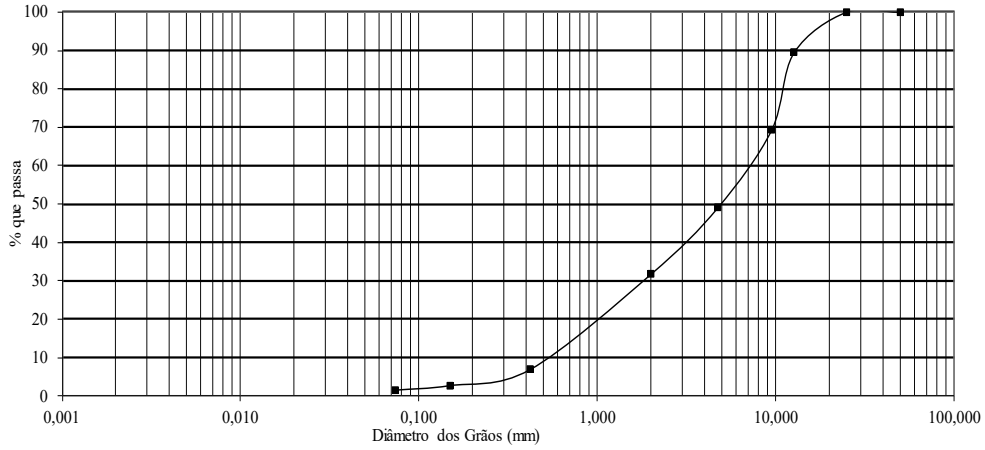


Figura 03: Curva Granulométrica do RAP.
Fonte: Autores (2026)

Os ensaios granulométricos indicaram um material predominantemente graúdo, com 62,3% retido na peneira de 4,8 mm e frações de areia distribuídas em 20,0% de areia grossa, 13,2% de areia média e 4,3% de areia fina. Comparativamente, agregados convencionais de pedreira tendem a apresentar maior continuidade granulométrica. Ainda assim, estudos como o de Russo *et al.* (2025) demonstram que o RAP, na condição "como recebido", pode apresentar distribuição próxima à curva ideal de Fuller, possibilitando sua utilização como substituto total de agregados naturais sem necessidade de correções granulométricas. Outro aspecto relevante refere-se à influência do estado de degradação do pavimento de origem. Segundo Bonfim (2021), quanto mais deteriorado o pavimento, maior tende a ser o tamanho dos grumos e menor a quantidade de finos presentes no RAP. No presente estudo, o teor médio de material passante na peneira #200 foi de 1,6%, valor compatível com o relatado na literatura. A massa específica dos grãos do RAP foi de 2,41 g/cm³, inferior à observada para agregados naturais (2,50 a 2,75 g/cm³), sendo essa diferença atribuída à presença de ligante asfáltico residual aderido às partículas, o que confere maior heterogeneidade ao material e influencia suas propriedades físicas (AzariJafari et al., 2023; Gnanendran et al., 2023).

Na Tabela 01 estão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos, incluindo os valores de CBR, expansão e umidade ótima da amostra de RAP ensaiada.

Tabela 01- Resultados dos ensaios mecânicos

Material	Energia de Compactação	H. ótima (%)	Densidade(g/cm3)	Expansão %	ISC%
RAP	Normal	2,6	1,780	-0,184	17,7

Fonte: Autores (2026).

De acordo com Brajesh Mishra (2015), valores típicos para RAP variam entre 1,5 e 1,95 g/cm³ para densidade, 3% a 5% para umidade ótima e 20% a 25% para ISC. Abbas O. Al-Shujairi et al. (2021) relatam valores de ISC entre 5% e 25%, com média em torno de 15%. A densidade obtida neste estudo encontra-se dentro da faixa reportada, indicando comportamento compatível com materiais reciclados. A umidade ótima apresentou valor inferior ao intervalo de referência, possivelmente

associada à menor absorção de água do material e à presença de ligante asfáltico envelhecido. O ISC obtido (17,7%) encontra-se dentro da faixa da literatura e próximo da média reportada, indicando capacidade de suporte compatível com materiais de pavimentação reciclados. Esse comportamento indica que a resposta mecânica do material resulta da interação entre o ligante asfáltico envelhecido e os agregados minerais, com contribuição predominante da estrutura granular, associada à fase mineral. A Figura 04 apresenta uma comparação direta entre o valor obtido neste estudo e os intervalos reportados na literatura, evidenciando a consistência dos resultados.

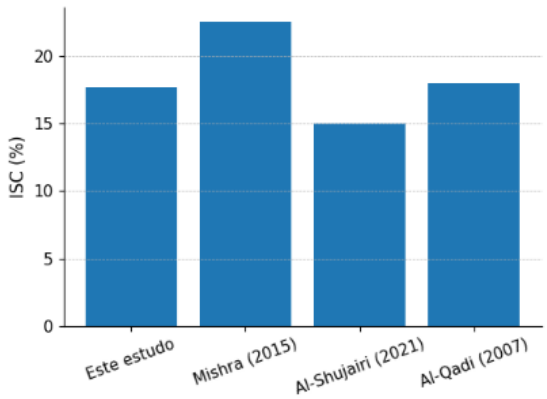


Figura 04: Comparação do ISC do RAP.
Fonte: Autores (2026)

Estudos demonstram que a incorporação de RAP em materiais granulares tende a reduzir o ISC, com decréscimos entre 13% e 29% a cada incremento de 25% de RAP, devido à presença de ligante asfáltico envelhecido, que reduz o atrito interparticular e a rigidez do sistema granular (T. Al-Qadi et al., 2007). A expansão negativa (−0,184%) está associada à baixa capacidade de absorção de água do RAP, indicando menor suscetibilidade a variações volumétricas. O teor médio de ligante asfáltico foi de 5,5%, evidenciando a presença de ligante residual aderido aos agregados, o que favorece seu reaproveitamento, especialmente em misturas asfálticas. Considerando o envelhecimento do ligante, a utilização de agentes rejuvenescedores pode contribuir para a recuperação de propriedades como flexibilidade e trabalhabilidade. O ensaio de abrasão Los Angeles indicou perdas médias de 31,9%, 28,3% e 24,2% para as faixas granulométricas B, C e D, respectivamente, valores inferiores ao limite de 55%, evidenciando resistência adequada ao desgaste. Quanto à durabilidade, o ensaio de sanidade indicou perda de massa de 0,34%, valor significativamente inferior ao limite de 12%, indicando elevada resistência à desagregação e bom desempenho frente ao intemperismo. Com base nesses resultados, o RAP apresenta potencial de aplicação em camadas de sub-base, misturas asfálticas, materiais de aterro e sistemas de drenagem, contribuindo para a redução do consumo de agregados naturais (Abbas O. Al-Shujairi et al., 2021). No que se refere à caracterização microestrutural, as Tabelas 2 e 3 apresentam a composição química do RAP.

Tabela 02 - Composição química do RAP (óxidos principais)

Parâmetro	SiO2	CaO	Al2O3	Fe2O3	K2O	Na2O
Nome do composto	Dióxido de silício (Sílica)	Óxido de cálcio (Cal)	Óxido de alumínio (Alumina)	Óxido de ferro (III)	Óxido de potássio	Óxido de sódio
m/m % (óxido)	39,83	22,05	10,96	5,03	3,45	1,21
Erro padrão % (óxido)	0,08	0,10	0,29	0,06	0,03	0,12
Elemento	Si	Ca	Al	Fe	K	Na
m/m % (elemento)	18,62	15,77	5,80	3,52	2,86	0,90
Erro padrão % (elemento)	0,04	0,07	0,15	0,04	0,03	0,09

Fonte: Autores (2026).

Tabela 03 Composição química do RAP (continuação)

Parâmetro	MgO	TiO2	S	SrO	BaO	P2O5	ZrO2
Nome do composto	Óxido de magnésio	Dióxido de titânio	Enxofre	Óxido de estrôncio	Óxido de bário	Pentóxido de fósforo	Dióxido de zircônio
m/m % (óxido)	0,80	0,66	0,40	0,13	0,12	0,11	0,07
Erro padrão % (óxido)	0,09	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00
Elemento	Mg	Ti	S	Sr	Ba	P	Zr
m/m % (elemento)	0,48	0,40	0,40	0,11	0,11	0,05	0,05
Erro padrão % (elemento)	0,05	0,01	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00

Fonte: Autores (2026).

Os resultados indicam predominância dos óxidos dióxido de silício (SiO_2) (39,83%), óxido de cálcio (CaO) (22,05%), óxido de alumínio (Al_2O_3) (10,96%) e óxido de ferro (III) (Fe_2O_3) (5,03%), além de menores teores de outros óxidos. Essa composição é característica de agregados utilizados em pavimentação e indica baixa reatividade química. Estudos como o de Yang *et al.* (2020) mostram que o RAP apresenta baixa mobilidade de elementos em condições de pH neutro, com reduzido potencial de lixiviação. Elementos-traço podem estar presentes, mas sua mobilidade tende a ser limitada, especialmente na presença de solo, que atua como barreira natural. Os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com a literatura, indicando que o RAP possui baixo potencial de impacto ambiental em condições usuais de aplicação. A análise mineralógica por DRX confirmou a predominância de fases ricas em sílica, com picos característicos de quartzo em $2\theta \approx 26{,}6°$. A presença de quartzo confere elevada estabilidade química e resistência mecânica ao material. Também foram identificadas fases como anortita, associada aos teores de óxido de cálcio (CaO) e óxido de alumínio (Al_2O_3), indicando a presença de feldspatos cálcicos. Fases acessórias, possivelmente associadas a minerais ferromagnesianos, também foram observadas em menor intensidade. A análise por MEV evidenciou morfologia heterogênea, com partículas subangulares a angulares e superfície rugosa, atribuída ao recobrimento por ligante asfáltico. Essa característica favorece o intertravamento mecânico entre partículas. A presença do ligante com o agregado confere maior rugosidade superficial e favorece o intertravamento mecânico entre partículas, porém influencia no comportamento mecânico global, reduzindo a rigidez quando comparado a agregados naturais não revestidos. A análise por EDS confirmou a presença de C, O, Si, Al, Ca, Fe e Ti, evidenciando a natureza híbrida do material (mineral e betuminosa). A presença de oxigênio sugere processos de oxidação do ligante, enquanto o cálcio indica possível origem calcária dos agregados.

Análise integrada dos ensaios granulométricos, mecânicos e microestruturais

A análise integrada dos resultados evidencia que o comportamento do RAP não é controlado exclusivamente pelas propriedades dos agregados minerais, mas pela interação entre a fase mineral e o ligante asfáltico envelhecido. A presença de quartzo contribui para a resistência mecânica, enquanto o ligante residual reduz o atrito interparticular, resultando em valores de ISC inferiores aos de agregados convencionais. O valor obtido (17,7%) indica capacidade de suporte moderada, adequada para aplicação em camadas de menor solicitação estrutural, como sub-base ou reforço do subleito, sendo para aplicações mais exigentes. A baixa umidade ótima, associada à expansão praticamente nula, indica boa estabilidade volumétrica e baixa sensibilidade à água. A granulometria predominantemente graúda favorece o intertravamento mecânico, embora parcialmente reduzido pela presença do ligante asfáltico residual. A resistência ao desgaste resulta da ação combinada entre agregados e ligante, sendo influenciada pela dissipação de energia no sistema mineral–betuminoso. Do ponto de vista químico e mineralógico, a predominância de fases estáveis, como quartzo e feldspatos, sugere baixa reatividade e potencial de desempenho ambiental favorável. De forma geral, o RAP apresenta comportamento mecânico intermediário e boa estabilidade física, sendo indicado para camadas inferiores de pavimentação ou em misturas com outros materiais. Os resultados reforçam a importância de abordagens integradas, evidenciando que o desempenho do RAP é governado pela interação entre suas fases constituintes.

Conclusões

Apesar das limitações para aplicações estruturais mais exigentes, essa condição não invalida sua utilização, visto que o RAP apresenta comportamento distinto em relação aos agregados convencionais, em decorrência da presença de ligante asfáltico envelhecido. Do ponto de vista físico, o material apresenta granulometria predominantemente graúda, baixo teor de finos e comportamento não plástico. Sob o aspecto mecânico, o ISC de 17,7% indica capacidade de suporte moderada, adequada para camadas de menor solicitação estrutural quando utilizado isoladamente. Ainda assim, o material apresentou estabilidade volumétrica, baixa sensibilidade à água, resistência ao desgaste e durabilidade compatível com os limites normativos, evidenciando potencial para aplicação em camadas de menor solicitação estrutural e em sistemas drenantes. A análise microestrutural confirmou a natureza heterogênea do RAP, composta por agregados minerais recobertos por ligante asfáltico envelhecido, com predominância de fases estáveis, como quartzo e feldspatos, associadas à baixa reatividade química e reduzido baixo potencial de lixiviação. Como principal contribuição, este estudo demonstra que o desempenho do RAP é governado pela interação entre suas fases mineral e betuminosa, não sendo adequadamente descrito por parâmetros físicos ou mecânicos isolados, o que reforça a importância de abordagens multiescalares na avaliação de materiais reciclados. Do ponto de vista prático, os resultados indicam que o RAP pode ser utilizado de forma tecnicamente viável em camadas de sub-base, misturas asfálticas e aplicações geotécnicas de menor exigência, contribuindo para a redução do consumo de agregados naturais e dos impactos ambientais associados, em consonância com os princípios da economia circular. Como limitação, destaca-se que os resultados são baseados em material de uma única fonte, o que pode influenciar a generalização das conclusões. Recomenda-se a realização de estudos complementares com diferentes origens de RAP, bem como análises de desempenho a longo prazo, ensaios de lixiviação e avaliações de custo do ciclo de vida (ACCV), visando ampliar a compreensão de seu comportamento e viabilidade em larga escala. Dessa forma, o estudo reforça o potencial do RAP como material alternativo na engenharia rodoviária, contribuindo para o desenvolvimento de infraestruturas mais sustentáveis e eficientes.

Referências Bibliográficas

ABBAS, O. Al-Shujairi; ABBAS, J. Al-Taie; HASAN, M. Al-Mosawe. Review on applications of RAP in civil engineering. In: THE FIFTH SCIENTIFIC CONFERENCE FOR ENGINEERING AND POSTGRADUATE RESEARCH (PEC 2020),

2020, Baghdad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1105, 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1105/1/012092.

AL-QADI, I. L. et al. Characterization of RAP in granular layers. *Transportation Research Record*, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1508-21: Standard guide for quantitative analysis by energy-dispersive spectroscopy. West Conshohocken, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16396:2015: Análise mineralógica por difração de raios X. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457:2017: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458:2016: Solo — Determinação da massa específica dos grãos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181:2016: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182:2020: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895:2016: Solo — Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016.

AZARIJAFARI, E.; YAHIA, A.; BEN AMOR, M. Life cycle assessment of pavements containing reclaimed asphalt pavement (RAP): a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 387, p. 136978, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136978.

BONFIM, V. *Pavimento sustentável*. São Paulo: Exceção Editorial, 2021.

CHOI, J.-H. Strategy for reducing carbon dioxide emissions from road pavement maintenance and rehabilitation. *Journal of Cleaner Production*, v. 209, p. 88–100, 2019.

DAGOSTIN, J. V.; BILÉSIMO, N. C.; ZACCARON, A. et al. Valorização do pavimento asfáltico reciclado (RAP) a partir da circularidade de materiais rodoviários. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s42947-026-00706-9.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 035/98: Agregados — Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 053/94: Misturas betuminosas — Determinação do teor de ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 089/94: Agregados — Avaliação da durabilidade pelo uso de soluções de sulfato de sódio ou magnésio. Rio de Janeiro, 1994.
EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA). *Asphalt in figures 2020*. Brussels: EAPA, 2021.

GNANENDRAN, C. T. et al. Geotechnical properties of reclaimed asphalt pavement: a review. *Recycling*, v. 8, n. 1, p. 3, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/recycling3010003.

LIMA, D.; ARRIETA-BALDOVINO, J.; IZZO, R. L. S. Sustainable use of recycled asphalt pavement in soil stabilization. *Civil Engineering Journal*, v. 9, n. 9, p. 2315–2329, 2023. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-09-016.

LOPES, A. F. D. et al. Geração e utilização do RAP no Brasil. *Revista ENINFRA*, v. 3, n. 3, p. 201–217, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.70859/2764-9539.v3.n3.126. Acesso em: 4 abr. 2026.

MASI, G.; MICHELACCI, A.; MANZI, S.; BIGNOZZI, M. C. Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete. *Construction and Building Materials*, v. 341, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127745. Acesso em: 4 abr. 2026.

MISHRA, B. A study on use of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in flexible pavements. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, v. 4, n. 12, p. 12170–12177, 2015.

NAÇÕES UNIDAS. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda. Acesso em: 2 maio 2026.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA). Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2020. Lanham: NAPA, 2021.

PLATI, C.; TSAKOUMAKI, M.; GKYRTSIS, K. Propriedades físicas e mecânicas do pavimento asfáltico reciclado (RAP) incorporado em camadas não ligadas. *Applied Sciences*, v. 13, p. 362, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/app13010362.
RANSINCHUNG, G. R.; KUMAR, B. Utilization of reclaimed asphalt pavement materials in flexible pavements: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 119, p. 96–107, 2017.

RUSSO, N.; FILIPPI, A.; CARSANA, M. et al. Impacto do RAP como agregado reciclado em parâmetros relacionados à durabilidade do concreto estrutural. *Materials and Structures*, v. 58, n. 53, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1617/s11527-025-02582-4. Acesso em: 24 abr. 2026.

SANTOS, E. F. dos. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com granulometria definida pela faixa de agregados dominantes. 2021. Tese (Doutorado em Infraestrutura de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. DOI: 10.11606/T.18.2021.tde-31102025-104748. Acesso em: 24 abr. 2026.

TAYLOR, G. D. *Materials in construction: an introduction*. 3. ed. London: Routledge, 2000. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315839158.

TSAKOUMAKI, M.; PLATI, C. Uma visão geral crítica do uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) na construção de pavimentos rodoviários. *Infrastructures*, v. 9, n. 8, p. 128, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures9080128.

UNION EUROPÉENNE DES PRODUCTEURS DE GRANULATS (UEPG). *Annual report 2020–2021*. Brussels: UEPG, 2021.

YANG, Q.; YIN, H.; HE, X. et al. Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement on leaching of metals into groundwater. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 85, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102415.

ZHANG, J. et al. Maximizing the application of RAP in asphalt pavements. *Polymers*, v. 14, n. 21, 2022. DOI: 10.3390/polym14214736.

INFRAESTRUTURA VERDE COMO ESTRATÉGIA DE ADAPTAÇÃO NO BIOMA CAATINGA: INTEGRAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

1 Cássia Gisele Dias Porto, 2 José Floro de Arruda Neto, 3 José Vitor da Silva Aragão, 4 Amanda Maria Albuquerque Aguiar[4] e 5 Gilson Lima da Silva

1 Universidade Federal de Pernambuco, PPGECAM e-mail: cassia.porto@ufpe.br; 2 Universidade Federal de Pernambuco, PPGEQ, e-mail: floro.arruda@ufpe.br, 3 Universidade Federal de Pernambuco, PPGEQ, e-mail: josevitor.aragao@ufpe.br 4 Universidade Federal de Pernambuco, ProfÁgua, e-mail: amanda.aguiar@ufpe.br 1 Universidade Federal de Pernambuco, PPGECAM e-mail: gilson.lsilva@ufpe.br

Palavras-chave: Infraestrutura verde; Caatinga; Soluções baseadas na natureza.

Resumo

O bioma Caatinga, caracterizado por condições climáticas semiáridas, elevadas temperaturas e irregularidade pluviométrica, apresenta crescente vulnerabilidade frente às mudanças climáticas e à expansão urbana desordenada. Nesse contexto, a infraestrutura urbana convencional, baseada predominantemente em soluções rígidas e impermeáveis, tem se mostrado insuficiente para mitigar problemas como ilhas de calor, baixa infiltração hídrica e aumento do escoamento superficial. Diante desse cenário, as soluções baseadas na natureza (*Nature-Based Solutions* – NbS) e a infraestrutura verde emergem como alternativas sustentáveis e resilientes, capazes de integrar processos ecológicos ao planejamento urbano. Este estudo tem como objetivo analisar o potencial da infraestrutura verde como estratégia de adaptação climática no bioma Caatinga, com foco na aplicação de tecnologias sustentáveis adaptadas às condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro. A pesquisa adota abordagem qualitativa, de caráter exploratório, fundamentada em revisão integrativa da literatura científica recente, com ênfase em estudos indexados nas bases de dados da *Scopus* e da *Web of Science*. Foram analisadas tecnologias como telhados verdes, jardins de chuva, pavimentos permeáveis e sistemas de captação e reuso de águas pluviais, avaliando sua viabilidade técnica, ambiental e funcional no contexto da Caatinga. Os resultados indicam que essas soluções podem promover redução significativa das temperaturas urbanas, aumento da infiltração de água no solo, mitigação de alagamentos e melhoria da qualidade ambiental urbana. Além disso, a infraestrutura verde contribui para a conservação da biodiversidade local e para a promoção de serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação térmica e hídrica. Conclui-se que a adaptação da infraestrutura verde ao bioma Caatinga representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento de cidades mais resilientes, sustentáveis e alinhadas às demandas climáticas contemporâneas. O estudo reforça a necessidade de incorporação dessas soluções em políticas públicas e instrumentos de planejamento urbano no semiárido brasileiro, contribuindo para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 11, 13 e 15.

Introdução

O avanço das mudanças climáticas tem intensificado os desafios ambientais em regiões semiáridas ao redor do mundo, especialmente no que se refere à escassez hídrica, ao aumento das temperaturas médias e à maior frequência de eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas concentradas (IPCC, 2023). No Brasil, o bioma Caatinga destaca-se como uma das áreas mais vulneráveis a essas transformações, devido às suas características edafoclimáticas específicas, como elevada evapotranspiração, irregularidade pluviométrica e baixa disponibilidade hídrica superficial (Marengo *et al*., 2020).

Paralelamente, regiões áridas em todo o mundo enfrentam desafios complexos devido às mudanças climáticas e às atividades humanas (Rocha *et al*., 2024). Em particular, o processo de urbanização no semiárido brasileiro tem ocorrido, em muitos casos, de forma pouco planejada e com forte dependência de soluções convencionais de infraestrutura, baseadas em materiais impermeáveis e sistemas rígidos de drenagem. Esse modelo contribui para a intensificação de problemas urbanos, como a formação de ilhas de calor, aumento do escoamento superficial e redução da infiltração de água no solo, agravando a vulnerabilidade socioambiental das cidades inseridas no bioma Caatinga (Ramos *et al*., 2020).

Diante desse cenário, a adoção de abordagens inovadoras e sustentáveis torna-se fundamental para promover a adaptação climática e a resiliência urbana. Nesse contexto, destacam-se as soluções baseadas na natureza (*Nature-Based Solutions* – NbS), definidas como ações que utilizam processos naturais para enfrentar desafios ambientais, sociais e econômicos de forma integrada (IUCN, 2020). A infraestrutura verde, por sua vez, configura-se como um conjunto de estratégias que incorporam elementos naturais e sistemas ecológicos ao ambiente urbano, promovendo benefícios como regulação térmica, controle do escoamento superficial e melhoria da qualidade ambiental (Wang *et al*., 2022).

Entretanto, apesar do avanço dessas soluções em regiões temperadas e úmidas, ainda há lacunas significativas quanto à sua adaptação e aplicabilidade em ambientes semiáridos, especialmente no bioma Caatinga. A utilização de espécies vegetais não adaptadas, o alto endemismo, a limitação hídrica e as características dos solos locais representam desafios adicionais para a implementação dessas tecnologias (Sá e Sousa, 2024). Dessa forma, torna-se necessário reinterpretar os princípios da infraestrutura verde à luz das condições ambientais do semiárido brasileiro, incorporando estratégias de baixo consumo hídrico, uso de espécies nativas xerófitas e integração com sistemas de aproveitamento de águas pluviais.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o potencial da infraestrutura verde como estratégia de adaptação climática no bioma Caatinga, com foco na aplicação de soluções baseadas na natureza adaptadas às condições locais. Ao integrar conceitos de engenharia ambiental, planejamento urbano e ecologia do semiárido, este trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de diretrizes sustentáveis que possam subsidiar políticas públicas e práticas de urbanização mais resilientes no semiárido brasileiro.

Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e objetivo exploratório, sendo conduzida por meio de uma revisão integrativa da literatura científica acerca da aplicação de infraestrutura verde e soluções baseadas na natureza (NbS) em contextos urbanos, com ênfase na adaptação ao bioma Caatinga. A revisão da literatura é um método sistemático de identificação, seleção e análise de estudos científicos, que visa sintetizar o conhecimento existente e identificar lacunas de pesquisa, sendo conduzida por meio de procedimentos estruturados e reprodutíveis (Shaffril et al., 2021).

O processo de revisão foi estruturado com base nas recomendações do protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), amplamente utilizado para garantir transparência, rastreabilidade e reprodutibilidade em revisões sistemáticas e integrativas (Page et al., 2021). Inicialmente, foi realizada a etapa de identificação dos estudos, por meio de buscas em bases de dados científicas de ampla relevância internacional, incluindo Scopus e Web of Science. A estratégia de busca foi definida a partir de combinações de palavras-chave em inglês, utilizando operadores booleanos, conforme a seguinte expressão para a string de pesquisa: (“green infrastructure” OR “nature-based solutions” OR “urban resilience”) AND (“semi-arid” OR “drylands” OR “Caatinga”) AND (“climate adaptation” OR “urban sustainability”).

A condução da revisão da literatura seguiu as diretrizes do protocolo PRISMA para assegurar transparência, reprodutibilidade e rigor metodológico no processo de seleção dos estudos (PAGE et al., 2021). O fluxo completo dessas etapas está representado na Figura 1, que ilustra o processo metodológico adotado com base no protocolo PRISMA. Foram considerados artigos publicados no período de 2020 a 2025, com o intuito de garantir a atualidade e relevância das evidências analisadas.

Após a etapa de identificação, procedeu-se à remoção de duplicatas e, em seguida, à triagem dos estudos por meio da leitura de títulos e resumos, excluindo-se aqueles que não atendiam aos critérios de elegibilidade. Os critérios de inclusão compreenderam: (i) artigos científicos; (ii) estudos que abordassem infraestrutura verde ou NbS; (iii) pesquisas relacionadas à adaptação climática, resiliência urbana ou sustentabilidade; e (iv) estudos desenvolvidos em regiões semiáridas ou com potencial de aplicação ao bioma Caatinga. Foram excluídos trabalhos duplicados, publicações sem acesso ao texto completo, estudos estritamente técnicos sem interface com sustentabilidade urbana e pesquisas não aplicáveis ao contexto climático do semiárido.

Na etapa de elegibilidade, os artigos selecionados foram analisados na íntegra, permitindo a exclusão de estudos que não apresentavam aderência ao escopo da pesquisa ou que não forneciam informações suficientes para análise. Ao final do processo, foi constituído o portfólio final de estudos incluídos na revisão, conforme fluxo metodológico baseado no PRISMA.

Para a organização dos dados, os artigos selecionados foram sistematizados em tabelas categorizadas com informações relevantes, tais como: tipo de solução de infraestrutura verde, benefícios ambientais associados, contexto climático de aplicação, limitações identificadas e potencial de adaptação ao semiárido. A análise dos dados foi conduzida por meio da análise temática de conteúdo, possibilitando a identificação de padrões, recorrências e lacunas na literatura, a partir de um processo sistemático de codificação, categorização e interpretação dos dados qualitativos (Ahmed, 2023).

As informações foram agrupadas em três eixos analíticos principais: (I) benefícios ambientais das soluções baseadas na natureza, com destaque para regulação térmica, infiltração hídrica e melhoria da qualidade ambiental; (II) limitações e desafios de implementação em regiões semiáridas, incluindo restrições hídricas e adaptação de espécies vegetais; e (III) diretrizes para aplicação no bioma Caatinga. Com base nessa síntese analítica, foi proposta uma abordagem conceitual denominada Infraestrutura Verde Adaptada à Caatinga (IVAC), que integra o uso de espécies nativas xerófitas, sistemas de baixo consumo hídrico, soluções permeáveis e estratégias de captação e reuso de águas pluviais.

Por fim, destaca-se que, embora a metodologia adotada permita uma análise abrangente e sistematizada da literatura, o estudo apresenta limitações inerentes à utilização de dados secundários, não contemplando validação empírica das soluções propostas. Ainda assim, os resultados fornecem subsídios teóricos consistentes para o desenvolvimento de pesquisas futuras de caráter experimental e aplicado, bem como para a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade urbana no semiárido brasileiro.



Figura 01: Fluxograma da metodologia PRISMA adotada para a pesquisa.
Fonte: Autores (2026)

Resultados e Discussão

A aplicação do protocolo PRISMA permitiu a seleção final de 41 estudos relevantes, sendo 35 provenientes da base Scopus e 6 da Web of Science, evidenciando a crescente produção científica sobre Nature-Based Solutions (NbS) e infraestrutura verde em regiões áridas e semiáridas. A sistematização desses estudos revela uma evolução da literatura, que passa de abordagens isoladas para estratégias integradas, nas quais água, solo, vegetação e governança são tratados como componentes interdependentes na adaptação climática. A Figura 2 ilustra o fluxograma de implementação da metodologia PRISMA.

A análise dos estudos permitiu a categorização das NbS e da infraestrutura verde em seis grupos principais: (I) gestão hídrica baseada na natureza; (II) infraestrutura verde urbana para mitigação térmica; (III) restauração ecológica e revegetação; (IV) sistemas agroecológicos resilientes; (V) soluções baseadas no solo; e (VI) governança e planejamento territorial. A distribuição percentual dessas categorias, representada na Figura 3, evidencia a predominância de estudos voltados à gestão hídrica (27%) e à infraestrutura verde urbana (22%), seguidos por sistemas agroecológicos (20%) e restauração ecológica (15%), enquanto soluções baseadas no solo (4%) e governança (2%) apresentam menor representatividade.

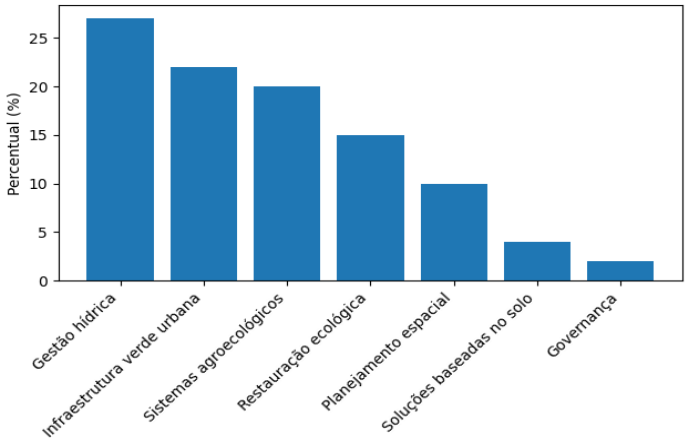


Figura 03: Distribuição das categorias de NbS e Infraestrutura verde (n=41).
Fonte: Autores (2026)

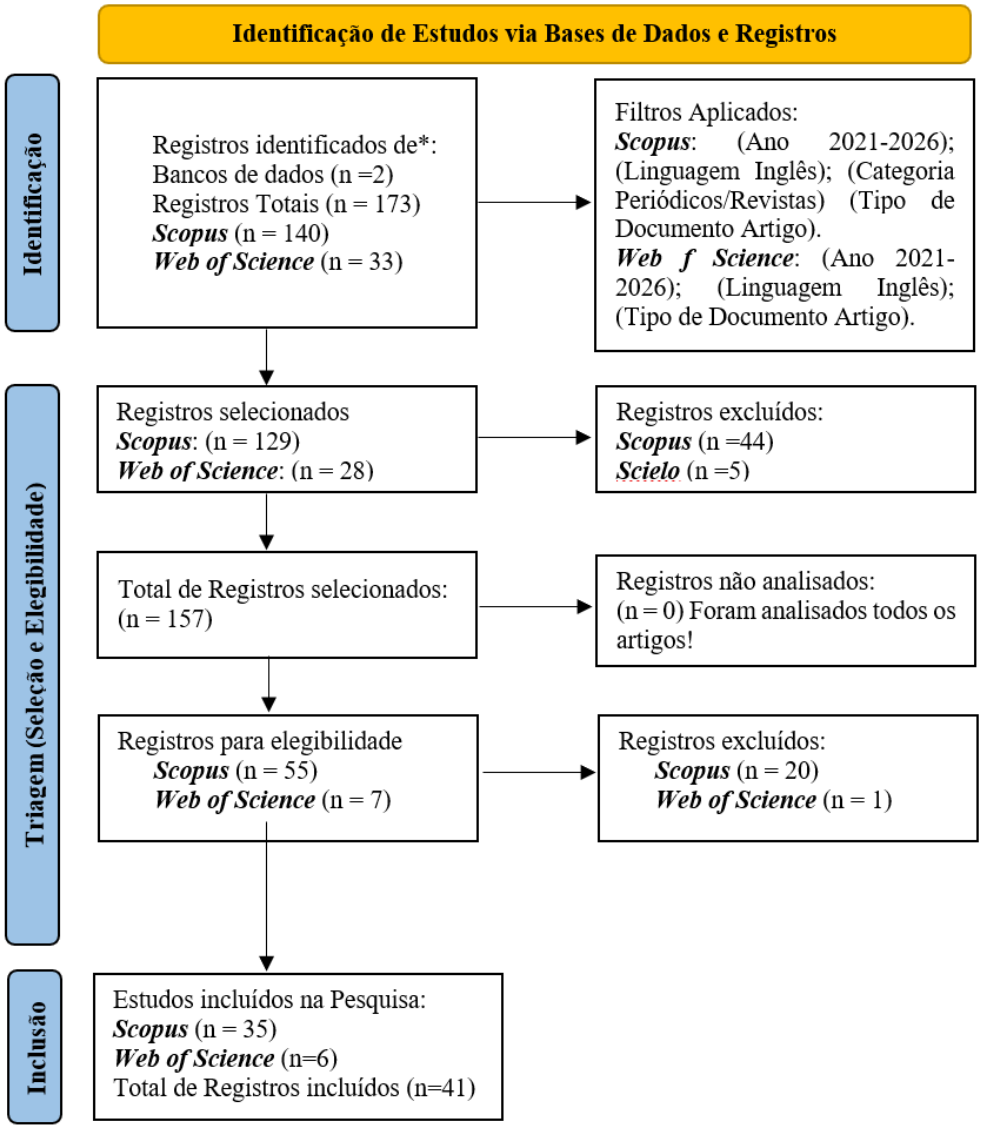


Figura 02: Resultado quantitativo da metodologia PRISMA adotada para a pesquisa.
Fonte: Autores (2026)

A Tabela 1 apresenta uma síntese sistematizada dos 41 estudos selecionados, evidenciando as principais categorias de NbS e GI aplicadas em regiões semiáridas. A análise contempla aspectos como tipologia das intervenções, escala de aplicação, objetivos, métodos empregados, resultados obtidos, benefícios ambientais, limitações e potencial de aplicação no bioma Caatinga. De modo geral, observa-se a predominância de estratégias voltadas à gestão hídrica, restauração ecológica e infraestrutura verde urbana, refletindo a centralidade da disponibilidade de água, da recuperação de ecossistemas degradados e da adaptação climática nesses territórios. Essa sistematização permite identificar tendências, lacunas e oportunidades, reforçando o potencial das NbS como abordagem integrada e promissora para a promoção da resiliência socioambiental em contextos semiáridos.

A distribuição temática dos estudos mostrou predominância de trabalhos voltados à gestão hídrica baseada na natureza, seguida por pesquisas sobre infraestrutura verde urbana para mitigação térmica, restauração ecológica, sistemas agroecológicos resilientes, soluções baseadas no solo e governança e planejamento territorial. Esse padrão revela que, em ambientes secos, a água permanece como eixo estruturante das NbS, seja no meio rural, por meio de recarga, infiltração e conservação hídrica, seja no meio urbano, por meio da regulação microclimática, do uso de infraestrutura verde e da retenção de escoamento.

Categoria de NbS / GI	Autores/Ano	Subtipo	Nº de Estudos	Escala de Aplicação	Objetivo Principal	Métodos	Principais Resultados	Benefícios Ambientais	Trade-offs / Limitações	Aplicabilidade na Caatinga
Gestão hídrica baseada na natureza	Rahman et al. (2023); Camarero et al. (2024); El Baida et al. (2025); Banihabib et al. (2021); Jódar et al. (2022); Tefera et al. (2025); Abbas et al. (2025); Vilca-Campana et al. (2025)	Wetlands construídos, acequias/canais de recarga, barramentos de infiltração, stone bunds, water spreading bunds, gestão de água virtual, corredores fluviais urbanos	8	Local, rural, urbana e regional	Aumentar infiltração, retenção, recarga e eficiência do uso da água	Experimental, modelagem hidrológica, modelagem fuzzy, sensoriamento remoto, GIS, machine learning	Os estudos mostraram aumento da umidade do solo, maior recarga aquífera, redução do escoamento e otimização do uso hídrico; em Lake Urmia, a modelagem indicou redução de até 40% no uso agrícola da água com ganho econômico; em Sierra Nevada, os canais responderam por 48% da recarga total do aquífero	Segurança hídrica, redução da desertificação, conservação de solo e água, restauração eco-hidrológica	Dependência de manutenção, topografia adequada, governança local e, em alguns casos, maior complexidade institucional	**Muito alta**, sobretudo para barragens de infiltração, wetlands construídos, stone bunds, recarga difusa e manejo de bacias no semiárido
Infraestrutura verde urbana e resfriamento climático	Pumo et al. (2023a, 2023b); Abd-Elmabod et al. (2024); Marando et al. (2022); Li et al. (2026); Elnabawi et al. (2026); Robbiati et al. (2025); Yusuf et al. (2025); Segura-Barrero et al. (2024); Gasbarrone et al. (2026)	Telhados verdes e azul-verde, parques urbanos, cool roofs, cool pavements, green walls, espaços verdes e azuis, agricultura periurbana	10	Urbana	Mitigar ilhas de calor, melhorar conforto térmico e ampliar serviços ecossistêmicos urbanos	Monitoramento térmico, ENVI-met, EnergyPlus, sensoriamento remoto, GIS, PCA, modelagem ecossistêmica	Foram observadas reduções térmicas entre cerca de 2 °C e 3,5 °C no ar e até 10–12 °C na superfície em soluções integradas ; em Xi'an, parques apresentaram resfriamento médio de 2,53 °C e alcance de 323,9 m	Regulação microclimática, conforto térmico, redução de demanda energética, melhoria da qualidade ambiental urbana	Em alguns casos, exigem irrigação, manutenção contínua, custos iniciais e enfrentam trade-off com disponibilidade hídrica	**Alta**, especialmente para arborização, parques lineares, telhados verdes em edifícios estratégicos e GI urbana de baixo consumo hídrico
Planejamento espacial e seleção de áreas para GI / arborização	Olgun et al. (2024); Şenol, Yiğit e Ulvi (2025); Qu et al. (2026); Al-Hagla e Alrawaf (2025)	GIS-MCDA, AHP, deep learning, zoneamento de arborização, planejamento azul-verde	4	Urbana e regional	Identificar áreas prioritárias e otimizar a implantação espacial de NbS/GI	GIS, análise multicritério, AHP, modelagem espacial, inferência variacional, deep learning	Os estudos mostraram que o planejamento espacial melhora a eficiência ecológica e a alocação de intervenções; em Şanlıurfa, 151,33 km² foram classificados como muito adequados para arborização urbana	Maior eficiência no uso do solo, melhor alocação das soluções, suporte à adaptação climática	Forte dependência da qualidade dos dados geoespaciais, critérios de ponderação e capacidade técnica local	**Alta**, sobretudo para zoneamento ecológico-econômico, arborização urbana e priorização de áreas de restauração na Caatinga
Restauração ecológica e revegetação	Murage et al. (2024); Lortie et al. (2024); Song et al. (2025); Jawabreh et al. (2025); Kiribou et al. (2025); Sarlak et al. (2021)	Regeneração natural assistida, espécies facilitadoras, revegetação, restauração de paisagens degradadas, greenbelts	6	Rural, ecossistêmica e regional	Recuperar cobertura vegetal, biodiversidade e funcionalidade ecológica	Série temporal ecológica, estudos de caso, campo, sensoriamento remoto, modelagem ecológica, planejamento territorial	Os estudos evidenciaram aumento da cobertura vegetal, melhoria da estabilidade do solo e maior resiliência ecológica; espécies facilitadoras favoreceram biodiversidade sob aquecimento	Conservação da biodiversidade, controle de erosão, redução da temperatura do solo, restauração funcional da paisagem	Resultados dependem do tempo ecológico, da seleção de espécies e da adesão comunitária	**Muito alta**, principalmente via regeneração natural assistida, espécies nurse e cinturões verdes produtivos adaptados
Sistemas agroecológicos resilientes e produção adaptativa	Varyvoda et al. (2024); Shahariar et al. (2024); Llovet et al. (2024); Carvajal et al. (2025); Pulido-Esquivel et al. (2025); Manyakaidze et al. (2025); Pienaah et al. (2025); Pienaah et al. (2026)	Agroflorestas, FMNR, sistemas biodiversos, agroecossistemas úmidos, bioenergia com plantas CAM, sistemas alimentares resilientes	8	Rural e regional	Integrar produção, conservação e adaptação climática	Campo, revisões, entrevistas, survey, modelagem, análise socioecológica	Os estudos apontaram maior infiltração, produtividade, resiliência produtiva e melhor retenção hídrica; sistemas agroflorestais aumentaram a umidade do solo e o potencial de recarga ; FMNR mostrou forte potencial restaurativo, mas sensível ao tipo de manejo	Segurança alimentar, resiliência produtiva, conservação do solo e da água, menor vulnerabilidade climática	Tempo de resposta ecológica, dependência de manejo, financiamento e apoio técnico	**Muito alta**, sobretudo para agroflorestas secas, sistemas silvipastoris, FMNR e agricultura familiar adaptada ao semiárido
Soluções baseadas no solo	Kausar et al. (2025); Liu et al. (2021)	Biochar, MICP, melhoria estrutural e funcional do solo	2	Local	Melhorar retenção hídrica, fertilidade e estabilidade do solo	Revisão, ensaios laboratoriais e experimentais	O biochar elevou retenção de água, fertilidade e biomassa em áreas degradadas; o MICP reduziu evaporação, perda total de água e fissuração do solo	Recuperação de solos degradados, sequestro de carbono, maior estabilidade hídrica do solo	Escalabilidade ainda limitada, custos e necessidade de maior validação em campo	**Alta**, especialmente para recuperação de solos degradados e áreas em processo de desertificação
Governança, justiça socioambiental e adaptação integrada	Singh e Chudasama (2021); Radonic et al. (2025); Zúñiga-Teran et al. (2025)	Planejamento participativo, justiça ambiental, governança climática, GI socialmente responsiva	3	Comunitária, urbana e regional	Fortalecer a efetividade social e institucional das NbS	Fuzzy Cognitive Maps, oficinas participativas, métodos mistos, análise qualitativa	Os estudos mostraram que NbS mais eficazes dependem de inclusão social, reconhecimento de preferências locais e governança adaptativa; em Tucson, foi identificado desalinhamento entre programas de greening e demandas comunitárias	Maior legitimidade, inclusão social, adesão local e resiliência socioambiental	Sem participação e alinhamento sociocultural, as soluções podem falhar ou reproduzir desigualdades	**Muito alta**, pois a Caatinga exige forte articulação entre conhecimento local, gestão comunitária e políticas públicas

Tabela 01: Síntese das Soluções Baseadas na Natureza (NbS) e Infraestrutura Verde (GI) em regiões semiáridas: análise dos estudos selecionados (n = 41).
Fonte:Autores (2024)

No grupo de estudos focados em gestão hídrica, os resultados foram particularmente expressivos. Soluções como wetlands construídos, recarga artificial de aquíferos, estruturas físicas de retenção de água (stone bunds, water spreading bunds), canais tradicionais de infiltração, barramentos de pedra e estratégias de gestão de água virtual mostraram elevada efetividade na redução da pressão sobre os recursos hídricos e na melhoria das condições eco-hidrológicas. No caso do Lago Urmia, em contexto árido e semiárido no Irã, a modelagem fuzzy aplicada à otimização do comércio de água incorporada mostrou que cenários de maior flexibilidade produtiva poderiam reduzir o uso agrícola de água em até 40% e, simultaneamente, ampliar a renda do setor, evidenciando que soluções de gestão podem conciliar eficiência hídrica e viabilidade econômica (Banihabib et al., 2021).

A infraestrutura verde urbana destacou-se como estratégia eficaz para mitigação de ilhas de calor e melhoria do conforto térmico. Estudos indicaram reduções de temperatura do ar entre 2 °C e 3,5 °C, podendo atingir até 10–12 °C na superfície em soluções integradas. No entanto, observa-se que parte dessas soluções apresenta dependência de irrigação e manutenção contínua, o que pode limitar sua aplicabilidade em regiões com forte restrição hídrica, como a Caatinga, reforçando a necessidade de adaptação com base em espécies nativas e tecnologias de baixo consumo hídrico.

Com base na análise sugere que, para o semiárido, a efetividade das NbS depende menos de intervenções de grande porte e mais da capacidade de mobilizar soluções territorialmente adaptadas, multifuncionais e hidrologicamente eficientes. Isso é especialmente relevante para o contexto da Caatinga, onde a irregularidade pluviométrica, a intermitência fluvial e a alta evapotranspiração tornam prioritárias as soluções voltadas ao aumento da infiltração, retenção temporária da água, recarga difusa

e melhoria da capacidade de armazenamento hídrico dos solos. Assim, técnicas inspiradas em stone bunds, barragens de espalhamento, wetlands construídos, recarga gerida de aquíferos e reuso local de águas cinzas mostram elevada aderência às necessidades ambientais e sociais do semiárido brasileiro.

Esse conjunto de evidências é particularmente valioso para a Caatinga, onde a restauração ecológica e revegetação frequentemente enfrenta limitações relacionadas à baixa disponibilidade hídrica, degradação edáfica e simplificação da cobertura vegetal. A literatura sugere que estratégias baseadas em regeneração natural assistida, espécies nurse, revegetação com espécies localmente adaptadas e manejo hidrológico integrado tendem a ser mais eficazes do que modelos convencionais de reflorestamento homogêneo. Essa interpretação é reforçada pelos estudos sobre near-natural forestation, que demonstraram a importância de incorporar variáveis hidrológicas, topográficas e climáticas ao planejamento do florestamento, a fim de evitar superestimação de áreas aptas e fracasso de plantios em ambientes secos (Qu et al., 2026; Senol, Yiğit e Ulvi, 2025).

De forma integrada, os resultados indicam que a efetividade das NbS na Caatinga depende da articulação entre eficiência eco-hidrológica, adaptação climática e governança local, evitando a replicação de modelos exógenos não compatíveis com as especificidades do semiárido brasileiro. Destacam-se como aplicações prioritárias: (I) técnicas de retenção e infiltração de água, como barragens de pequeno porte e stone bunds; (II) sistemas de reuso e wetlands construídos; (III) infraestrutura verde urbana com espécies nativas e baixo consumo hídrico; (IV) restauração ecológica baseada em regeneração natural assistida; (V) sistemas agroflorestais e silvipastoris adaptados; e (VI) uso de biochar para recuperação de solos degradados.

Apesar do avanço conceitual e do crescente volume de publicações, observa-se que a literatura ainda apresenta limitações significativas quanto à aplicabilidade prática das soluções propostas. Grande parte dos estudos concentra-se em modelagens, simulações ou análises teóricas, com reduzida validação em campo, especialmente em contextos semiáridos complexos como a Caatinga. Além disso, verifica-se uma tendência de transposição de modelos desenvolvidos em regiões temperadas, sem a devida adaptação às condições edafoclimáticas locais, o que pode comprometer a efetividade e a sustentabilidade das intervenções. Outro aspecto crítico refere-se à baixa incorporação de dimensões socioinstitucionais, como governança, participação comunitária e viabilidade econômica, elementos fundamentais para a implementação e manutenção das NbS. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de abordagens mais integradas, interdisciplinares e orientadas à aplicação real, capazes de superar a lacuna entre o conhecimento científico e a prática territorial.

Conclusão

Os achados reforçam que soluções baseadas na natureza, quando territorialmente adaptadas, representam não apenas alternativas sustentáveis, mas elementos estruturantes para a resiliência climática no semiárido brasileiro. Os resultados demonstram que as Nature-Based Solutions (NbS) e a infraestrutura verde são estratégias eficazes para a adaptação climática em regiões semiáridas, com destaque para a gestão hídrica, restauração ecológica e mitigação térmica urbana. No bioma Caatinga, evidenciou-se que soluções de baixo custo, adaptadas às condições edafoclimáticas locais e baseadas no uso de espécies nativas e técnicas de retenção hídrica, apresentam maior viabilidade e potencial de replicação.

Como contribuição, o estudo propõe a abordagem de Infraestrutura Verde Adaptada à Caatinga (IVAC), integrando soluções eco-hidrológicas e estratégias territorialmente contextualizadas. Apesar dos avanços, ainda há lacunas quanto à aplicação empírica e à avaliação de longo prazo dessas soluções. Conclui-se que a integração entre NbS e infraestrutura verde constitui um caminho estratégico para o desenvolvimento de territórios mais resilientes e sustentáveis no semiárido brasileiro, contribuindo diretamente para os ODS 6, 11, 13 e 15.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGECAM), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ), à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio acadêmico, institucional e científico que viabilizou a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

AHMED, S. K.; MOHAMMED, R. A., NASHWAN, A. J.; IBRAHIM, R. H.; ABDALLA, A. Q.; AMEEN, B. M. M.; KHDHIR, R. M. Using thematic analysis in qualitative research. Journal of Medicine, Surgery, and Public Health, v. 6, p. 100198, 2025.

BANIHABIB, M. E.; JURIK, L.; KHORASANI, M. M. A.; SHAHDANY, S. M. H.; MOHAMMADI, A.; POKRÝVKOVÁ, J. Optimizing Embedded Water Trades to Conserve Lakes in Arid and Semiarid Regions. Polish Journal of Environmental Studies, v. 30, n. 5, p. 4413-4423, 2021. https://doi.org/10.15244/pjoes/129701.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN).

Global Standard for Nature-Based Solutions. Gland: IUCN, 2020.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P. M., NOBRE, C. A.; RIBEIRO NETO, G. G.; MAGALHAES, A. R.; TORRES, R. R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L. M.; CUARTAS, L. A.; DEUSDARÁ, K. R. L.; ÁLVALA, R. C. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 C. Natural Hazards, v. 103, n. 2, p. 2589-2611, 2020. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; ... & MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. Revista panamericana de salud publica, v. 46, p. e112, 2022. https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112.

QU, J.; LIU, Q.; GUI, D., LIU, Y.; FENG, X.; ABD-ELMABOD, S. K.; WANG, H.; ZHAO, J.; CI, M. Quantifying uncertainty for near-natural forestation in arid regions. Journal of Arid Environments, v. 233, p. 105553, 2026. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2026.105553.

RAMOS, P. R.; NASCIMENTO, D. C., FERREIRA DO NASCIMENTO, A. V.; SANTANA, I. V. A.; ALVES, M. M. S.; GALVÃO FILHO, R. R.; SOARES, C. D.; FERREIRA, R. A.; BISPO, I. A. B.; CUNHA, P. P.; ALVES DO SANTOS, M. D.; SANTOS, B. E. L. R. Urbanização Doente e a Fabricação da Escassez no Semiárido. Veredas do Direito, v. 23, p. e235305-e235305, 2026. http://dx.doi.org/10.18623/rvd.v23.5305.

ROCHA, W. J. F.; VASCONCELOS, R. N.; COSTA, D. P.; DUVERGER, S. G.; LOBÃO, J. S. B.; SOUZA, D. T. M.; HERRMANN, S. M.; SANTOS, N. A.; FRANCA ROCHA, R. O.; AGUIAR, W. M.. Towards uncovering three decades of LULC in the Brazilian drylands: Caatinga biome dynamics (1985–2019). Land, v. 13, n. 8, p. 1250, 2024. https://doi.org/10.3390/land13081250.

SÁ, A. A.; SOUSA, C. R. C. Biodiversidade e Conservação da Caatinga: Um Desafio para a Ciência. Revista Contemporânea, v. 4, n. 12, p. e7136-e7136, 2024. https://doi.org/10.56083/RCV4N12-258.

ŞENOL, H. İ.; YIĞIT, A. Y.; ULVI, A. GIS-Based Multi-Criteria Analysis for Urban Afforestation Planning in Semi-Arid Cities. Forests, v. 16, n. 7, p. 1064, 2025. https://doi.org/10.3390/f16071064.

SHAFFRIL, H. A. M.; SAMSUDDIN, S. F.; ABU SAMAH, A. The ABC of systematic literature review: the basic methodological guidance for beginners: HA Mohamed Shaffril et al. Quality & quantity, v. 55, n. 4, p. 1319-1346, 2021.

VILCA-CAMPANA, K.; CARRASCO-VALENCIA, L.; IRURI-RAMOS, C., CÁRDENAS-PILLCO, B., ESCUDERO, A.; CHANOVE-MANRIQUE, A. Improving urban flood resilience: Urban flood risk mitigation assessment using a geospatial model in the urban section of a river corridor. Water, v. 17, n. 7, p. 1047, 2025. https://doi.org/10.3390/w17071047.

WANG, D.; XU, P. Y.; AN, B. W.; GUO, Q. P. Urban green infrastructure: Bridging biodiversity conservation and sustainable urban development through adaptive management approach. Frontiers in Ecology and Evolution, v. 12, p. 1440477, 2024.

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ETA SECOS E ÚMIDOS PARA FABRICAÇÃO SUSTENTÁVEL DE MATERIAIS CERÂMICOS

1 Jonas Pablo Cavalcante Lima dos Santos, 2 Joana Eliza de Santana, 3 Aldebarã Fausto Ferreira 4 Marcos Gomes Ghislandi, 5 Maurício Alves da Motta Sobrinho

1 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: jonas.pablo@ufpe.br; 2 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: joana.santana@ufpe.br; 3 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: aldebara.fausto@ufpe.br; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: marcos.ghislandi@ufrpe.br; 5 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: mauricio.motta@ufpe.br

Palavras-chave: Lodo de ETA; Blocos cerâmicos; Valorização de resíduos.

Resumo

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) geram grandes volumes de lodo como subproduto do processo de potabilização da água, cuja destinação inadequada pode provocar impactos ambientais significativos. Nesse contexto, o reaproveitamento desse resíduo em processos industriais surge como alternativa promissora para a gestão sustentável de resíduos. O presente trabalho investiga a incorporação de lodo de ETA em sua forma seca e úmida como aditivo na produção de cerâmica vermelha, visando avaliar sua viabilidade técnica na fabricação de blocos cerâmicos. As amostras de lodo foram coletadas em uma estação de tratamento de água localizada no estado de Pernambuco, enquanto a argila vermelha foi obtida de uma olaria da Zona da Mata Pernambucana. Inicialmente, os materiais foram caracterizados quanto às suas propriedades químico-estruturais e mineralógicas. Em seguida, foram preparados corpos de prova contendo diferentes teores de lodo incorporado à massa cerâmica. As amostras foram moldadas, secas e submetidas a tratamento térmico. Os dados de caracterização obtidos demonstraram a similaridade entre a argila vermelha e o lodo de ETA, evidenciada por meio das análises termogravimétrica, difração de raios X e espectroscopia no infravermelho que indicaram comportamentos térmicos e fases mineralógicas compatíveis entre os materiais. Essa compatibilidade reforça o potencial do lodo como matéria-prima alternativa na produção cerâmica. Os resultados experimentais demonstram que a incorporação do lodo, tanto seco quanto úmido, mantém os valores de perda ao fogo, absorção de água e porosidade aparente dentro de faixas compatíveis com os requisitos para cerâmica vermelha. A manutenção desses parâmetros físicos sugere que o lodo atua de forma sinérgica com a matriz argilosa, sem comprometer a estabilidade dimensional das peças durante as etapas de secagem e tratamento térmico. Conclui-se que o aproveitamento do lodo de ETA em estado úmido (apenas desaguado) é uma alternativa promissora, pois simplifica o fluxo produtivo ao eliminar a etapa de secagem do resíduo, alinhando viabilidade técnica e sustentabilidade ambiental.

Introdução

O crescimento populacional, aliado à expansão urbana e ao aumento da demanda por água potável, tem impulsionado a ampliação do número de estações de tratamento nas últimas décadas. Como consequência direta, também ocorre o aumento do volume de resíduos gerados por essas unidades. Estima-se que, no Brasil, as estações de tratamento de água produzam entre 1 e 3% do volume total de água tratada na forma de lodo, o que representa centenas de milhares de metros cúbicos desse resíduo gerados diariamente (Rodrigues; Carneiro, 2023; Oliveira et al., 2004; Moreira et al., 2009). Apesar desse volume expressivo, a gestão e a destinação adequada desse material ainda constituem um desafio para o setor de saneamento. O lodo de ETA gerado como subproduto das operações unitárias envolvidas no processo de tratamento de água, é um resultado direto das etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. Nessas fases, são adicionados coagulantes químicos, geralmente sais de alumínio ou ferro, que promovem a aglomeração das partículas em suspensão presentes na água bruta. Como resultado, ocorre a formação de flocos que sedimentam e são removidos do sistema, originando o lodo de ETA. Esse resíduo é constituído principalmente por sólidos suspensos, matéria orgânica, partículas minerais, microrganismos e resíduos dos reagentes utilizados no tratamento, especialmente compostos à base de alumínio (Santos, 2023).

Historicamente, o lodo de ETA foi considerado um passivo ambiental e frequentemente tratado como um subproduto sem relevância econômica. Por esse motivo, em muitas localidades, sua disposição ainda ocorre de forma inadequada, sendo comum o descarte direto em corpos hídricos ou no solo, sem tratamento ou manejo técnico apropriado (Morselli et al., 2022). Essa prática pode provocar impactos ambientais relevantes, como o aumento da turbidez e da carga de sólidos nos cursos d'água, assoreamento de rios, alteração das características físico-químicas dos ecossistemas aquáticos e possível contaminação do solo e da água por metais ou compostos químicos presentes no resíduo. Além disso, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997) estabelece que a gestão dos recursos hídricos deve assegurar a manutenção da qualidade das águas, sendo incompatível com seus princípios o lançamento de resíduos sólidos ou semissólidos, como o lodo de ETA, diretamente em corpos hídricos sem tratamento adequado. Nesse contexto, destaca-se também a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), que classifica resíduos gerados em processos de tratamento como passíveis de gerenciamento específico, priorizando a redução da geração, a reutilização, a reciclagem e a destinação ambientalmente adequada. Assim, o lodo de ETA deve ser tratado como resíduo sólido que requer manejo técnico apropriado, sendo vedadas práticas de disposição inadequada que possam causar danos ao meio ambiente.

Diante desse cenário, a busca por alternativas sustentáveis para o gerenciamento do lodo de ETA tem ganhado destaque, especialmente no contexto da economia circular e do reaproveitamento de resíduos em processos industriais. A incorporação de

resíduos em materiais cerâmicos tem se mostrado uma estratégia tecnicamente viável e ambientalmente promissora, uma vez que esses materiais podem apresentar propriedades mecânicas, térmicas e químicas adequadas para aplicação na construção civil (Costa et al., 2025). No caso específico do lodo de ETA, sua composição rica em óxidos de silício, alumínio e ferro, semelhante à das argilas naturais, favorece sua utilização como matéria-prima alternativa em massas cerâmicas. Além disso, a utilização do lodo em sua forma úmida dispensa a etapa de secagem, a qual pode vir atrelada a uma elevada quantidade de energia consumida, contribuindo para a melhoria da sustentabilidade global do processo. Nesse sentido, a umidade residual do lodo desaguado pode atuar como agente de plasticidade, reduzindo a demanda por água na etapa de conformação da massa cerâmica.

Sob essa perspectiva, estudos indicam que o lodo de ETA apresenta características mineralógicas compatíveis com materiais argilosos, como a presença de caulinita e óxidos de ferro, bem como comportamento térmico adequado para processos de sinterização (Wang et al., 2026). A incorporação desse resíduo contribui para a redução do consumo de argila e, consequentemente, dos impactos ambientais associados à sua extração, como a degradação do solo, a supressão da vegetação e alterações na paisagem. Dessa forma, a utilização do lodo de ETA em diferentes estados de agregação (seco ou úmido) na produção de cerâmica vermelha configura-se como uma alternativa sustentável e tecnicamente viável, desde que sejam avaliadas suas propriedades físico-químicas e os efeitos de sua incorporação nas características finais dos produtos.

Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da incorporação de lodo de ETA, nos estados seco e úmido (desaguado), como matéria-prima alternativa na produção de cerâmica vermelha. Especificamente, busca-se caracterizar o lodo e a argila vermelha, investigar a influência da incorporação do resíduo em diferentes proporções na massa cerâmica, analisar o impacto dessa adição nas propriedades dos corpos de prova, tais como perda ao fogo, absorção de água e porosidade aparente e avaliar comparativamente o comportamento do material em função do estado de agregação do lodo (seco vs. úmido), visando a otimização do fluxo produtivo e a sustentabilidade no setor de saneamento.

Material e Métodos

As amostras de lodo de ETA foram coletadas na Estação de Tratamento de Água Pirapama (COMPESA), em Cabo de Santo Agostinho (PE), enquanto a argila vermelha provém de uma olaria de Feira Nova (PE). A caracterização das matérias-primas foi realizada por Análise Termogravimétrica (TGA), em uma faixa de 30 a 1000 °C (taxa de 10 °C/min), e Difração de Raios X (DRX), para identificação das fases minerais e avaliação da compatibilidade entre os materiais.

Para a preparação das massas, a argila foi seca em estufa (105 °C por 24 h), moída e peneirada (malha 0,6 mm). O lodo de ETA foi utilizado em dois estados: (i) seco, seguindo o mesmo procedimento de secagem e moagem da argila, e (ii) úmido, conforme coletado após a etapa de desaguamento da estação. Para as formulações úmidas, o teor de sólidos foi previamente determinado para garantir que as proporções de incorporação (2, 5 e 10% em massa) fossem equivalentes à massa seca do resíduo.

A metodologia de incorporação do resíduo e preparação das massas cerâmicas foi adaptada de estudos previamente reportados na literatura (Benlalla et al., 2015; Zhao et al., 2016). As misturas foram homogeneizadas e moldadas por prensagem uniaxial a 37 MPa em moldes cilíndricos. Após 24 h em repouso e secagem em estufa a 105 °C, os corpos de prova foram submetidos à queima em forno tipo mufla a 1000 °C, com patamar de 2 horas e resfriamento natural.

As propriedades físicas foram avaliadas por meio da Perda de peso por ignição (PPI), conforme a Equação 1. A Absorção de Água (AA) e a Porosidade Aparente (PA) foram determinadas seguindo os preceitos da ABNT NBR 15270 (2023) e da ASTM C373 (2023), respectivamente, utilizando o método de imersão por 24 h e as Equações 2 e 3:

$$PPI\ (\%) = \frac{massa\ do\ corpo\ de\ prova\ antes\ da\ queima - massa\ do\ corpo\ de\ prova\ após\ a\ queima}{massa\ do\ corpo\ de\ prova\ antes\ da\ queima}\ x\ 100 \quad (01)$$

$$Absorção\ de\ Água\ (\%) = \frac{massa\ úmida - massa\ seca}{massa\ seca}\ x\ 100 \quad (02)$$

$$Porosidade\ (\%) = \frac{massa\ de\ água\ absorvida}{volume\ do\ corpo\ de\ prova}\ x\ 100 \quad (03)$$

Resultados e Discussão

A análise termogravimétrica da argila vermelha (Figura 01) evidencia um comportamento térmico típico de materiais argilosos empregados na indústria cerâmica, caracterizado por uma perda de massa relativamente baixa quando comparada ao lodo de ETA. Observa-se uma perda total de aproximadamente 9% até 600 °C, indicando a predominância de fases minerais estáveis. Inicialmente, ocorre uma perda de massa discreta (1% a 2%) associada à eliminação de água livre e fisicamente adsorvida. Em temperaturas mais elevadas, especialmente entre 450 °C e 550 °C, verifica-se o principal evento de decomposição térmica, correspondente à desidroxilação da caulinita, processo no qual há liberação de água estrutural e formação de metacaulinita (Araújo et al., 2015). Diferentemente do lodo de ETA, a argila não apresenta perdas significativas associadas à degradação de matéria orgânica, reforçando sua função como material estrutural na matriz cerâmica. Por outro lado, a análise do lodo de ETA evidencia um comportamento característico de resíduos com elevada fração orgânica e alto teor de umidade, com redução total da massa de aproximadamente 30% até 1000 °C. Na região inicial, até 150 °C, ocorre perda acentuada de água livre e fisicamente adsorvida. Na faixa intermediária (150 °C a 500 °C), verifica-se a principal etapa de degradação térmica, relacionada à decomposição da matéria

orgânica e liberação de compostos voláteis. Este comportamento térmico em múltiplas etapas é amplamente descrito na literatura para lodos de tratamento, sendo geralmente dividido em estágios de secagem, decomposição da matéria orgânica e degradação de compostos inorgânicos (Messaoudi et al., 2024). Além disso, a literatura indica que a maior perda de massa ocorre tipicamente entre 200 °C e 600 °C, faixa na qual ocorre a degradação dos principais constituintes orgânicos do resíduo (Liu et al., 2015).

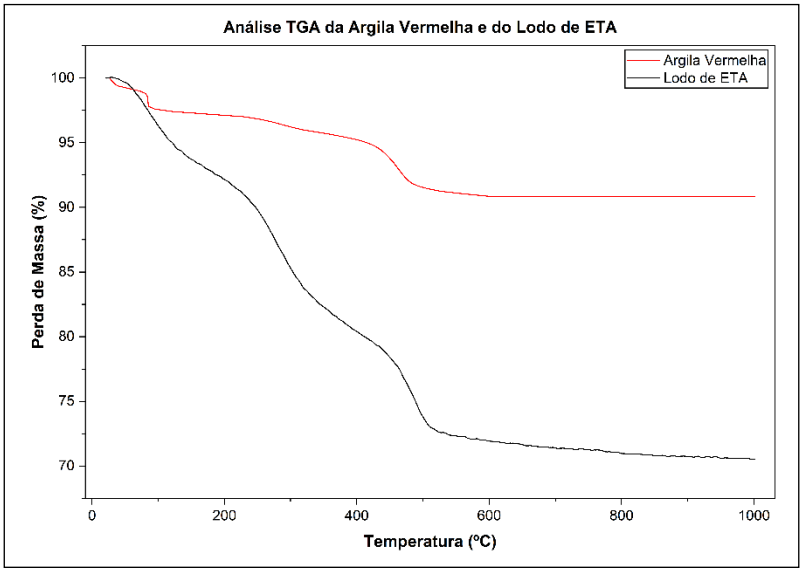


Figura 01: Análise TGA da Argila Vermelha e do Lodo de ETA
Fonte: Os autores (2026).

O difratograma de raios X da argila vermelha (Figura 02) revela uma composição mineralógica típica de materiais sedimentares utilizados na indústria cerâmica, apresentando elevado grau de cristalinidade, evidenciado por picos intensos e bem definidos. O quartzo foi identificado como o mineral predominante (26,66° e 20,85°), enquanto a fração argilosa é composta majoritariamente por caulinita (12,26° e 24,79°), fase responsável pela plasticidade da massa. Observa-se ainda a presença de minerais micáceos, como a muscovita (8,72°), e óxidos de ferro, como a hematita, que confere a coloração avermelhada característica após a sinterização. Em comparação, o DRX do lodo de ETA apresenta um comportamento caracterizado por menor grau de cristalinidade e a presença de um halo amorfo (fundo difuso elevado) e menor relação sinal-ruído, característico de materiais mais amorfos. Nota-se a presença de fases comuns à argila, com picos em torno de 12°, 20° e 24° (caulinita), 26,6° (quartzo) e picos em 35º e 62º que confirmam a presença de muscovita (Ling et al., 2017). Enquanto a argila se apresenta como uma matriz cristalina estável, o lodo de ETA introduz uma fração parcialmente amorfa e reativa ao sistema, o que pode favorecer as interações físico-químicas durante o processo de queima, influenciando propriedades como a densificação e a porosidade final das peças

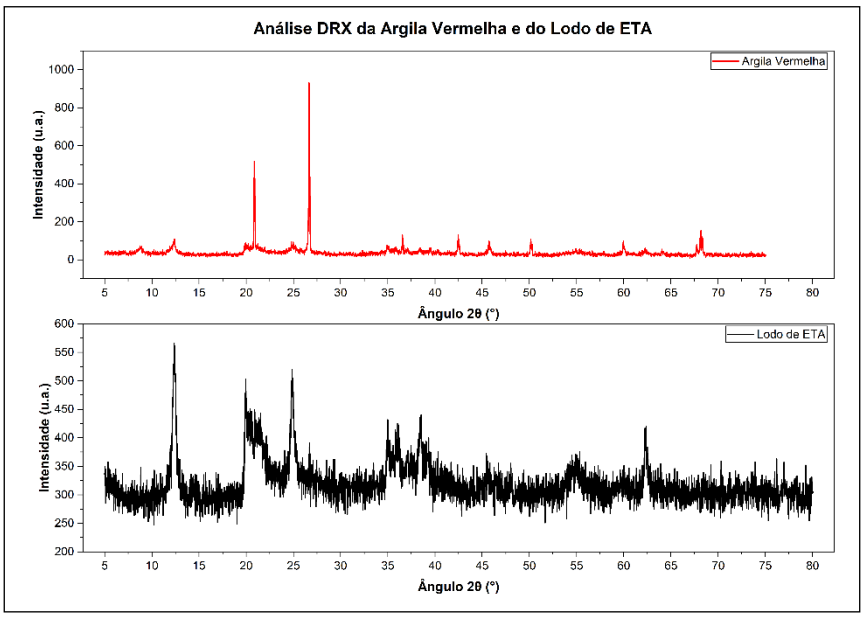


Figura 02: Análise de DRX da Argila Vermelha e do Lodo de ETA.
Fonte: Os autores (2026).

A análise de FTIR da argila vermelha e do lodo de ETA (Figura 03) evidencia a presença de grupos funcionais semelhantes, com distinções relacionadas ao grau de organização estrutural dos materiais. Em ambos os espectros, observa-se uma banda na região de 3600–3700 cm^{-1}, atribuída às vibrações de estiramento Al-OH da camada octaédrica da caulinita, em estreita concordância com os resultados de DRX. As bandas em torno de 1000–1100 cm^{-1} são atribuídas às vibrações de estiramento Si–O, características de silicatos, especialmente do quartzo predominante na matriz argilosa. No entanto, o lodo de ETA apresenta bandas mais largas e menos definidas, refletindo seu maior caráter amorfo e heterogeneidade estrutural. Adicionalmente, observa-se no lodo uma maior intensidade relativa de bandas associadas à água adsorvida e a possíveis grupos funcionais orgânicos, evidenciadas nas regiões próximas a 3400 cm^{-1} e 1600 cm^{-1}.

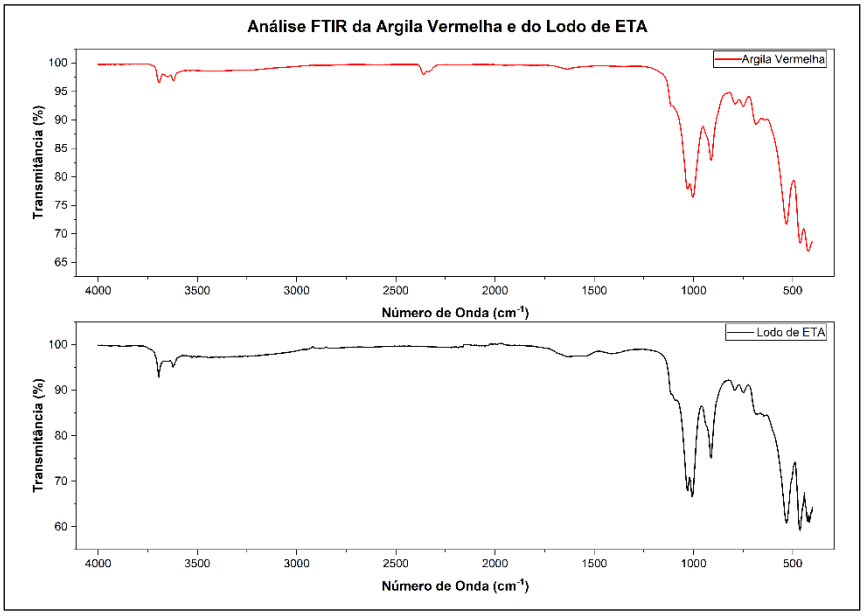


Figura 03: Análise FTIR da Argila Vermelha e do Lodo de ETA.
Fonte: Os autores (2026).

De modo geral, essa similaridade mineralógica justifica a sinergia entre o resíduo e a matriz argilosa, permitindo que o lodo possa atuar como constituinte de massa sem comprometer a estabilidade dimensional das peças.

A análise da Figura 04 evidencia a PPI dos corpos de prova incorporados com lodo úmido e seco. Observa-se um aumento progressivo nos valores de PF proporcional ao incremento do teor de resíduo, independentemente do seu estado físico. Os valores evoluíram de 7,74% (amostra de referência) para patamares superiores a 9% nas formulações com 10% de incorporação. Esse comportamento é atribuído à maior fração de matéria orgânica e compostos voláteis presentes no lodo, cuja decomposição ocorre predominantemente entre 200 °C e 600 °C (Liu et al., 2015). Nota-se que os resultados para ambas as condições (seco e úmido) situam-se significativamente abaixo do limite de 15% reportado para cerâmicas convencionais (Benlalla et al., 2015), indicando que a incorporação do resíduo não compromete este parâmetro tecnológico. Esses resultados confirmam que a umidade residual do lodo não altera significativamente o perfil de perda de massa durante o ciclo de queima, reforçando a viabilidade da utilização do lodo desaguado.

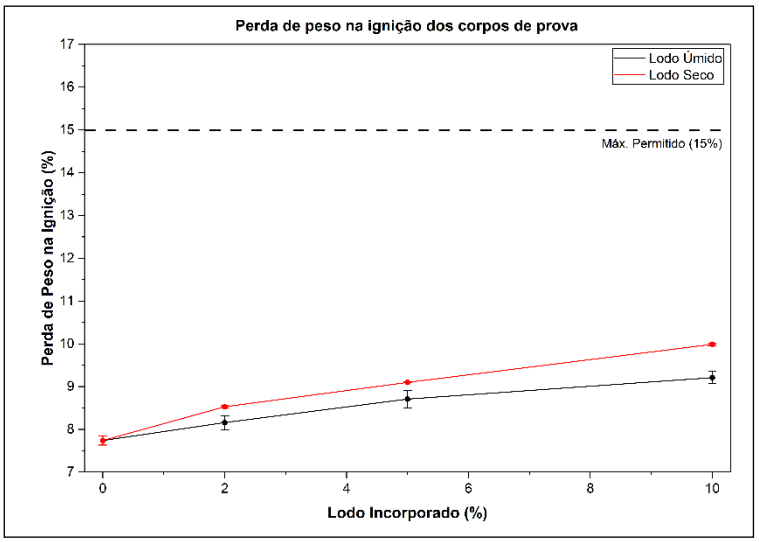


Figura 04: Perda de peso na ignição dos corpos de prova com incorporação de lodo de ETA
Fonte: Os autores (2026).

Quanto à absorção de água (AA), observa-se uma leve redução nos valores para a incorporação de 2% de lodo em ambos os estados (seco e úmido), conforme ilustrado na Figura 05. Esse fenômeno pode ser atribuído a um melhor empacotamento das partículas na matriz cerâmica em baixos teores de substituição. Contudo, a partir de 5% de incorporação, verifica-se um aumento progressivo da AA, comportamento associado ao efeito porogênico da matéria orgânica presente no resíduo. Durante o tratamento térmico, a volatilização desses compostos gera vazios na microestrutura, aumentando a permeabilidade do material, conforme descrito por Zhao et al. (2016) e Benlalla et al. (2015). No teor de 5%, verifica-se que o lodo úmido promove um incremento na AA estatisticamente superior ao lodo seco. Contudo, na proporção de 10%, observa-se uma sobreposição das barras de erro, indicando que as amostras contendo lodo seco e úmido apresentam desempenhos estatisticamente equivalentes (aprox. 17,6% e 17,3%, respectivamente). É imperativo destacar que todos os resultados experimentais se situam rigorosamente dentro do intervalo de 8% a 22% estabelecido pela ABNT NBR 15270 (2023). Assim, a utilização do lodo de ETA desaguado (úmido) demonstra conformidade normativa e viabilidade técnica, mantendo as propriedades físicas do produto final dentro dos padrões exigidos para a cerâmica vermelha.

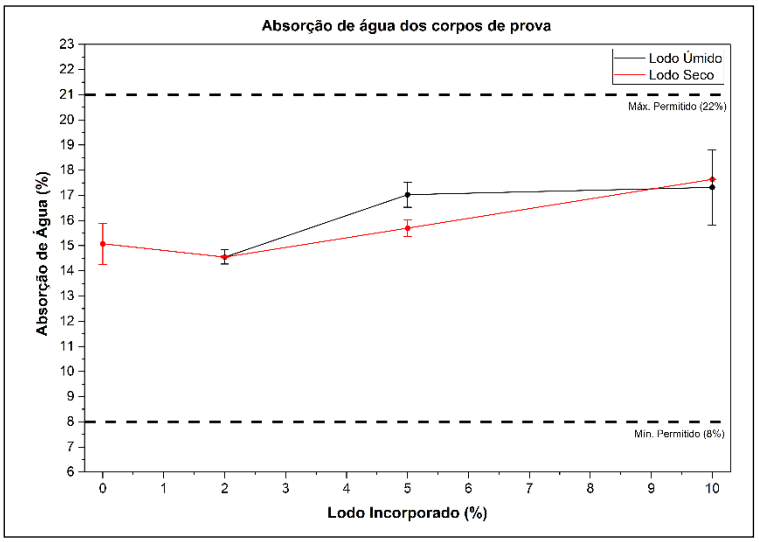


Figura 05: Absorção de água dos corpos de prova com incorporação de lodo de ETA
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A porosidade aparente, conforme os dados apresentados na Tabela 01, segue tendências análogas às observadas para a PPI e a absorção de água. Verifica-se uma redução inicial nos valores para teores de 2%, seguida de um incremento expressivo na composição com 5%, comportamento verificado em ambas as condições (seco e úmido). Esses resultados corroboram a atuação do resíduo como modificador da microestrutura cerâmica, onde a liberação de gases e a decomposição da fração orgânica promovem a formação de porosidade aberta na matriz. Comparativamente, o lodo seco apresentou valores de porosidade superiores ao lodo úmido na máxima proporção de incorporação (10%), o que é coerente com a maior perda de massa discutida

anteriormente. Por outro lado, na composição de 5%, o lodo úmido exibiu um patamar mais elevado (32,03%), indicando que a interação entre o resíduo e a matriz argilosa não é estritamente linear. Adicionalmente, nota-se que a formulação com 10% de lodo úmido apresentou uma redução na porosidade em relação ao teor de 5%. Esse fenômeno pode estar associado a um rearranjo estrutural ou a fenômenos de sinterização mais intensos, embora o maior desvio padrão observado (±2,04) sugira uma maior heterogeneidade na dispersão do lodo em estado úmido para este teor. Tal comportamento é reportado na literatura, que destaca a existência de um teor ótimo de adição de resíduos, acima do qual ocorrem mudanças nas rotas de densificação dos materiais cerâmicos (Benlalla et al., 2015).

Teor de lodo (%)	Referência (%)	Lodo úmido (%)	Lodo seco (%)
0	28,44 ± 0,91	-	-
2	-	26,95 ± 0,37	27,50 ± 0,11
5	-	32,03 ± 0,15	28,93 ± 0,19
10	-	29,05 ± 2,04	31,49 ± 0,05

Tabela 01: Porosidade dos corpos de prova com incorporação de lodo de ETA
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

De maneira geral, os resultados obtidos corroboram o comportamento descrito na literatura sobre a valorização de resíduos de saneamento em matrizes cerâmicas, evidenciando que a incorporação do lodo de ETA promove alterações controladas na microestrutura e nas propriedades físicas dos materiais. Embora o incremento da porosidade e da absorção de água seja inerente ao caráter porogênico do lodo, os dados demonstram que a utilização do resíduo em ambos os estados (seco e úmido) é tecnicamente viável. Notadamente, a manutenção dos parâmetros tecnológicos dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15270 (2023) valida a proposta de sustentabilidade do processo. Conclui-se que a utilização do lodo em estado úmido (apenas desaguado) configura-se como uma rota de processamento otimizada, capaz de integrar eficiência energética e gestão de resíduos.

Comentários finais

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em seus estados seco e úmido na produção de cerâmica vermelha constitui uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente promissora. As análises térmicas e mineralógicas evidenciaram que o resíduo apresenta comportamento e composição compatíveis com a matriz argilosa, favorecendo a sinergia entre os materiais durante o processo de sinterização. Os ensaios tecnológicos indicaram que, embora a adição do lodo influencie a porosidade aparente, a absorção de água e a perda de peso da ignição, os valores obtidos permanecem em conformidade com os requisitos estabelecidos para materiais cerâmicos estruturais, desde que o teor incorporado seja controlado. Do ponto de vista ambiental, o aproveitamento do lodo de ETA contribui diretamente para a redução do volume de resíduos descartados, alinhando-se aos princípios da economia circular e às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Destaca-se, em especial, a viabilidade do uso do lodo em estado úmido (apenas desaguado), o que possibilita a otimização energética do processo produtivo ao eliminar a etapa de secagem do resíduo. Dessa forma, os resultados reforçam o potencial do lodo de ETA como matéria-prima complementar na indústria cerâmica, promovendo a conservação de recursos naturais e agregando valor a um passivo ambiental.

Como perspectivas futuras, pretende-se avaliar a resistência mecânica das composições otimizadas para pleno atendimento normativo e realizar análises de lixiviação e solubilização para garantir a segurança ambiental dos produtos finais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FACEPE pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa no estado de Pernambuco e à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pela infraestrutura. À COMPESA e à olaria parceira pela cessão das matérias-primas essenciais ao estudo. Por fim, ao Grupo de Processos e Tecnologias Ambientais (GPTA) pelo suporte científico e colaboração técnica.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, N. C. et al. Degradação térmica de tijolo fabricado com solo e manipueira. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 861–870, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1:2023: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-2:2023: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 2: Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C373-18 (2023): Standard Test Methods for Determination of Water Absorption and Associated Properties of Ceramic Materials.** West Conshohocken, PA, 2023.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 24. ed. Washington, D.C., 2023.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos.** Brasília, 1997.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2010.

BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHHOU, M.; ASSAFI, M. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 171–177, 2015.

COSTA, Á. A. M. et al. Uso de resíduos industriais na produção de cerâmicas. In: **5th IMMSEM International Meeting in Materials Science and Engineering of Maranhão**, 2025, São Luís. **Anais do 5th IMMSEM International Meeting in Materials Science and Engineering of Maranhão**. São Luís: Instituto Federal do Maranhão, 2025.

LING, Y. P.; THAM, R.; LIM, S.; FAHIM, M.; OOI, C.; KRISHNAN, P.; MATSUMOTO, A.; YEOH, F. Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 143, p.300-306, 2017.

LIU, G. et al. Thermogravimetric study and kinetic analysis of sludge pyrolysis. **Waste Management**, 2015.

MESSAOUDI, H. et al. Physicochemical characterization, thermal behavior, and kinetic study of sewage sludge. **Energies**, v. 17, 2024.

MOREIRA, R. C. A. et al. Estudo geoquímico da disposição de lodo de estação de tratamento de água em área degradada. **Química Nova**, v. 32, p. 2085–2093, 2009.

MORSELLI, L. B. G. A. et al. Lodo de Estação de Tratamento de água: Possibilidade de Aplicação no Solo. **Scientia Plena**, v. 18, 2022.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 50, p. 324–330, 2004.

RODRIGUES, C. B.; CARNEIRO, A. M. P.; Lodo de ETA como alternativa à argila na indústria cerâmica: avaliação da qualidade e desafios. **Cerâmica Industrial**, v. 28, n. 1, e082801, 2023.

SANTOS, J. E.; **Aproveitamento do lodo de ETA: biodegradabilidade e implicações ecotoxicológicas**. 2023. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro, 2023.

TAVARES, R. G. **Geração, tratamento e disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água do estado de Pernambuco.** 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, A. E.; SANTOS, G. T. A. et al. Utilização de resíduos industriais na produção de materiais cerâmicos. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, n. 322, p. 102–110, 2006.

WANG, B.; YU, X.; FANG, G.; DONG, B.; ZHONG, Hui. Enhancing waste sludge reactivity through pre-treatment for sustainable construction materials: A review. ***Applied Clay Science***, v. 286, p. 108159, 2026.

ZHAO, Y. et al. Utilization of water treatment sludge in the production of eco-friendly bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2906–2915, 2016.

CONECTIVIDADE ECOLÓGICA POR MEIO DA INTEGRAÇÃO ENTRE ECOLOGIA DA PAISAGEM E ANÁLISE EM SIG NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BARTOLOMEU, DF/BRASIL

Jane Cristina do Carmo Santana, Maria do Carmo de Lima Bezerra, Luísa Gonçalves Lima, Paloma Soares Alvim, Rubens do Amaral

1 Universidade de Brasília - UnB, e-mail: jc.santtana@gmail.com; 2 Universidade de Brasília - UnB, e-mail: mdclbezerra@gmail.com; 3 Universidade de Brasília - UnB, e-mail: luisa.g.lima99@gmail.com; 4 Universidade de Brasília - UnB, e-mail: pasalvim98@gmail.com 5 Universidade de Brasília - UnB, e-mail: amaral.arqbr@ gmail.com

Palavras-chave: Ecologia da paisagem; Planejamento Territorial; Bacia Hidrográfica.

Resumo

A intensificação da urbanização tem acentuado os processos de fragmentação da paisagem e degradação ambiental, comprometendo a funcionalidade ecológica e a provisão de serviços ecossistêmicos. Este estudo propõe uma abordagem integrada de planejamento territorial baseado em Soluções baseadas na Natureza (SbN), articulando princípios do planejamento ecológico, da ecologia da paisagem e da análise espacial em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), aplicada à Bacia Hidrográfica do rio São Bartolomeu, no Distrito Federal, Brasil, aprofundando estudos na escala local urbana a partir das análises realizadas em escala regional por Amaral (2023) e Oliveira (2023) na qual foram identificadas áreas estratégicas para aumento da conectividade ecológica da bacia hidrográfica com resultados sobre a melhoria dos serviços ecossistêmicos. A metodologia fundamenta-se na análise em multicritério e na modelagem de aptidão ambiental, incorporando variáveis biofísicas como uso e cobertura do solo, declividade, rede hidrográfica e índices ambientais como CO2Flux, *Topografic Wetness Index* (TWI) e *Normalized Difference Red Edge Index* (NDRE). A bacia hidrográfica do rio São Bartolomeu foi adotada como área de estudo em função da elevada pressão antrópica que vem sofrendo ao longo dos anos. Os resultados identificam áreas prioritárias para preservação, adaptação e transformação, destacando o papel estratégico da conectividade ecológica e da regulação hídrica para resiliência territorial como potencial suporte à tomada de decisão.

Introdução

A expansão urbana tem provocado alterações nos sistemas naturais, intensificando processos de fragmentação de habitats, impermeabilização do solo, a redução da cobertura vegetal e os desequilíbrios hidrológicos. Esses processos se refletem diretamente nas mudanças do ciclo hidrológico urbano, evidenciadas pela diminuição da infiltração da água, sobrecarga dos sistemas de drenagem, aumento de alagamentos e comprometimento dos mananciais, dificultando a recarga dos aquíferos e favorecendo a contaminação das águas superficiais. Tais alterações comprometem a funcionalidade dos serviços ecossistêmicos e reduzem a capacidade adaptativa dos territórios urbanos frente aos eventos extremos, especialmente aqueles associados à variabilidade climática (MEA, 2005).

Esse quadro é agravado, sobretudo em países emergentes, pela urbanização desigual, marcada pela insuficiência de infraestrutura e pela gestão ineficiente do espaço urbano. No Brasil, esse cenário se manifesta na intensificação de eventos de escassez hídrica e inundações, frequentemente associados não apenas a fatores climáticos, mas também ao manejo inadequado do solo, à ocupação desordenada e à degradação das bacias hidrográficas. A impermeabilização, a compactação do solo e a supressão da vegetação reduzem a infiltração, podendo atingir níveis próximos a zero (Seraphim & Bezerra, 2019), enquanto a qualidade das águas é impactada por poluição difusa, lançamentos de efluentes e processos erosivos (ANA, 2012).

Diante desse contexto, torna-se necessária a revisão dos modelos tradicionais de urbanização e drenagem, baseados em infraestruturas segmentadas e dissociadas dos condicionantes ambientais, que tendem a intensificar picos de vazão e agravar os desequilíbrios hidrológicos. Em contraposição, o planejamento ecológico, conforme proposto por McHarg (1969), oferece base metodológica para essa integração entre cidade e natureza, ao utilizar a sobreposição de camadas ambientais como instrumentos de avaliação da aptidão territorial. Essa abordagem é complementada pela ecologia da paisagem, que compreende o território como um mosaico dinâmico composto por manchas, corredores e matriz, cuja configuração espacial influência diretamente os processos ecológicos e hidrológicos (Costa, 2020; MEA, 2005).

Nesse cenário, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) emergem como estratégias para integrar processos ecológicos ao planejamento territorial, promovendo resiliência, adaptação climática e sustentabilidade urbana. Tais soluções potencializam funções ecossistêmicas, contribuindo para a regulação hídrica, conservação da biodiversidade e melhoria da qualidade ambiental. Destaca-se, nesse contexto, o papel do manejo da vegetação, especialmente arbórea, na regulação dos fluxos hidrológicos e energéticos, por meio de processos como interceptação das águas pluviais, infiltração, evapotranspiração e sombreamento, que reduzem o escoamento superficial e favorecem o equilíbrio microclimático.

A restauração da conectividade ecológica configura-se, portanto, como estratégia para mitigar os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico, fortalece a integração entre fragmentos de vegetação e amplia a provisão de serviços ecossistêmicos. Estudos como de Amaral (2023), Oliveira (2023) e Sant'Anna (2020) indicam que abordagens baseadas em

infraestrutura verde permitem reproduzir processos naturais preexistentes, contribuindo para a reestruturação funcional da paisagem urbana. Nesse sentido, a análise das dinâmicas de sequestro de carbono na paisagem também se apresenta como ferramenta relevante para identificar áreas prioritárias de intervenção, orientando o manejo estratégico da vegetação e a promoção de serviços ecossistêmicos de suporte (Amaral, 2023).

Inserida neste contexto, a bacia hidrográfica do rio São Bartolomeu, no Distrito Federal, apresenta-se como área estratégica de estudo, em função da intensa pressão antrópica associada à expansão urbana e de sua relevância para a dinâmica hídrica regional.

Assim, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e aplicar uma abordagem metodológica integrada para identificação de áreas prioritárias à implementação de SbN na bacia do São Bartolomeu, com foco na promoção da resiliência ecológica e hídrica por meio da conectividade ecológica.

Planejamento ambiental: A ecologia como base para o ordenamento territorial

Desde meados do século XX, diferentes correntes teóricas e metodológicas têm buscado integrar o conhecimento ecológico ao planejamento territorial e urbano. Nesse contexto, destaca-se o planejamento ecológico proposto por Ian McHarg (1969), cuja obra *Design with Nature* estabeleceu um marco ao defender que a ocupação do território deve considerar os processos e as características do meio físico-biótico como condicionantes fundamentais. Para o autor, a compreensão da natureza no contexto urbano implica reconhecer, por meio da análise dos processos naturais, as potencialidades e restrições de cada área, orientando usos compatíveis e evitando desequilíbrios ecológicos e sociais decorrentes de ocupações inadequadas.

Nessa perspectiva, o problema não reside na urbanização em si, mas no modelo de crescimento adotado, frequentemente caracterizado por intervenções fragmentadas e setoriais, em contraste com a natureza integrada e contínua dos processos ecológicos. Essa fragmentação resulta, entre outros aspectos, na escassez e no isolamento de áreas verdes, comprometendo a provisão de serviços ecossistêmicos. Torna-se, portanto, essencial incorporar uma abordagem ecológica ao planejamento, orientando o desenho da paisagem e a ocupação territorial conforme as condições ambientais.

O planejamento ambiental de McHarg estrutura-se a partir de quatro eixos principais: (i) definição da unidade de planejamento, (ii) método de aptidão intrínseca, (iii) técnica de sobreposição cartográfica (*overlay mapping*) e (iv) visão sistêmica multiescalar. Conforme Sant'Anna (2020), a adoção de bacias hidrográficas e regiões fisiográficas como unidades de planejamento permite compreender de forma integrada os fluxos de água, energia e biodiversidade. O método de aptidão intrínseca, por sua vez, orienta a localização das atividades humanas a partir da identificação das potencialidades e limitações naturais, utilizando matrizes de compatibilidade entre usos do solo e condicionantes ambientais.

A técnica de sobreposição cartográfica consiste na integração de múltiplas camadas de informação ambiental e social - como geologia, solos, hidrologia, vegetação e declividade - representadas por gradações tonais que indicam níveis de aptidão ou restrição. A sobreposição dessas camadas permite identificar áreas mais adequadas à urbanização, aquelas compatíveis com usos específicos e aquelas que devem ser preservadas, garantindo um equilíbrio por meio da capacidade de suporte ambiental. Complementarmente, a abordagem multiescalar compreende a paisagem como infraestrutura ao funcionamento do território, exigindo a articulação entre diferentes escalas, do regional ao local, para assegurar a manutenção dos processos ecológicos.

A introdução desses métodos representou um avanço significativo ao estabelecer o princípio da compatibilidade entre usos humanos e processos naturais, consolidando uma transição no planejamento urbano ao incorporar o meio físico como base para a tomada de decisão (McHarg, 1969). Essa abordagem evoluiu com a incorporação de fundamentos da teoria dos sistemas e da ecologia sistêmica (Odum, 2001), que passaram a compreender o ambiente como um sistema interdependente de componentes físicos, biológicos e sociais.

Nas décadas seguintes, tais avanços influenciaram o desenvolvimento da ecologia da paisagem e da análise ambiental integrada, que se consolidam como referenciais para compreender a estrutura, a função e a dinâmica das paisagens, bem como os efeitos da fragmentação ecológica e da urbanização (Forman & Godron, 1986). Esse processo resultou na consolidação do planejamento ambiental integrado, incorporando diagnósticos ambientais, avaliação de aptidões, fragilidades e o uso de tecnologias.

A partir da década de 1980, o debate sobre desenvolvimento sustentável impulsionou abordagens como planejamento ecológico-econômico, voltado à compatibilização entre uso dos recursos naturais e limites ecológicos (Oliveira & Monteiro, 2015). Mais recentemente, a incorporação do conceito de serviços ecossistêmicos ampliou essa perspectiva ao reconhecer as múltiplas funções dos ecossistemas e sua relação com o bem-estar humano, incluindo regulação climática, sequestro de carbono e mitigação de riscos (MEA, 2005; Gómez-Baggethun et al., 2013).

Diante disso, o desafio contemporâneo consiste em consolidar um modelo de planejamento que integre as bases conceituais da caracterização do meio físico, conforme proposto por McHarg, à valorização dos serviços ecossistêmicos como suporte à qualidade de vida e à resiliência urbana. Essa integração representa um avanço teórico e metodológico ao propor uma racionalidade ecológica para o ordenamento territorial, orientando o uso e a ocupação do solo de forma compatível com os limites e potencialidades ambientais e superando modelos dissociados dos processos naturais.

Ecologia da paisagem aplicada ao planejamento ecológico com uso de geoprocessamento

O planejamento ecológico proposto por McHarg (1969) incorporam técnicas de sensoriamento remoto, modelagem hidrológica e análise espacial em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitindo a integração de análises qualitativas e quantitativas a partir de dados ambientais, socioespaciais e climáticos. Fundamentado em características biofísicas do território,

identificando potencialidades e limitações tanto para ocupação humana quanto para a preservação de áreas ambientalmente sensíveis. Para a operacionalização por meio da sobreposição de camadas espaciais, permite atribuir diferentes pesos conforme critérios de sensibilidade ecológica, de modo que áreas ambientais com declividade superior a 30% podem apresentar um maior grau de restrição.

Associada à ecologia da paisagem, essa abordagem possibilita mapear a fragmentação de habitats, áreas com elevada impermeabilização do solo e zonas com supressão de vegetação, fatores que comprometem a conectividade ecológica e hidrológica reduzindo a capacidade de provisão de serviços ecossistêmicos (MEA, 2005). Com o uso de geoprocessamento, torna-se possível identificar áreas estratégicas, como corredores ripários, zonas de recarga e áreas de amortecimento, orientando a definição de áreas prioritárias para intervenção com base em critérios como baixa provisão de serviços de regulação hídrica, alta impermeabilização, risco de inundação, intensidade de ilhas de calor e potencial de conectividade.

A partir da análise a nível regional se pode atuar na escala das cidades de forma mais assertiva estabelecendo as conexões da paisagem por meio de intervenções baseadas na natureza como jardins de chuva, vala de infiltração, restauração de corredores ripários e implantação de parques lineares. Assim, essa abordagem metodológica permite analisar a paisagem como um sistema complexo, integrando componentes biofísicos e antrópicos possibilitando o monitoramento contínuo de padrões espaciais, fluxos ecológicos e transformações decorrentes do uso do solo.

Bacia do rio São Bartolomeu no contexto do planejamento urbano e da ocupação do Distrito Federal

O Distrito Federal localiza-se em área elevada do Planalto Central, configurando-se como importante zona de dispersão hidrográfica para três grandes bacias brasileiras: Paraná, São Francisco e Tocantins-Araguaia. Por se tratar de região de cabeceiras, com predominância de cursos d'água perenes, apresenta elevada densidade de drenagem, formando um mosaico de canais responsável pelo escoamento anual de aproximadamente dez bilhões de metros cúbicos de água (Codeplan, 2020). Entretanto, o crescimento populacional acelerado e a intensificação das atividades econômicas têm ampliado a pressão sobre os recursos hídricos, comprometendo sua disponibilidade e sustentabilidade.

No contexto territorial, o DF organiza-se em sete bacias hidrográficas principais, dentre as quais se destaca a bacia do rio São Bartolomeu, foco deste estudo. Com área total de 548.000 hectares - sendo 267.000 no DF e 281.000 em Goiás - a bacia tem suas nascentes nas regiões mais elevadas de Sobradinho e Planaltina, recebendo contribuições do Lago Paranoá e integrando, posteriormente, a bacia do rio Corumbá (Martins *et al*., 2002). Apresenta variação altimétrica entre 736 e 1.307 metros, com cotas mais elevadas nas cabeceiras e áreas mais baixas associadas aos vales e ao eixo de drenagem.

Do ponto de vista físico, predominam Latossolos (51%), favoráveis à infiltração, e Cambissolos (43%), associados a relevos mais acidentados e maior vulnerabilidade ambiental, além de solos hidromórficos em áreas de veredas (Pádua, 2016; Sena-Souza et al., 2013). A bacia abriga todas as fitofisionomias do Cerrado, incluindo formações florestais, savânicas e campestres, evidenciando elevada diversidade ecológica.

No contexto do planejamento urbano do Distrito Federal, a bacia do rio São Bartolomeu configura-se como elemento da relação entre ocupação territorial e sustentabilidade hídrica. Reconhecida historicamente como principal reserva para o abastecimento de Brasília, sua relevância ambiental contrasta com os processos de urbanização que se consolidou de forma dissociada das diretrizes de proteção ambiental.

Parte significativa da bacia encontra-se protegida pela Área de Proteção Ambiental (APA) do rio São Bartolomeu, instituída pelo Decreto nº 88.940/1983, com 82.679,26 hectares, abrangendo as Regiões Administrativas de São Sebastião, Jardim Botânico, Paranoá e Planaltina, motivada pelos estudos do Plano Diretor de Águas e Esgotos de Brasília - PLANIDRO (1970). Sua criação visou restringir a ocupação e preservar os recursos hídricos, inicialmente destinados ao abastecimento. Contudo, desde sua instituição, a APA tem sido marcada por ocupações irregulares, que se intensificaram ao longo das décadas, incluindo condomínios de diferentes padrões socioeconômicos. Em 1985, se registravam cerca de 90 parcelamentos irregulares, e em 1988, aproximadamente 20 mil habitantes residiam na área (Freitas, 2009; Araújo Filho, 2017; Queiros, 2023).

Os instrumentos de planejamento territorial implementados, como planos diretores e políticas de uso e ocupação do solo, buscaram responder ao avanço da urbanização. No entanto, tais instrumentos frequentemente atuaram de forma reativa, legitimando ocupações consolidadas e contribuindo para a fragmentação do território. A sobreposição entre áreas legalmente impróprias e ocupações existentes evidencia a desconexão entre o arcabouço normativo e a realidade territorial, revelando limitações na efetividade dos instrumentos de controle e fiscalização.

Entre 2008 e 2013, houve redução de 12,22% na disponibilidade hídrica per capita, associada à expansão urbana, atividades agropecuárias e loteamentos (Pádua, 2016). Esse processo impactou a qualidade da água, com aumento da demanda bioquímica de oxigênio e contaminação por efluentes domésticos e agroquímicos.

Adicionalmente, verificou-se significativa perda de vegetação nativa e aumento da impermeabilização. Entre 1984 e 2014, as áreas antrópicas cresceram 58,84%, enquanto a cobertura vegetal foi reduzida em cerca de 15.775,83 hectares. No mesmo período, houve aumento expressivo de reservatórios artificiais, passando de 44 para 448, influenciando a dinâmica hídrica (Neves, 2016).

Como resposta, foi instituído o Plano de Manejo e o Rezoneamento Ambiental da APA, Lei nº 5.344/2014, ampliando para 45,86% as áreas com maior restrição ambiental, com foco na conservação da vegetação e na formação de corredores ecológicos. Ainda assim, estudos indicam que cerca de 95,3% da bacia apresenta restrições legais à ocupação, restando apenas 4,7% como potencialmente aptos (Lasse, Bias e Ribeiro, 2011). Apesar do arcabouço normativo, a bacia continua sob pressão. Nesse sentido, o Decreto nº499.365/2024 estabelece diretrizes para criação de Reservas Particulares do Patrimônio Natural e Áreas de Servidão

Ambiental, exigindo a manutenção mínima de 80% da cobertura vegetal nativa, na tentativa de conter a degradação e conservar o Cerrado.

A bacia do rio São Bartolomeu evidencia os desafios do planejamento urbano no DF, ao demandar abordagens integradas que conciliem a proteção dos recursos hídricos com as demandas do desenvolvimento urbano. A incorporação de estratégias baseadas na conservação ambiental, na recuperação de áreas degradadas e na valorização dos serviços ecossistêmicos torna-se fundamental para reverter o quadro de degradação e promover a resiliência territorial. Assim, a bacia não apenas representa um ativo ambiental, mas também um território-chave para a reorientação do planejamento urbano, exigindo a integração entre instrumentos normativos, gestão territorial e práticas sustentáveis de ocupação do solo.

Materiais e Métodos

A metodologia baseia-se na integração entre princípios de planejamento ecológico e análise espacial multicritério em ambiente SIG. O processo estrutura-se em três etapas: (i) aquisição e organização de dados espaciais, (ii) modelagem de aptidão territorial por meio de sobreposição de camadas (overlay mapping), conforme McHarg (1969) e (iii) classificação de áreas prioritárias para intervenção. Essa estrutura permite traduzir princípios ecológicos em instrumentos operacionais de planejamento.

Buscando compreender como uma unidade funcional integra processos biofísicos e antrópicos, partiu-se de uma análise sistêmica da paisagem incorporando variáveis ambientais, como uso e cobertura do solo, unidade hidrográfica, modelo digital de elevação (MDE), declividade e índices ambientais (CO2Flux, TWI e NDRE). A seleção dessas variáveis baseia-se na sua relevância para a dinâmica da paisagem e para a funcionalidade dos ecossistemas.

O processamento espacial foi realizado em ambiente SIG, envolvendo padronização das variáveis, atribuição de pesos conforme sensibilidade ecológica, integração das camadas por sobreposição (*overlay*) de mapas e geração de mapa-síntese de aptidão ambiental no território. Esse procedimento permitiu identificar áreas com diferentes níveis de adequação ambiental.

Para avaliação dos processos ecológicos de suporte, foram utilizados os seguintes indicadores: CO2Flux, derivado da integração entre NDRE e sPRI, para estimar o fluxo de carbono e a eficiência fotossintética e o TWI para identificação de áreas com maior potencial de acúmulo hídrico. A integração desses indicadores permitiu analisar simultaneamente a funcionalidade ecológica e a dinâmica hidrológica da bacia.

Com base no modelo de aptidão, as áreas foram classificadas em três categorias funcionais, sendo de áreas de preservação de serviços ecossistêmicos, áreas de adaptação e áreas de transformação. Essa tipologia orienta a definição de estratégias diferenciadas de intervenção territorial.

Resultados e Discussão

Com o avanço das metodologias de sensoriamento remoto hiperespectral e adotando os conceitos que estruturam a ecologia da paisagem é possível avançar em métodos que possam mensurar o grau de integridade com vista a interseções assertivas de renaturalização da paisagem.

A integração entre a análise do Índice de Umidade Topográfica (*Topographic Wetness Index* - TWI) e do espectral de fluxo de carbono (CO2flux) mostra-se promissora para qualificar não apenas à estrutura física da paisagem, mas também seu desempenho funcional na provisão de serviços ecossistêmicos de suporte, como sequestro de carbono, regulação microclimática e manutenção de regimes hidrológicos. Ao articular essas dimensões biofísicas com abordagens de planejamento de paisagem e infraestrutura verde, o mapeamento da conectividade ecológica deixa de ser apenas descritivo para se converter em ferramenta operativa de projeto territorial à restauração ecológica e à adaptação climática (Baptista, 2004; Amaral, 2023).

O TWI deriva da combinação entre a área de contribuição *upslope* e a declividade local, sintetizando à tendência da água em acumular-se em determinados pontos da paisagem. Para o cálculo do TWI foram realizadas cinco etapas sequenciais de processamento em ambiente SIG, utilizando o QGIS. (i) preparação do Modelo Digital de Elevação (MDE) trata-se da representação numérica da altitude do terreno em formato digital, com o recorte das curvas de nível, conforme o polígono da área de estudo, é gerado o MDE por meio da ferramenta *Interpolação TIN*, adotando o atributo de elevação, método linear e tamanho do pixel (x,y) de 5, em conformidade com a resolução altimétrica do dado de entrada, uma vez que o arquivo disponibilizado pelo Geoportal do DF é composto por curvas de nível com equidistância vertical de 5 metros. (ii) corrigir valores de declividade fazendo uso da ferramenta de análise de dados Raster de Declividade, a partir do MDE gerado aciona-se o uso da fórmula de Zevenbergen-Thorne, para reduzir distorções em áreas suaves ou com baixa rugosidade. (iii) cálculo da declividade (*slope*) deverá ser aplicado uma correção para eliminação de valores nulos, a fim de evitar inconsistências matemáticas, modificando a declividade removendo as depressões dos relevos, seguido da transformação dos valores de declividade de graus para radianos via calculadora raster. Conforme Equação (01 e 02) abaixo:

$$\text{Declividade Modificada} = (\text{Declividade\_graus} \leq 0) * 1 + (\text{Declividade\_graus} > 0) * \text{Declividade\_graus} \quad (01)$$

Onde: Declividade Modificada é remoção dos relevos abaixo de zero; Declividades_graus é o produto do MDE.

$$\text{Declividade Radianos} = \text{Declividade\_modificada} * 0.01745 \quad (02)$$

Onde: Declividade Radianos é conversão de unidade angular; Declividade modificada trata-se da declividade sem relevos; 0.01745 é valor aproximado de π (pi) dividido por 180.

A etapa iv, trata-se da obtenção da área de contribuição por meio do cálculo de acumulação de fluxo (*Flow Accumulation*), permitindo a identificação das zonas de convergências hídricas, obtido a partir do arquivo raster do MDE por meio do processamento de cálculo da direção de fluxo e da soma acumulada das contribuições das células a montante para cada pixel, gerando um mapa que representa o potencial de concentração de fluxo na superfície. Para então, na etapa v, aplicar o cálculo do TWI, a partir da relação entre a área de contribuição e a declividade local, com a aplicação de ajustes matemáticos para evitar logaritmos de zero e adequar os resultados à resolução espacial do dado. Para mensurar o TWI aplica-se logaritmo na calculadora Raster do QGIS, conforme Equações (03) abaixo:

TWI = ln ((*Flow_Accumulation* + 1 * 5) / (tan β, (Declividade_radianos)) (03)

Onde: TWI é o Índice de Umidade Topográfica; ln logaritmo natural, Flow_Accumulation, área de contribuição específica por unidade de largura perpendicular ao fluxo; tangente β (beta), ângulo de declividade local em radianos.

A análise com o índice TWI (figura 01) permite identificar áreas com elevada capacidade de retenção e infiltração de água, indicam zonas potencialmente mais úmidas, frequentemente associadas à valores, fundos de vale e áreas ripárias que tendem a abrigar solos mais profundos, maior disponibilidade hídrica, essenciais para redução do escoamento superficial, mitigação de eventos extremos e recarga de aquíferos. Esses resultados evidenciam a necessidade de integrar processos hidrológicos ao planejamento urbano.

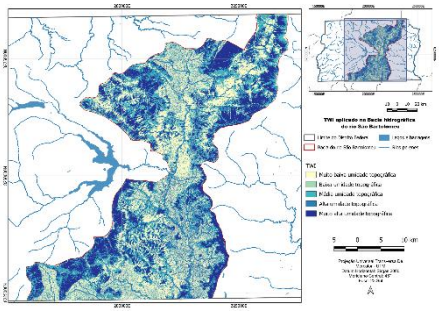


Figura 01: Aplicação do TWI na bacia do São Bartolomeu.
Fonte: Autores (2026)

Para validação e aplicação do CO2Flux associado à fotossíntese sendo necessário três etapas antes de aplicar a fórmula do carbono, (i) NDRE (*Normalized Difference Red Edge*), (ii) PRI (*Photochemical Reflectance Index*) e (iii) sPRI (*Scaled Photochemical Reflectance Index*). De modo que se optou pela utilização de imagens multiespectrais de 8 bandas do sensor PlanetScope, com resolução espacial de 3 metros, o que assegura maior detalhamento na identificação de fragmentos vegetais de pequena dimensão e reduz incertezas associadas à estimativa de biomassa. De modo que se aplicou as fórmulas na calculadora Raster do QGis, conforme Equação (04, 05, 06 e 07) abaixo:

NDER = (B8 - B7) / (B8 + B7) (04)

Onde: NDRE é o Índice de Diferença Normalizada da Borda Vermelho; B8, banda 8 NiR - infravermelho próximo; B7, banda 7 - Red Edge.

PRI = (B3 - B4) / (B3 + B4) (05)

Onde: PRI é o Índice de Reflectância Fotoquímica; B3, banda 3 (Green I) ; B4, banda 4 (Green II).

sPRI = (PRI + 1) / 2 (06)

Onde: SPRI é o Índice de Reflectância Fotoquímica Escalonado; PRI, Índice de Reflectância Fotoquímica; 1, desloca o intervalo; 2, normaliza.

CO2Flux = NDRE * sPRI (07)

Onde: CO2Flux é o índice de Diferença Normalizada da Borda Vermelho; NDRE, Índice de Diferença Normalizada da Borda Vermelho; sPRI, Índice de Reflectância Fotoquímica Escalonado.

O índice CO2Flux pode evidenciar espacialmente o desempenho de sumidouro de carbono sob o prisma estrutural, continuidade ou proximidade de fragmentos de vegetação, permitindo vincular a noção de conectividade ecológica a um conjunto mensurável de benefícios climáticos, como mitigação de emissões líquidas e modulação de microclimas urbanos (figura 02).

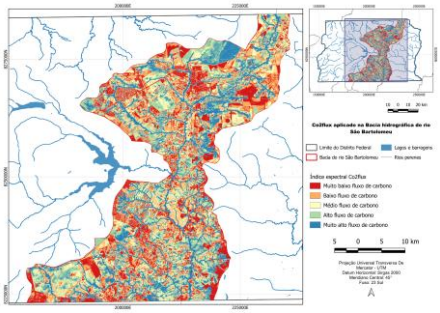


Figura 02: Aplicação do Co2flux na bacia do São Bartolomeu.
Fonte: Autores (2026)

A sobreposição entre CO2Flux e TWI possibilita delimitar zonas onde a alta disponibilidade hídrica, indicada pelo TWI elevado, combinando com o alto potencial de atividade ecossistêmica indicado pelo CO2Flux elevado, seguindo quatro etapas. Com objetivo de garantir coerência espacial e reduzir ruídos na escala do bairro ou da sub-bacia hidrográfica, aplicaram-se técnicas de suavização aos dados. (i) o processo inicia-se com a adição das camadas vetoriais e das camadas raster de CO2Flux e TWI. (ii) reduzir ruídos, ou seja, pixels isolados e tornar os padrões mais coesos, aplicou-se o filtro gaussiano submetendo a suavização por Kernel com raio 3, para o CO2Flux, enquanto o TWI recebeu filtro gaussiano com raio de Kernel 2, ambos com desvio padrão de 50, assegurando maior continuidade espacial dos padrões e compatibilidade entre as variáveis analisadas. (iii) na classificação define-se os limiares de interesse para cada variável através da simbologia em modo quartil e método discreto. Para a reclassificação binária, utilizando a calculadora Raster para isolar apenas as duas classes superiores, onde para o TWI foi dividido em 7 classes a fim de identificar as duas maiores categorias, já para o CO2Flux optou-se por dividir em cinco classes e identificar a maior classe. (iv) como os dados possuem resoluções distintas, o processamento é ajustado para que o mapa resultante tenha uma resolução de 3 metros, compatível com a precisão das imagens do sensor Planet utilizadas no cálculo do CO2Flux, de modo que os pixels passam atendem simultaneamente os dois critérios elevados. O produto deste procedimento é o mapa-síntese que hierarquiza o território, fornecendo subsídio técnico-científico para tomada de decisão em gestão territorial e ambiental, conforme figura 03.

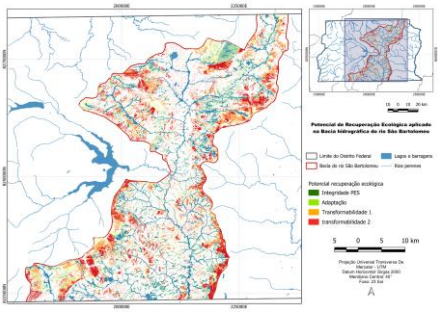


Figura 03: Consolidação do TWI e CO2Flux na bacia São Bartolomeu.
Fonte: autores (2026)

Na perspectiva multiescalar da paisagem, a aplicação combinada do TWI e do CO2Flux em escala local opera como um filtro analítico capaz de identificar áreas com elevada aptidão para a regeneração ecológica e resiliência climática. Os resultados destacam o papel fundamental da conectividade ecológica na manutenção da funcionalidade da paisagem. De modo que a fragmentação observada compromete fluxos ecológicos, principalmente ao longo de sistemas ripários, que desempenham papel estratégico como corredores naturais. A recomposição dessas conexões constitui elemento para o planejamento territorial sustentável.

A classificação do mapeamento em integridade, adaptação e transformação, poderá ser utilizada como um instrumento orientador para a aplicação de estratégica de Soluções baseadas na Natureza (SbN), articulando processos hidrológicos, microclimáticos e ecológicos no planejamento da cidade, uma vez que o estudo permite uma boa aproximação da escala real funcionando como um indicador fisiológico da vegetação e umidade do solo. De modo que as áreas identificadas como integridade poderão receber ações de proteção por se tratarem de áreas com alta integridade ecológica, as áreas identificadas como adaptação caberia implementar infraestrutura verde e as áreas de transformação caberia a requalificação ecológicas ao identificar áreas com disponibilidade hídrica, porém com baixa funcionalidade ecológica, priorizando ações de restauração.

Ao realizar esse estudo na escala da bacia hidrográfica é possível identificar áreas a montante que influenciam diretamente a dinâmica urbana, como zonas de recarga, áreas de produção de sedimentos e corredores ecológicos (Amaral, 2023).

Tendo em conta que na bacia estão instalados alguns núcleos urbanos, esse mapeamento funciona como uma base técnico-espacial para orientar intervenções prioritárias na articulação entre a escala regional e a local. Áreas com alto TWI indicam maior propensão à acumulação hídrica e, portanto, maior aptidão para SbN voltadas à regulação hidrológica, como jardins de chuva, bacias de infiltração, *wetlands* construídos e recuperação de áreas ripárias. Já o CO2Flux contribui para identificar zonas com maior potencial de sequestro de carbono e regulação térmica, orientando a implantação de infraestrutura verde, como corredores arbóreos, parques urbanos e reflorestamento estratégicos. A sobreposição desses indicadores permite delimitar zonas de convergência, onde múltiplos serviços ecossistêmicos podem ser potencializados simultaneamente. A abordagem demonstra o potencial para aplicação das SbN de forma mais assertiva enquanto instrumento operacional de planejamento. A partir da análise da estrutura da paisagem no nível regional se pode identificar corredores ecológicos estratégicos que se conectem às áreas urbanas, fundamentais para a constituição de cidades mais resilientes.

Dessa forma, o estudo contribui na estruturação da conectividade ecológica ao articular diferentes escalas em uma rede contínua de infraestrutura verde criando um gradiente funcional que conecta áreas naturais periurbanas à malha urbana, promovendo fluxo ecológico e aumento da resiliência territorial. Assim, na escala da bacia são identificadas áreas estratégicas para conservação, restauração e conectividade; na escala urbana, tais diretrizes são refinadas para o desenho de SbN adaptadas ao tecido urbano; e, na escala local são implementadas intervenções alinhadas às dinâmicas mapeadas. Esse arranjo hierárquico e integrado assegura coerência entre planejamento e desenho urbano, demonstrando que a funcionalidade ecológica da bacia hidrográfica está diretamente associada à configuração espacial da paisagem, não apenas à presença de cobertura vegetal, mas também à conectividade e estrutura.

Considerações finais

O estudo demonstra que a integração entre planejamento ecológico, ecologia da paisagem, análise multicritério em SIG e SbN representa um avanço metodológico, pois permite tomada de decisão espacial orientada pela aptidão ecológica do local, permitindo ainda a integração de múltiplas dimensões ambientais e a aplicabilidade em diferentes contextos urbanos contribuindo, assim, para a aproximação entre práticas ecológica e de planejamento, a partir da análise da bacia hidrográfica.

A metodologia proposta permite identificar áreas prioritárias para intervenção, fazendo uso de indicadores como CO2Flux e TWI visando ampliar a capacidade analítica, contribuindo para a conservação dos serviços ecossistêmicos e para a melhoria da qualidade ambiental urbana. Além disso, reforça a centralidade da conectividade ecológica e a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento permitindo alinhar estratégias territoriais aos processos naturais, superando abordagens fragmentadas.

Ao operacionalizar princípios ecológicos por meio de análise espacial, o estudo avança na construção de estratégias inovadoras para adaptação às mudanças climáticas e desenvolvimento urbano sustentável. A metodologia contribui ainda como proposta para a implementação de SbN, promovendo conectividade ecológica, resiliência hídrica e adaptação às mudanças climáticas passível de ser reaplicada de acordo com a realidade local.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade de Brasília – UnB e ao Labpaisagem pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AHERN, J.; CILLIERS, S.; NIEMELA, J. The concept of ecosystem services in adaptive urban planning and design: A framework for supporting innovation. *Landscape and Urban Planning*, v.125 p. 254-259, 2014.

AMARAL, Rubens do. *Os processos ecológicos de suporte no planejamento e projeto da infraestrutura verde regional*: Estudos dos fluxos de carbono na paisagem. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

ARAUJO FILHO, P. R. M. *Economia de zoneamentos ambientais*: Uma abordagem da relação entre conservação ambiental e gestão do território. O caso da Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio São Bartolomeu. Dissertação de Mestrado, Centro de Estudos em Economia, Meio Ambiente e Agricultura, Universidade de Brasília, p. 91, Brasília: 2017.

BAPTISTA, G. M. de M. *Validação da modelagem de seqüestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados aviris e hyperion*. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, INPE, p. 1037-1044, 05-10 abr. 2003.

BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T. *Green infrastructure*: Linking Landscapes and Communities. Washington, DC: Island Press, 2006.

Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN). *Atlas do Distrito Federal 2020*. Brasília: Codeplan, 2020. Disponível em: <https://internacional.df.gov.br/wp-content/uploads/2020/11/Atlas-do-Distrito-Federal-2020-Apresentacao-e-Capitulo-1-merged_compressed_compressed_compressed-1.pdf>. Acesso em: 30 de nov. 2025.

COSTA, I. C. N. P. *Abordagem metodológica ecologia da paisagem*: origem, enfoque e técnicas de análise. Bol. geogr.,

Maringá, v. 38, n. 1, p. 91-105, 2020.

DAILY, G. C. *Nature's Services*: Societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997.

FREITAS, C. F. S. *Proteção ambiental e direito à cidade no processo de expansão urbana do Distrito Federal*: Até que ponto existe um conflito? Tese de doutorado. Programa de Pesquisa e Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, p. 152, 2009.

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley & Sons, 1986.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E., GREN, A., BARTON, D.N., LANGEMEYER, J., MCPHEARSON, T., O'FARRELL, P., ANDERSSON, E., HAMSTEAD, Z. & KREMER, P. Urban ecosystem services. In: T. Elmqvist, M. Fragkias, J. Goodness, B. Güneralp, P.J. Marcotullio, R.I. McDonald, S. Parnell et al., eds. *Urbanization, biodiversity and ecosystem services*: challenges and opportunities. A Global Assessment. Dordrecht, the Netherlands, Springer Netherlands, 2013.

LASSE, E. S. de L.; BIAS, E. de S.; RIBEIRO, R. J. da C. Avaliação da ocupação dos condomínios na bacia do rio São Bartolomeu – um estudo baseado em ferramentas de geoprocessamento como instrumento para gestão ambiental. *Geografia*, Rio Claro, v. 36, n. 1, p. 121-134, jan./abr. 2011.

MARTINS, É. de S. et al. *Geologia da margem do Córrego Divisa, Bacia do São Bartolomeu-DF, escala 1:10.000*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002.

MCHARG, I. L. *Design with Nature*. New York: Doubleday & Company, 1969.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). *Ecosystems and Human Well-Being*: synthesis. Washington: Island Press, 2005.

NEVES, A. S. A*valiação das mudanças espaciais e temporais na cobertura da Terra da APA do Rio São Bartolomeu (Distrito Federal – Brasil) após trinta anos de criação (1984 – 2014)*. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade de Brasília, 83p, Brasília – DF, 2016.

ODUM, E.P. *Fundamentos da Ecologia*. 1953. 6ª ed. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa: 2001.

OLIVEIRA, D. F. de; MONTEIRO, L. de V. G. Ecodesenvolvimento: Uma abordagem sob o contributo de Ignacy Sachs. *Revista de Direito, Economia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 1, n. 2, pp. 29-48, 2015.

PÁDUA, A. J. *Avaliação integrada da sustentabilidade da bacia do rio São Bartolomeu*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

QUEIROZ, P. H. *Condomínios Horizontais Fechados no Distrito Federal*: análise de suas consequências ao tecido socioespacial de Brasília. Monografia. Curso de Ciência Política, Universidade de Brasília, p.53, 2023.

SENA-SOUZA, J. P. et al. *Mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do Rio São Bartolomeu, escala 1:100.000*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2013.

CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO EM APLICAÇÕES HIDRÁULICO-AMBIENTAIS

1Francisco Paim de Freitas Neto, 2Rutineia Tassi, 3Leandro Conceição Pinto, 4Fabiana Campos Pimentel, 5Gabriel Sulzbach Pereira, 6Ana Carolina dos Santos Reis, 7Camila Caballero Cristaldo, 8Luize de Oliveira Baldoni

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: francisco.freitas@acad.ufsm.br; 2 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: ruti@ufsm.br; 3 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: leandro.pinto@ufsm.br; 4 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: fabiana.pimentel@acad.ufsm.br; 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: gabrielpereirars@gmail.com; 6 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: reis.ana@acad.ufsm.br; 7 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: camicaba2601@gmail.com; 8 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: oliveira.luize@acad.ufsm.br

Palavras-chave: baixo custo; calibração; instrumentação hidráulica.

Resumo

A ampliação do monitoramento hidráulico-ambiental tem impulsionado o uso de soluções instrumentais de baixo custo, especialmente em aplicações laboratoriais e de campo. Contudo, o uso quantitativo desses sistemas depende de procedimentos de calibração capazes de corrigir desvios instrumentais e verificar o desempenho dos sensores na faixa de operação de interesse. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento, a calibração e a avaliação interna de um sistema experimental de baixo custo para medição de pressão, utilizando sensores diferenciais MPX5010DP integrados a uma placa Arduino Uno R3. Seis sensores foram testados simultaneamente em ensaio de tanque estático, com ajuste de uma curva de calibração específica para cada unidade. O ensaio foi conduzido para uma faixa de 0 a 0,30 m de coluna d'água, correspondente a aproximadamente 0 a 2,94 kPa, e o desempenho foi avaliado por meio de métricas globais antes e após a aplicação dos ajustes. Os resultados indicaram que, embora os sensores apresentassem resposta aproximadamente linear nas leituras brutas, havia desvios sistemáticos e deslocamento de zero elevado, principalmente nas menores colunas d'água. Após a calibração, verificou-se redução expressiva dos erros, com diminuição do *offset* da faixa de 0,325 a 0,433 kPa para 0,002 a 0,196 kPa, do RMSE de 0,154 a 0,241 kPa para 0,005 a 0,094 kPa e do MAE de 0,125 a 0,216 kPa para 0,004 a 0,078 kPa. Os erros máximos após calibração permaneceram abaixo da tolerância nominal do fabricante na faixa ensaiada. Além disso, observou-se comportamento distinto em um dos sensores, indicando que unidades nominalmente idênticas podem apresentar respostas diferentes. Assim, os resultados reforçam a necessidade de calibração individual dos sensores e indicam que o sistema desenvolvido apresenta desempenho satisfatório para medições experimentais de pressão em condições laboratoriais.

Introdução

A medição de variáveis como pressão e nível d'água é essencial para a análise de sistemas hidráulicos e para a geração de dados destinados à pesquisa e ao monitoramento de processos de interesse ambiental (Palermo *et al.*, 2022). No campo dos recursos hídricos, essas variáveis subsidiam a análise de diferentes sistemas hidráulicos, abrangendo desde escoamentos em áreas urbanas até o monitoramento de sistemas de abastecimento e a avaliação do comportamento de estruturas em escala reduzida (Chan *et al.*, 2021; Diala *et al.*, 2025). Entretanto, a adoção da instrumentação convencional ainda é frequentemente limitada pelo custo de aquisição e operação, o que tem incentivado o uso de dispositivos mais acessíveis (Segovia-Cardozo *et al.*, 2021).

Diante disso, estudos recentes demonstram que sistemas de baixo custo podem apresentar desempenho satisfatório no monitoramento de variáveis de interesse ambiental, desde que associados a procedimentos adequados de calibração e verificação. Autores como Pearce *et al.* (2024), por exemplo, calibraram e validaram um sistema construído com Arduino e sensor diferencial de pressão para o monitoramento do nível d'água em rios. De modo semelhante, Segovia-Cardozo *et al.* (2021) utilizaram sensores de baixo custo para medição de nível d'água, escoamento, precipitação e umidade do solo, demonstrando que após calibração a precisão da medição pode se aproximar daquela obtida com instrumentos tradicionais. Catsamas *et al.* (2023), por sua vez, desenvolveram um sensor IoT de baixo custo capaz de medir a velocidade superficial e a altura da lâmina d'água em escoamentos urbanos, com incertezas próximas às de sensores comerciais. Esses avanços mostram que soluções de medição de baixo custo representam uma alternativa viável para o monitoramento de parâmetros de interesse hidráulico-ambiental (Cherif *et al.*, 2025; Cornetta *et al.*, 2025; Ding *et al.*, 2025; Hacker *et al.*, 2025).

Apesar desse potencial, a literatura demonstra que sua confiabilidade depende de calibração adequada e da correta integração entre sensores e o sistema de aquisição, uma vez que variações de fabricação e condições externas podem afetar a resposta instrumental (de Camargo *et al.*, 2023; Ding *et al.*, 2025; Hamel *et al.*, 2024; Kootanoor Sheshadrivasan *et al.*, 2025; Segovia-Cardozo *et al.*, 2021). Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver, calibrar e avaliar, em condição estática controlada, um sistema experimental de baixo custo para medição de pressão com sensores diferenciais MPX5010DP integrados a uma placa Arduino Uno R3, com ênfase na calibração individual dos sensores e na avaliação dos resultados antes e após o ajuste.

Material e métodos

Para atender ao objetivo proposto, o estudo foi estruturado em três etapas: montagem do aparato experimental, calibração em tanque estático e avaliação do desempenho dos sensores por meio de métricas estatísticas. Nesse sentido, o sistema experimental foi constituído por seis sensores diferenciais de pressão MPX5010DP, identificados de S1 a S6, conectados a uma placa Arduino Uno R3, e por um tanque de acrílico utilizado para os ensaios.

Os sensores utilizados no presente estudo são do tipo piezorresistivo, fornecendo sinal analógico proporcional à diferença de pressão entre suas duas portas (P1 e P2). Segundo o fabricante, os sensores operam na faixa de 0 a 10 kPa, com erro máximo de 5%, tempo de resposta de 1,0 ms e tempo de aquecimento de 20 ms.

O tanque utilizado possui faces planas e seção quadrada, com 0,29 m de largura e 0,60 m de altura, além de uma régua milimetrada fixada verticalmente para leitura da altura da coluna d'água. A transmissão da pressão foi realizada por mangueiras de poliuretano com diâmetro externo de 6 mm, conectadas à porta de medição dos sensores, com a extremidade inferior posicionada junto ao fundo do tanque (Figura 01).

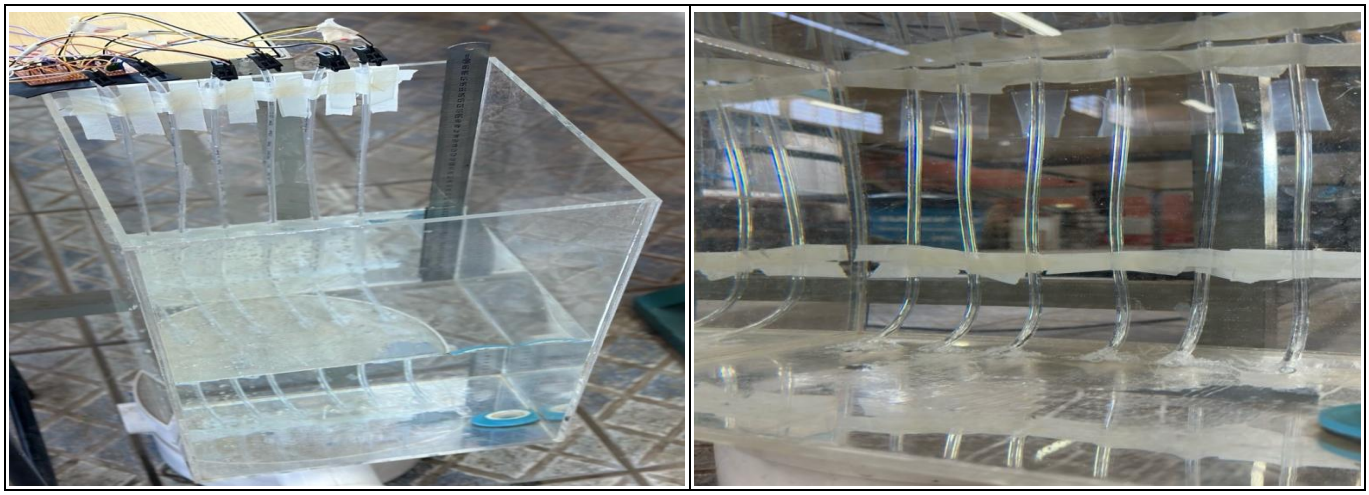


Figura 01: Aparato experimental utilizado na calibração dos sensores em tanque estático.
Fonte: Autores (2026)

No arranjo adotado, a porta P1 (pressão positiva) foi conectada ao sistema pneumático enquanto a porta P2 permaneceu aberta à atmosfera, assegurando a condição operacional diferencial positiva (P1>P2) exigida para o funcionamento do componente. Nessa configuração, a pressão aplicada pela coluna de água no tanque foi transmitida ao sensor por meio do ar aprisionado no interior das mangueiras, evitando o contato direto da água com os componentes eletrônicos e reduzindo os riscos de degradação dos componentes internos. Portanto, as leituras obtidas corresponderam à pressão manométrica, isto é, à diferença entre a pressão aplicada na tomada instrumentada e a pressão atmosférica local.

Para a aquisição dos dados, foi utilizada uma placa Arduino Uno R3 por meio de suas seis entradas analógicas nativas (A0 a A5). O circuito foi alimentado por uma fonte de bancada regulada em 5 volts, a fim de manter estável a tensão de alimentação dos sensores. Essa medida é fundamental, visto que o MPX5010DP é um dispositivo ratiométrico, de modo que oscilações na tensão de alimentação podem alterar a sensibilidade e o deslocamento de zero (*offset*) do sinal de saída. Adicionalmente, foram utilizados capacitores de desacoplamento entre os pinos de alimentação dos sensores para atenuar ruídos de alta frequência. O esquema da arquitetura é apresentado na Figura 02.

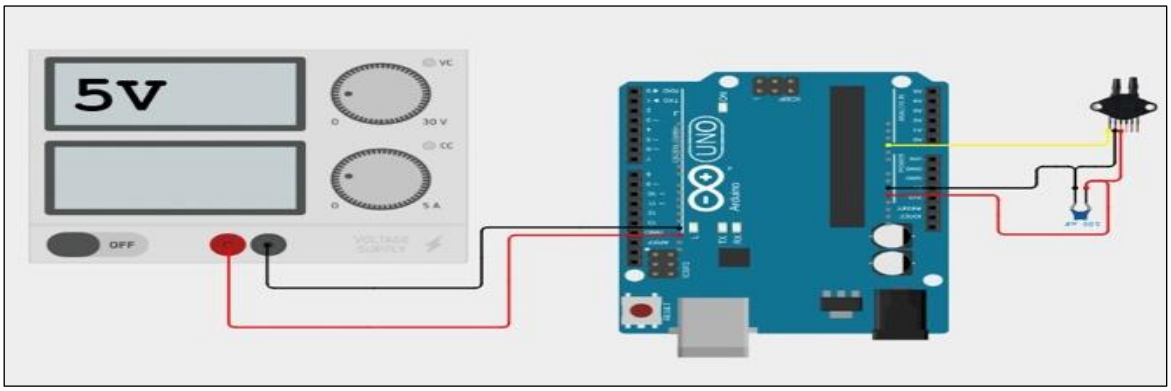


Figura 02: Arquitetura do sistema de aquisição utilizado na calibração dos sensores diferenciais de pressão.
Fonte: Autores (2026)

O *firmware* foi desenvolvido em C/C++ na plataforma Arduino IDE para executar a aquisição dos dados brutos e calibrados. A rotina de aquisição operou com uma frequência de 25 Hz, correspondente a um intervalo de 40 ms entre leituras. A cada ciclo, os seis canais analógicos foram lidos e convertidos em valores digitais pelo conversor A/D do microcontrolador. Sobre esses valores, aplicou-se um filtro de média móvel com janela de 10 amostras para reduzir ruídos associados à cadeia de aquisição. Posteriormente, a tensão de saída de cada sensor (V_{out}) foi calculada a partir da leitura digital (ADC) e da tensão de referência do conversor (V_s), conforme a Equação 01. Esta, por sua vez, foi utilizada como entrada para a função de transferência que converte o sinal elétrico em pressão bruta (P), conforme da Equação 02.

$$V_{out} = \frac{ADC}{1023} \times V_s \quad (01)$$

$$P = \frac{\frac{V_{out}}{V_s} - 0{,}04}{0{,}09} \quad (02)$$

A partir da montagem do aparato experimental e do sistema de aquisição dos dados, a calibração dos sensores foi conduzida por meio de ensaio em tanque estático. A altura da coluna d'água no tanque variou de 0 a 0,30 m, correspondendo a uma faixa aproximada de 0 a 2,94 kPa. A pressão hidrostática de referência para cada nível (P_{ref}) foi calculada pela Equação 03, em função da massa específica da água (ρ), da aceleração da gravidade (g) e da altura da coluna de água (h_{ref}).

$$P_{ref} = \frac{\rho g h_{ref}}{10^3} \quad (03)$$

Para o preenchimento do tanque, adotaram-se acréscimos de nível de 0,01 m com o intuito de elevar a densidade de pontos experimentais e mitigar o impacto de dispersões em baixas colunas. Tal procedimento permitiu também validar a linearidade do sistema dentro da faixa nominal do sensor, assegurando leituras sem o risco de saturação do sinal. Adicionalmente, estabeleceu-se um período de estabilização de três minutos após cada incremento, visando reduzir interferências de oscilações na superfície livre do tanque e garantir a correta acomodação do ar no interior das mangueiras.

Em cada nível de enchimento do tanque, a aquisição foi iniciada via comunicação serial com o comando "r", responsável por reinicializar a rotina e zerar os acumuladores internos. Na sequência, o sistema registrou leituras simultâneas dos seis sensores durante dois minutos, totalizando aproximadamente 3000 amostras por sensor. Após esse período, em cada nível, era enviado via comunicação serial o comando "m", responsável pelo cálculo da média das leituras obtidas para cada sensor. Essa média foi então associada à respectiva pressão hidrostática de referência.

Os pares de dados resultantes (P_{med},P_{ref}) foram então plotados e utilizados no ajuste das curvas de calibração por regressão linear, pelo método dos mínimos quadrados, conforme a Equação 04. Os coeficientes obtidos foram posteriormente incorporados ao *firmware*, de modo que as leituras transmitidas passassem a corresponder às pressões calibradas.

$$P_{corr} = a \,.\, P_{med} + b \quad (04)$$

Na equação 04, P_{corr} é a pressão corrigida/calibrada, a é o coeficiente angular da regressão, P_{med} é a pressão medida/bruta e b é o termo constante associado à correção de *offset*. Destaca-se que, embora os seis sensores tenham sido submetidos simultaneamente às mesmas condições de pressão durante o ensaio em tanque estático, a calibração não foi tratada de forma coletiva. Para cada sensor, ajustou-se individualmente uma curva de regressão linear, permitindo a obtenção de coeficientes específicos de sensibilidade e correção de *offset* para cada dispositivo.

O desempenho do sistema foi avaliado antes e após a calibração. Para a análise pontual ao longo da faixa ensaiada, calcularam-se o Erro Absoluto (E_A) e o Erro Relativo (E_R), conforme as Equações 05 e 06. O primeiro representa a diferença direta entre a pressão medida (P_{med}) e a pressão teórica ou de referência (P_{ref}), em módulo, enquanto o segundo expressa essa discrepância de forma proporcional à magnitude da pressão de referência. O erro relativo foi calculado apenas para os níveis com pressão de referência diferente de zero, uma vez que essa métrica não é definida para a condição de 0 cm de coluna d'água. Essas métricas permitiram avaliar o comportamento das leituras, especialmente nas menores colunas d'água, em que pequenas diferenças absolutas podem resultar em grandes variações percentuais.

$$E_A = \left|P_{med} - P_{ref}\right| \quad (05)$$

$$E_R = \left(\frac{E_A}{P_{ref}}\right) \times 100 \quad (06)$$

Além disso, foram calculadas métricas globais a partir do erro de medição ($e_{r,i}$), definido como a diferença entre a pressão medida ($P_{med,i}$) e de referência ($P_{ref,i}$) em cada nível (i) (Equação 07).

$$e_{r,i} = P_{med,i} - P_{ref,i} \quad (07)$$

Com base no cálculo desse erro, obtiveram-se: (i) o Viés (Bias), que indica a tendência sistemática do sensor, em que valores positivos indicam superestimação e valores negativos, subestimação da pressão real; (ii) o Erro Absoluto Médio (MAE), que representa a magnitude média do erro; (iii) a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) que, assim como o MAE, expressa a magnitude do erro, porém penaliza mais os grandes desvios; e (iv) o Erro Máximo (E_{max}), que identifica o maior desvio absoluto observado entre o valor medido pelo sensor e o valor teórico de referência. Tais métricas foram calculadas pelas Equações 08 a 11, em que N representa o número total de observações.

$$BIAS = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} e_{r,i} \quad (08)$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left|e_{r,i}\right| \quad (09)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left(e_{r,i}\right)^2} \quad (10)$$

$$E_{max} = max\left(\left|e_{r,i}\right|\right) \quad (11)$$

A partir disso, tornou-se possível comparar diretamente o comportamento dos sensores antes e após a calibração, tanto em termos pontuais ao longo da faixa ensaiada, quanto por meio de métricas globais de desempenho. Ressalta-se que essa avaliação corresponde à verificação interna do ajuste de calibração na faixa experimental analisada, não substituindo ensaios independentes de validação em outras condições de operação.

Resultados e discussão

O ensaio em tanque estático mostrou que, antes da calibração, os sensores apresentavam resposta aproximadamente linear em relação à pressão hidrostática de referência, porém com desvios sistemáticos entre os valores medidos e teóricos, principalmente nas menores colunas d'água. Além disso, foi observada a presença de *offset* elevado na condição atmosférica, em que as leituras esperadas deveriam ser nulas ou próximas de zero. Após a aplicação das curvas de calibração individuais ao sistema de aquisição, apresentadas no Quadro 01, observou-se maior aproximação entre as leituras corrigidas e a referência hidrostática em toda a faixa ensaiada, conforme apresentado na Figura 03.

Identificação do Sensor	Equação de Ajuste	Coeficiente de Sensibilidade (a)	Constante de *Offset* (b)
S1	P_{corr} = 1,1318 P_{med} - 0,3315	1,1318	-0,3315
S2	P_{corr} = 1,1356 P_{med} - 0,3269	1,1356	-0,3269
S3	P_{corr}= 1,1388 P_{med} - 0,4499	1,1388	-0,4499
S4	P_{corr}= 1,0725 P_{med} - 0,2744	1,0725	-0,2744
S5	P_{corr}= 1,1355 P_{med} - 0,3945	1,1355	-0,3945
S6	P_{corr}= 1,1405 P_{med} - 0,3644	1,1405	-0,3644

Quadro 01: Curvas de calibração individuais obtidas para os sensores diferenciais de pressão MPX5010DP. Fonte: Autores (2026)

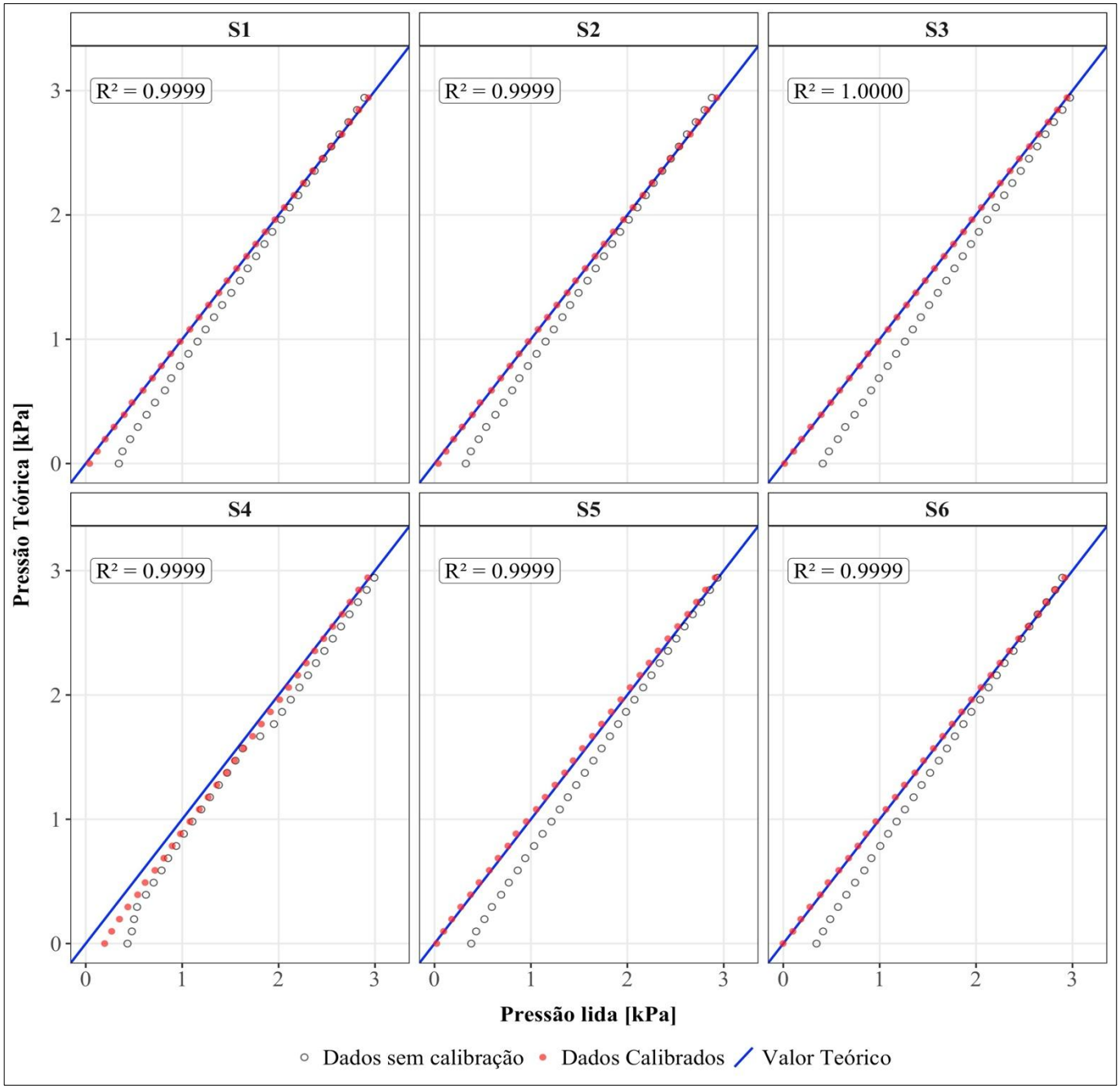


Figura 03: Relação entre pressão medida e pressão hidrostática de referência antes e após a calibração individual dos sensores.
Fonte: Autores (2026)

Essa melhoria foi mais consistente nas colunas de maior nível, enquanto as menores colunas d'água permaneceram mais sensíveis a pequenas diferenças absolutas entre a pressão medida e a pressão de referência. Esse comportamento é esperado, uma vez que, em baixas pressões, pequenas discrepâncias absolutas representam maior proporção da pressão hidrostática de referência, resultando em erros relativos mais elevados. A análise do erro relativo reforçou esse comportamento. Para 1 cm de coluna d'água, os sensores S1, S2, S3, S5 e S6 passaram de erros entre 284% e 383% para valores entre 1,93% e 22,32% após a calibração, ao passo que o S4 permaneceu com desvio mais elevado, ainda que reduzido. Em 5 cm, os erros do conjunto principal caíram para a faixa de 0,51% a 5,61%, enquanto o S4 manteve 25,59%. A partir de 10 cm, observou-se estabilização do desempenho para todos os sensores, com erros calibrados entre 0,20% e 2,85%, alcançando de 0,03% a 1,05% em 30 cm. Esses resultados indicam que a calibração foi especialmente eficaz na redução dos desvios ao longo da faixa útil do ensaio, embora o desempenho nas menores colunas d'água ainda seja mais sensível à resolução do sistema de aquisição, ao *offset* residual e à própria formulação percentual do erro relativo. A evolução do erro relativo antes e após a calibração é apresentada na Figura 04.

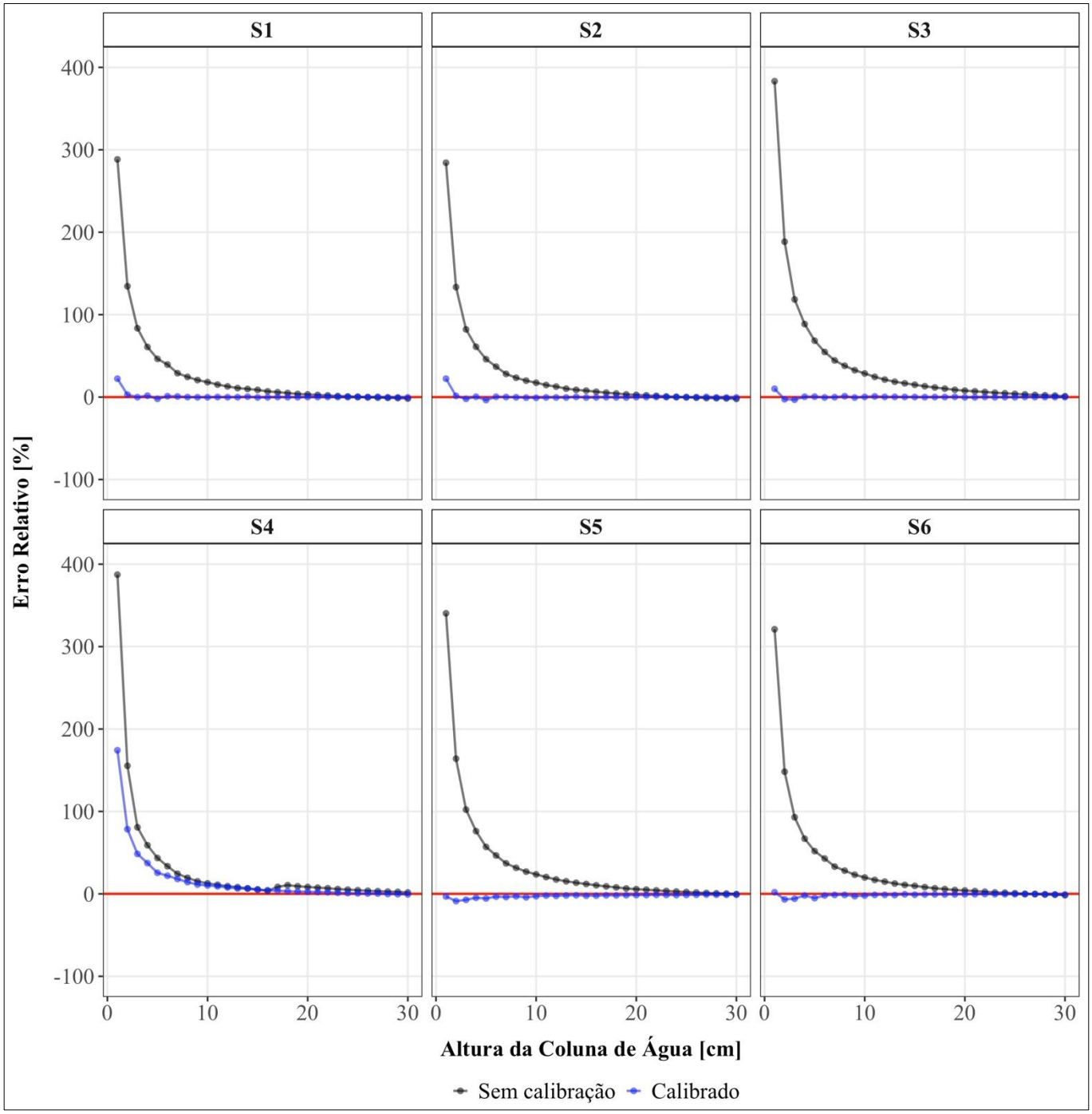


Figura 04: Erro relativo dos sensores em função da altura da coluna d'água, antes e após a aplicação das curvas de calibração individuais.
Fonte: Autores (2026)

As métricas globais calculadas confirmam a efetividade do procedimento de calibração na faixa experimental avaliada, ao comparar os valores calibrados e sem calibração, conforme apresentado na Tabela 01. Nesta, todas as métricas são expressas em kPa. O asterisco (*) indica valores calculados após a aplicação das curvas de calibração individuais.

A análise demonstra que o *offset* foi reduzido da faixa de 0,325 a 0,433 kPa para valores entre -0,002 e 0,196 kPa, com destaque para os sensores S3 e S6, que apresentaram valores residuais próximos de zero. Por sua vez, o RMSE foi reduzido da faixa de 0,154 a 0,241 kPa para 0,005 a 0,094 kPa, enquanto o MAE passou de 0,125 a 0,216 kPa para 0,004 a 0,078 kPa. O Erro Máximo absoluto também diminuiu de 0,325 a 0,433 kPa para 0,014 a 0,196 kPa, enquanto o Viés convergiu para valores próximos de zero em grande parte do conjunto. Esses resultados mostram que a calibração reduziu a magnitude média dos erros, atenuou tendências sistemáticas e limitou os maiores desvios observados no conjunto de dados analisado.

Sensor	*Offset*	*Offset**	RMSE	RMSE*	MAE	MAE*	E_{max}	E_{max}*	Viés	Viés*
S1	0,343	0,040	0,159	0,010	0,130	0,006	0,343	0,040	0,122	0,001
S2	0,325	0,040	0,154	0,011	0,125	0,007	0,325	0,040	0,112	-0,002
S3	0,410	0,014	0,241	0,005	0,216	0,004	0,410	0,014	0,216	0,001
S4	0,433	0,196	0,179	0,094	0,156	0,078	0,433	0,196	0,156	0,076
S5	0,381	0,023	0,201	0,027	0,172	0,026	0,381	0,037	0,172	-0,020
S6	0,345	0,002	0,176	0,014	0,145	0,012	0,345	0,026	0,138	-0,012

Tabela 01: Métricas de desempenho dos sensores MPX5010DP antes e após a aplicação das curvas de calibração individuais.
Fonte: Autores (2026)

A checagem frente à tolerância nominal do fabricante também foi favorável na faixa experimental avaliada. Considerando-se a banda máxima de erro de ± 0,5 kPa, equivalente a ± 5,10 cmH_2O, todos os sensores calibrados permaneceram abaixo desse limite nos dados analisados, com erros máximos entre 0,014 e 0,196 kPa, equivalentes a 0,143 e 2 cmH_2O, respectivamente. Mesmo no pior caso, representado pelo sensor S4, o Erro Máximo permaneceu 0,304 kPa abaixo da tolerância nominal especificada. A Tabela 02 apresenta os erros máximos observados antes e após a calibração, bem como a redução do erro em centímetros de coluna de água.

Sensor	E_{max} (cmH_2O)	E_{max}* (cmH2O)	Redução do Erro (cmH_2O)
S1	3,498	0,408	3,090
S2	3,314	0,408	2,906
S3	4,181	0,143	4,038
S4	4,415	2,000	2,416
S5	3,885	0,377	3,508
S6	3,518	0,265	3,253

Tabela 02: Comparação dos erros máximos antes e após a aplicação das curvas de calibração individuais, expressos em coluna de água.
Fonte: Autores (2026)

Embora a redução dos erros confirme a efetividade do procedimento de calibração em tanque estático, a análise individual dos sensores mostra que essa melhora não ocorreu de forma homogênea em todo o conjunto analisado. Esse aspecto se torna particularmente relevante no caso do sensor S4, cujo comportamento permaneceu distinto em relação aos demais mesmo após o ajuste. Embora esse sensor tenha apresentado melhora após a calibração, suas métricas finais permaneceram superiores às dos demais, tanto em termos de *offset* quanto de RMSE, MAE, erro máximo e viés.

Como todos os sensores foram submetidos simultaneamente às mesmas condições de ensaio, as diferenças observadas entre as curvas ajustadas e as métricas finais indicam variabilidade de resposta entre os canais de medição, mesmo sob uma condição hidrostática comum. Como hipótese, sugere-se que esse comportamento pode estar associado a variações de fabricação ou a particularidades construtivas da unidade. No entanto, não se pode descartar a influência de fatores associados ao conjunto de medição, como pequenas diferenças de conexão, vedação, acoplamento das mangueiras, resposta elétrica individual dos canais analógicos ou interação entre sensor e sistema pneumático de transmissão de pressão.

Esse resultado demonstra que o procedimento adotado não apenas corrige a resposta dos sensores, mas também permite identificar unidades ou canais de medição com desempenho atípico. Isso é coerente com a literatura recente sobre instrumentação de baixo custo aplicada ao monitoramento hidráulico e ambiental. Estudos como os de Pearce *et al.* (2024) e Ding *et al.* (2025) também indicam que o desempenho de tais sistemas depende diretamente de etapas de calibração e validação individual dos sistemas de medição, especialmente quando se busca uso quantitativo. Nesse sentido, os resultados obtidos demonstram que a reprodutibilidade do método de calibração utilizado não assegura a uniformidade entre os sensores diferenciais de pressão utilizados. Esse comportamento reforça a necessidade de calibração individual por sensor antes de sua aplicação em medições quantitativas.

Considerações finais

Os resultados obtidos demonstraram que o arranjo experimental utilizado apresentou desempenho satisfatório para medição de pressão na faixa avaliada em condição estática controlada. A calibração individual reduziu os desvios observados nas leituras brutas, com melhora consistente das métricas de desempenho e permanência dos erros máximos dentro da tolerância especificada pelo fabricante nos dados analisados. O estudo também mostrou que sensores nominalmente idênticos não apresentam, necessariamente, respostas equivalentes, evidenciando que a calibração não deve ser tratada como etapa coletiva ou apenas formal, mas como procedimento individual de verificação e ajuste.

Nesse sentido, além de corrigir a resposta dos sensores, o protocolo adotado mostrou-se capaz de identificar unidades ou canais de medição com desempenho atípico, o que constitui uma contribuição metodológica relevante do trabalho. Por fim, destaca-se que as conclusões obtidas se restringem à faixa experimental de 0 a 2,943 kPa, correspondente às condições avaliadas no ensaio em tanque estático. A aplicação do sistema em outras faixas de operação ou em condições de campo requer novos testes de validação. Ainda assim, para o escopo proposto, o estudo demonstrou que é possível desenvolver uma solução instrumental de baixo custo

para medições experimentais de pressão em condições laboratoriais controladas, desde que precedida de calibração individual dos sensores.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Referências bibliográficas

CATSAMAS, S. et al. A Low-Cost Radar-Based IoT Sensor for Noncontact Measurements of Water Surface Velocity and Depth. Sensors, [s. l.], vol. 23, no 14, p. 6314, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6314/htm. Acesso em: 17 fev. 2026.

CHAN, K. et al. Low-cost electronic sensors for environmental research: Pitfalls and opportunities. Progress in Physical Geography, [s. l.], vol. 45, no 3, p. 305–338, 2021. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309133320956567. Acesso em: 17 fev. 2026.

CHERIF, I. et al. LevelWAN: a cost-effective, open-source IoT system for water level monitoring in highly dynamic aquatic environments. HardwareX, [s. l.], vol. 23, p. e00685, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S246806722500063X. Acesso em: 21 fev. 2026.

CORNETTA, G. et al. An Open-Source Educational Platform for Multi-Sensor Environmental Monitoring Applications. Hardware 2025, Vol. 3, Page 13, [s. l.], vol. 3, no 4, p. 13, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2813-6640/3/4/13/htm. Acesso em: 22 fev. 2026.

DE CAMARGO, E. T. et al. Low-Cost Water Quality Sensors for IoT: A Systematic Review. Sensors 2023, Vol. 23, Page 4424, [s. l.], vol. 23, no 9, p. 4424, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/9/4424/htm. Acesso em: 28 fev. 2026.

DIALA, U. et al. A Hybrid Flow Energy Harvester to Power an IoT-Based Wireless Sensor System for the Digitization and Monitoring of Pipeline Networks. Machines 2025, Vol. 13, Page 1025, [s. l.], vol. 13, no 11, p. 1025, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-1702/13/11/1025/htm. Acesso em: 26 fev. 2026.

DING, N. et al. Laboratory performance assessment of low-cost water level sensor for field monitoring in the tropics. Water Research X, [s. l.], vol. 27, p. 100298, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589914724000872. Acesso em: 11 mar. 2026.

HACKER, J. et al. Aquatic quality watch informed by communities (AQWIC) facilitating the adoption of low-cost sensor systems for underserved communities: a review and tutorial. Environmental Science: Advances, [s. l.], vol. 4, no 4, p. 512–529, 2025. Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/va/d4va00332b. Acesso em: 11 mar. 2026.

HAMEL, P. et al. Low-cost monitoring systems for urban water management: Lessons from the field. Water Research X, [s. l.], vol. 22, p. 100212, 2024. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10848134/. Acesso em: 11 mar. 2026.

KOOTANOOR SHESHADRIVASAN, V. et al. picoSMMS: Development and Validation of a Low-Cost and Open-Source Soil Moisture Monitoring Station. Sensors (Basel, Switzerland), [s. l.], vol. 25, no 22, p. 6907, 2025. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12656263/. Acesso em: 07 mar. 2026.

PALERMO, S. A. et al. Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview. Sensors 2022, Vol. 22, Page 6225, [s. l.], vol. 22, no 16, p. 6225, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/16/6225/htm. Acesso em: 05 mar. 2026.

PEARCE, R. H. et al. Low-Cost Approach to an Instream Water Depth Sensor Construction Using Differential Pressure Sensors and Arduino Microcontrollers. Sensors 2024, Vol. 24, Page 2488, [s. l.], vol. 24, no 8, p. 2488, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2488/htm. Acesso em: 09 mar. 2026.

SEGOVIA-CARDOZO, D. A. et al. Design and Field Implementation of a Low-Cost, Open-Hardware Platform for Hydrological Monitoring. Water 2021, Vol. 13, Page 3099, [s. l.], vol. 13, no 21, p. 3099, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/13/21/3099/htm. Acesso em: 13 mar. 2026.

ECOTOXICIDADE DO EFLUENTE DE LAVAGEM DE HIDROCARVÃO DE *Acrocomia aculeata*

1 Ritielly Laiany Carvalho Senigalia, 1 Amanda Barbosa de Amorim, 1 Pablini Santana Alves
[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – Campus Sorriso, e-mail: ritielly.senigalia@ifmt.edu.br

Palavras-chave: *Lactuca sativa*; *Artemia salina*; espectrofotometria UV-Vis

Resumo

O uso de (hidro)carvão é amplamente conhecido por seu potencial de remoção de poluentes, tratamento de água e adsorção de metais e pesticidas com registro de mais de 170 patentes relacionadas ao tema nos últimos anos. Apesar do crescente interesse no uso de materiais carbonáceos, ainda há lacunas relacionadas à avaliação ambiental dos subprodutos gerados durante sua produção. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a ecotoxicidade do efluente gerado em diferentes etapas de lavagem do hidrocarvão produzido a partir de exocarpo de *Acrocomia aculeata*. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (controle, 1ª, 3ª e 5ª lavagem) e quatro repetições, utilizando bioensaios com sementes de *Lactuca sativa* (cultivares Americana e Elba) e náuplios de *Artemia salina* como organismos-teste. Foram avaliados parâmetros de germinação, índice de velocidade de germinação, crescimento radicular e da parte aérea, além da mortalidade dos organismos aquáticos. A caracterização do efluente incluiu medições de pH, condutividade elétrica e análise por espectrofotometria UV-Vis, cujo perfil espectral indicou predominância de matéria orgânica dissolvida com padrão de declínio exponencial. Os resultados demonstraram que a 1ª lavagem apresentou pH mais ácido e elevada concentração de compostos orgânicos, promovendo inibição total da germinação de *Lactuca sativa* e elevada toxicidade nos bioensaios com *Artemia salina*. Em contraste, as 3ª e 5ª lavagens apresentaram redução da toxicidade, com recuperação do desenvolvimento vegetal e menor efeito sobre os organismos aquáticos. Observou-se ainda resposta diferencial entre as cultivares, com maior acúmulo de biomassa na cultivar Americana e maior alongamento radicular na Elba. Os resultados evidenciam a variação da toxicidade do efluente ao longo das etapas de lavagem, destacando a importância do monitoramento dessas frações para subsidiar práticas adequadas de manejo e descarte.

Introdução

A crescente demanda por soluções sustentáveis para o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias termoquímicas capazes de converter biomassa em materiais de valor agregado. Nesse contexto, a carbonização hidrotérmica (HTC) tem se destacado como uma rota promissora para a produção de hidrocarvão (hydrochar), um material carbonáceo obtido a partir da conversão de biomassa em meio aquoso sob temperaturas moderadas e pressão autogerada. Esse processo apresenta vantagens operacionais relevantes, como a possibilidade de processamento de biomassa úmida sem necessidade de secagem prévia, além da geração de materiais com propriedades físico-químicas ajustáveis para aplicações ambientais (CAVALI et al., 2023; ZHANG et al., 2025)

Além da fração sólida (hidrocarvão), a HTC gera uma fase líquida frequentemente denominada água de processo ou efluente, composta por uma complexa mistura de compostos orgânicos dissolvidos e nutrientes. Estudos recentes indicam que essa fração líquida pode apresentar ampla variação de pH (3,5 a 9,2) e elevada carga orgânica, com concentrações de carbono orgânico total que podem ultrapassar 30.000 mg L^{-1} (CHU et al, 2026) evidenciando seu potencial impacto ambiental caso descartada sem tratamento adequado. A composição dessa fase líquida é influenciada por fatores como tipo de biomassa, temperatura e tempo de residência, podendo incluir ácidos orgânicos, compostos fenólicos, derivados furânicos e substâncias húmicas formadas durante a degradação hidrotérmica da matéria lignocelulósica (FREGOLENTE et al., 2018).

Apesar do crescente interesse na aplicação do hidrocarvão como material adsorvente e em processos de remediação ambiental, a literatura aponta que a fase líquida gerada durante sua produção permanece subexplorada, especialmente no que se refere à sua toxicidade e comportamento ambiental. Trabalhos recentes demonstram que a água de processo pode apresentar efeitos adversos sobre organismos aquáticos, com aumento da toxicidade associado à maior complexidade química gerada em condições mais severas de carbonização . Além disso, a fração de matéria orgânica dissolvida (DOM) proveniente do hidrocarvão desempenha papel relevante na dinâmica ambiental, podendo interagir com contaminantes, influenciar processos fotoquímicos e afetar a biodisponibilidade de compostos no meio (FREGOLENTE et al., 2018).

Nesse contexto, a avaliação ecotoxicológica surge como uma ferramenta essencial para compreender os efeitos desses efluentes sobre organismos vivos, permitindo integrar informações químicas e biológicas na análise do impacto ambiental. Bioensaios com organismos vegetais e aquáticos têm sido amplamente utilizados como métodos sensíveis e de baixo custo para a detecção de efeitos tóxicos, possibilitando a identificação de respostas fisiológicas e letais associadas à exposição a compostos potencialmente nocivos.

Diante disso, torna-se fundamental investigar o comportamento ecotoxicológico do efluente gerado durante as etapas de lavagem do hidrocarvão, especialmente considerando que esse processo visa a remoção de compostos solúveis e a estabilização do material sólido. A compreensão da variação da toxicidade ao longo dessas etapas pode fornecer subsídios importantes para o manejo adequado do efluente e para o desenvolvimento de práticas mais seguras associadas à produção de hidrocarvão. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a ecotoxicidade do efluente gerado em diferentes etapas de

lavagem do hidrocarvão produzido a partir do exocarpo de *Acrocomia aculeata*, utilizando bioensaios com *Lactuca sativa* e *Artemia salina* como organismos-teste.

Material e Métodos

Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, composto por quatro tratamentos: controle (água deionizada) e efluentes provenientes da 1ª, 3ª e 5ª etapas de lavagem do hidrocarvão, com quatro repetições para cada tratamento.

A produção do hidrocarvão foi realizada por meio do processo de carbonização hidrotérmica (HTC), utilizando como matéria-prima o exocarpo do fruto de *Acrocomia aculeata*. A macaúba foi coletada em um remanescente florestal na cidade de Guiratinga, estado de Mato Grosso, circunscrita às coordenadas 16º20'58"S e 53º45'30"O. O processamento do material foi realizado a partir da lavagem dos frutos em água corrente para retirada de impurezas. Após isso, o exocarpo foi retirado manualmente dos frutos, seco em estufa a 80°C por 24h até peso constante e triturado em moinho de facas. Para a reação hidrotermal foi utilizada a proporção de 1:5 (m/v) de biomassa e água deionizada. A mistura foi acondicionada em reator de autoclave de 200 mL, mantido em forno mufla a 200° C por 6 horas. Após resfriamento, o hidrocarvão foi lavado com auxílio de papel de filtro quantitativo e filtração com bomba a vácuo.

Os efluentes gerados em cada etapa foram coletados separadamente, correspondendo à 1ª, 3ª e 5ª lavagens, conforme delineamento experimental adotado. Após a lavagem, o hidrocarvão foi seco em estufa a 60 °C até massa constante. Os efluentes líquidos foram filtrados em papel quantitativo Whatman nº 1, com auxílio de bomba de vácuo, e armazenados em frascos âmbar sob refrigeração até a realização das análises.

A caracterização físico-química dos efluentes incluiu a determinação do pH, por meio de pHmetro digital previamente calibrado, e da condutividade elétrica, utilizando condutivímetro digital de bancada. As amostras também foram submetidas à análise por espectrofotometria UV-Vis, com varredura espectral na faixa de 365 a 765 nm. O perfil espectral obtido foi utilizado para inferir a presença de matéria orgânica dissolvida, sendo interpretado com base no comportamento de declínio exponencial da absorbância, característico de compostos aromáticos, fenóis e derivados furânicos formados durante o processo hidrotérmico. Adicionalmente, foram calculadas as razões espectrais E3/E4 e E4/E6, utilizadas como indicadores do grau de aromaticidade e do tamanho molecular da fração orgânica presente, conforme abordagem descrita por Chen et al. (1977).

A avaliação ecotoxicológica foi realizada por meio de bioensaios com organismos representativos de ambientes terrestres e aquáticos. Para os ensaios com *Lactuca sativa*, foram utilizadas sementes das cultivares Americana e Elba, dispostas em placas de Petri contendo papel filtro previamente esterilizado e umedecido com aproximadamente 5 mL das soluções correspondentes a cada tratamento. As placas foram mantidas em condições controladas de laboratório, sendo avaliados os parâmetros de porcentagem de germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento da raiz e da parte aérea, além da massa fresca e seca das plântulas. O índice de velocidade de germinação foi determinado a partir da contagem diária das sementes germinadas, permitindo a avaliação da dinâmica germinativa sob influência dos tratamentos (MAGUIRE, 1962).

Para os ensaios com *Artemia salina*, foi utilizado exclusivamente o efluente proveniente da primeira lavagem. As soluções-teste foram preparadas em tubos de ensaio com volume final de 10 mL, utilizando solução salina artificial como diluente. As concentrações avaliadas foram 0% (controle), 3,125%, 6,25%, 12,5%, 25%, 50% e 100% (v/v), correspondendo à proporção entre o volume de efluente e o volume total da solução. Assim, para cada tubo, foram utilizados 0,00; 0,3125; 0,625; 1,25; 2,50; 5,00 e 10,00 mL de efluente, respectivamente, completando-se o volume final com solução salina artificial. Os náuplios foram obtidos a partir da eclosão de cistos em solução salina artificial, sob condições controladas de aeração contínua, iluminação e temperatura. Após 24 horas de incubação, os organismos recém-eclodidos foram transferidos para tubos contendo as soluções teste em diferentes concentrações do efluente. A toxicidade aguda foi avaliada com base na mortalidade dos organismos após 24 horas de exposição, sendo os resultados expressos em porcentagem de mortalidade.

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística, com verificação prévia dos pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias. Em seguida, foi realizada análise de variância (ANOVA), considerando o delineamento experimental adotado. Quando identificadas diferenças significativas entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foi utilizada a linguagem de programação Python, versão 3.13. A interpretação dos resultados foi conduzida de forma integrada, considerando a relação entre os parâmetros físico-químicos e as respostas biológicas observadas, permitindo a correlação entre a composição do efluente e seus efeitos ecotoxicológicos.

Resultados e discussão

A avaliação físico-química do efluente de lavagem do hidrocarvão de *A. aculeata* (Figura 1) revelou um padrão de liberação inicial intensa de compostos solúveis, refletido em valores ácidos de pH e condutividade elétrica alta, que se correlacionaram diretamente com a resposta germinativa das sementes de alface nas duas cultivares testadas. O efluente da primeira lavagem apresentou pH de 4,08 e condutividade de 125 µS/cm, caracterizando-se como a etapa de maior carga química mobilizada na matriz do hidrocarvão. Nas lavagens subsequentes, observou-se redução progressiva desses valores, com pH estabilizando-se próximo à neutralidade e condutividade retornando a valores similares ao controle na quinta lavagem.

A acidez pronunciada e a elevada condutividade elétrica observadas na primeira lavagem sugerem a presença de uma alta concentração de compostos orgânicos solúveis, tais como ácidos carboxílicos, fenóis e fragmentos aromáticos oxidados mobilizados durante a carbonização hidrotermal.

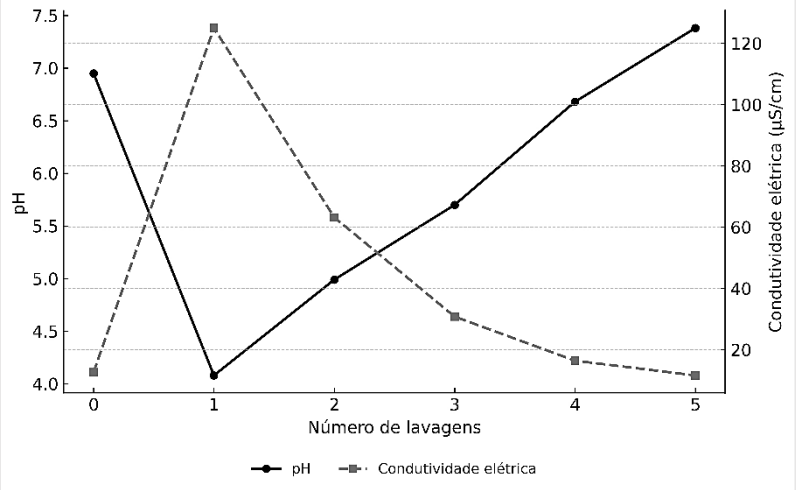


Figura 1. Dinâmica do pH e da Condutividade Elétrica (µS/cm) durante lavagens sucessivas do hidrocarvão de *A. aculeata.*
Fonte: Autora (2025)

Essa interpretação é fortemente corroborada pela análise do espectro UV-Vis do efluente (Figura 2), no qual se observam valores elevados de absorbância entre 365 e 465 nm (0,8457 a 0,4027), intervalo característico de estruturas aromáticas e compostos carbonílicos. A presença de um pico predominante em 365 nm, com absorbância de 0,8457, indica elevada concentração de cromóforos aromáticos e compostos altamente conjugados, típicos da fração solúvel de hidrochars recém-lavados, associados à fitotoxicidade inicial.

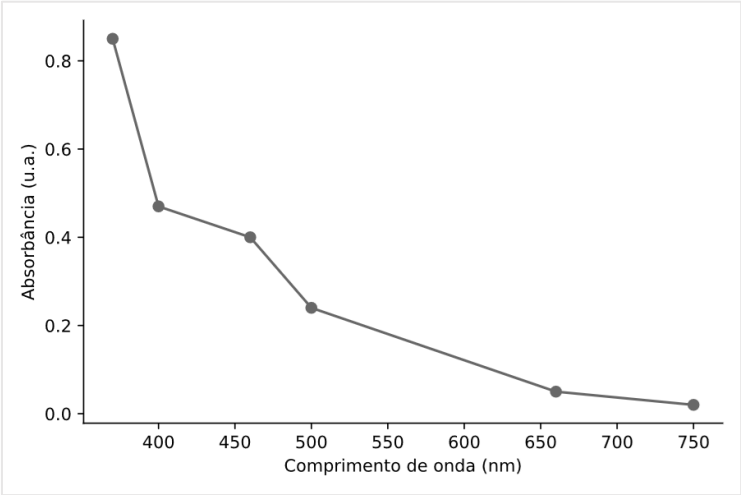


Figura 2. Espectro UV-Vis do Efluente da Primeira Lavagem do Hidrocarvão.
Fonte: Autora (2025)

A interpretação espectral do efluente da primeira lavagem revela que a fração orgânica dissolvida, presente no hidrocarvão, é dominada por moléculas de baixa massa molar, aromaticidade moderada e alto grau de reatividade química. Esse comportamento é consistente com o que Bargmann et al. (2013) observaram ao avaliar extrações aquosas de hidrochar: nas primeiras lavagens, a matéria orgânica dissolvida apresentou absorbâncias elevadas na região de 300–450 nm, associadas a compostos aromáticos oxigenados, fenóis e ácidos orgânicos recém-formados, exatamente o padrão observado no presente estudo entre 365 e 465 nm.

A análise dos índices espectrais calculados (E3’/E4 e E4/E6) reforça essa interpretação. Valores altos de E4/E6, como os observados neste estudo (~8), indicam matéria orgânica pouco condensada e de baixa humificação, conforme estabelecido por Chin et al., (1994) em sua caracterização clássica de substâncias húmicas. De forma semelhante, o índice E3’/E4 elevado sugere predominância de moléculas pequenas e recém-formadas, um padrão que Peuravuori e Pihlaja (1997) demonstraram ser característico de compostos derivados de biomassa pouco transformada.

A associação entre essa fração orgânica pouco humificada e efeitos biológicos negativos também é amplamente reconhecida na literatura. Priac et al. (2017) relataram que soluções ricas nesses compostos reduzem drasticamente a germinação e o desenvolvimento inicial de radículas, especialmente quando a condutividade elétrica e a acidez são elevadas, o que se alinha com os valores observados na primeira lavagem do hidrocarvão.

Além disso, Suarez et al. (2023) identificaram redução gradual da toxicidade conforme aumentavam o número de lavagens de hidrochars, atribuindo esse efeito justamente à remoção de compostos aromáticos solúveis detectados via UV-Vis nas primeiras frações de lavagem, reforçando a mesma tendência observada no presente estudo.

Suarez et al. (2023) também relataram comportamento semelhante ao avaliar hidrochar de resíduos vegetais, observando espectros com picos acentuados entre 300 e 400 nm nas primeiras lavagens, acompanhados de pH ácido (4,2–5,0) e condutividade superior a 100 µS/cm, os quais diminuíam substancialmente a partir da quarta lavagem.

Assim, tanto os dados físico-químicos quanto o espectro UV-Vis da primeira lavagem convergem para a mesma interpretação: a presença de uma fração solúvel complexa, rica em compostos aromáticos oxigenados e substâncias húmicas iniciais, que se tornam gradualmente menos concentradas ao longo das lavagens seguintes. Os valores obtidos neste estudo (pH de 4,08, condutividade de 125 µS/cm) e absorbâncias elevadas entre 365 e 465 nm alinham-se estreitamente aos relatados por esses autores, reforçando a consistência e relevância dos resultados.

A germinação das sementes de alface refletiu o gradiente químico do efluente. Em ambas as cultivares, a primeira lavagem resultou em inibição total da germinação, evidenciando toxicidade. A análise de variância (ANOVA) revelou diferenças estatisticamente significativas entre as lavagens do efluente de hidrocarvão para ambas as cultivares de *Lactuca sativa* ($p < 0,05$), indicando que o efeito do efluente sobre a germinação não ocorreu ao acaso e que as médias diferem de forma consistente entre os tratamentos avaliados.

Para a cultivar Elba, o controle apresentou a maior média de germinação (98,75%), diferindo significativamente das demais lavagens. A quinta lavagem apresentou germinação elevada (88,75%), porém ainda significativamente inferior ao controle. A terceira lavagem exibiu germinação intermediária (62,5%), evidenciando efeito tóxico moderado. A primeira lavagem resultou em 0% de germinação, diferindo estatisticamente de todos os demais tratamentos e caracterizando o maior nível de toxicidade.

Para a cultivar Americana, a análise também indicou diferenças significativas entre lavagens. O controle (92,5%) e a quinta lavagem (95%) não diferiram entre si, demonstrando ausência de efeito tóxico nessas condições. A terceira lavagem apresentou germinação de 75%, significativamente inferior ao controle e à quinta lavagem, mas superior à primeira lavagem. Assim como observado para Elba, a primeira lavagem resultou em ausência total de germinação (0%), diferindo estatisticamente dos demais tratamentos.

De forma integrada, confirma-se que a germinação respondeu de maneira significativa ao número de lavagens, refletindo a redução progressiva da toxicidade conforme o efluente se torna menos concentrado. Além disso, a comparação das médias evidencia que a cultivar Americana foi mais tolerante que a Elba nas lavagens intermediárias, o que se manifesta especialmente na terceira lavagem, onde apresentou maior capacidade germinativa.

Essa resposta é típica de sistemas expostos a compostos orgânicos solúveis oriundos da carbonização hidrotermal, tal como demonstrado por Priac et al. (2017) que também observaram inibição completa da germinação de alface quando soluções apresentavam condutividade acima de 100 µS/cm e pH inferior a 5, parâmetros comparáveis aos da primeira lavagem deste estudo.

A partir da segunda e terceira lavagens, a redução da condutividade (63,2 e 30,8 µS/cm, respectivamente) e o aumento gradual do pH permitiram a recuperação parcial da germinação. A cultivar Americana mostrou maior tolerância, exibindo germinação de 75% na lavagem 3, enquanto a cultivar Elba germinou 62,5% sob as mesmas condições. Essa diferença entre cultivares é consistente com o observado por Bargmann et al. (2013), que ressaltaram que a sensibilidade ao hidrochar é espécie-dependente e, em alguns casos, cultivar-dependente, com variações de 20–40% na germinação entre variedades de plantas submetidas à mesma solução.

Na quinta lavagem, a condutividade atingiu 11,59 µS/cm e o pH ultrapassou a neutralidade (7,38), indicando remoção efetiva dos compostos solúveis inicialmente presentes. Nessa etapa, ambas as cultivares apresentaram germinação elevada, 88,75% para Elba e 95% para Americana, níveis comparáveis aos do controle. Estudos como os de Suarez et al. (2023) e Reibe et al. (2015) relatam que o condicionamento e a remoção de frações solúveis do hidrochar reduzem os efeitos fitotóxicos iniciais, promovendo melhoria no desenvolvimento vegetal. Esse comportamento é consistente com os resultados do presente estudo, nos quais a redução da fração solúvel ao longo das lavagens resultou na recuperação progressiva da germinação e do crescimento das plântulas. A coincidência de valores reforça a interpretação de que a fitotoxicidade inicial do hidrocarvão está majoritariamente associada à fração solúvel liberada nas primeiras lavagens.

Além disso, a diferença de sensibilidade entre as cultivares sugere que sementes com maior vigor ou maior integridade de tegumento, como observado para a cultivar Americana, apresentam maior capacidade de tolerar níveis moderados de substâncias tóxicas. Priac et al. (2017) e outros autores apontam que *L. sativa* apresenta variabilidade intraespecífica na sensibilidade a efluentes, reforçando que a escolha da cultivar influencia a detecção da toxicidade.

A Figura 3 sintetiza o efeito das diferentes lavagens do efluente de lavagem do hidrocarvão sobre o comprimento de hipocótilo, raiz e comprimento total de plântulas de *L. sativa* das cultivares Elba e Americana. As letras sobre as barras representam os agrupamentos estatísticos obtidos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), foram interpretadas exclusivamente dentro de cada cultivar para indicar diferenças ou similaridades entre as lavagens, considerando dois bioensaios isolados, conforme a metodologia.

Em ambas as cultivares observa-se o mesmo padrão geral: na primeira lavagem não há desenvolvimento de plântulas normais, resultando em comprimentos nulos para todas as estruturas, enquanto nas lavagens 0 (controle), 3 e 5 os comprimentos retornam a valores normais. As letras indicadas sobre as barras, oriundas do teste de Tukey ($p < 0,05$), mostram que a lavagem

1 forma um grupo isolado, significativamente inferior às demais, ao passo que as lavagens 0, 3 e 5 se agrupam em letras comuns dentro de cada cultivar, evidenciando que, após a remoção da fração líquida mais tóxica, o crescimento das plântulas volta a níveis compatíveis com o controle.

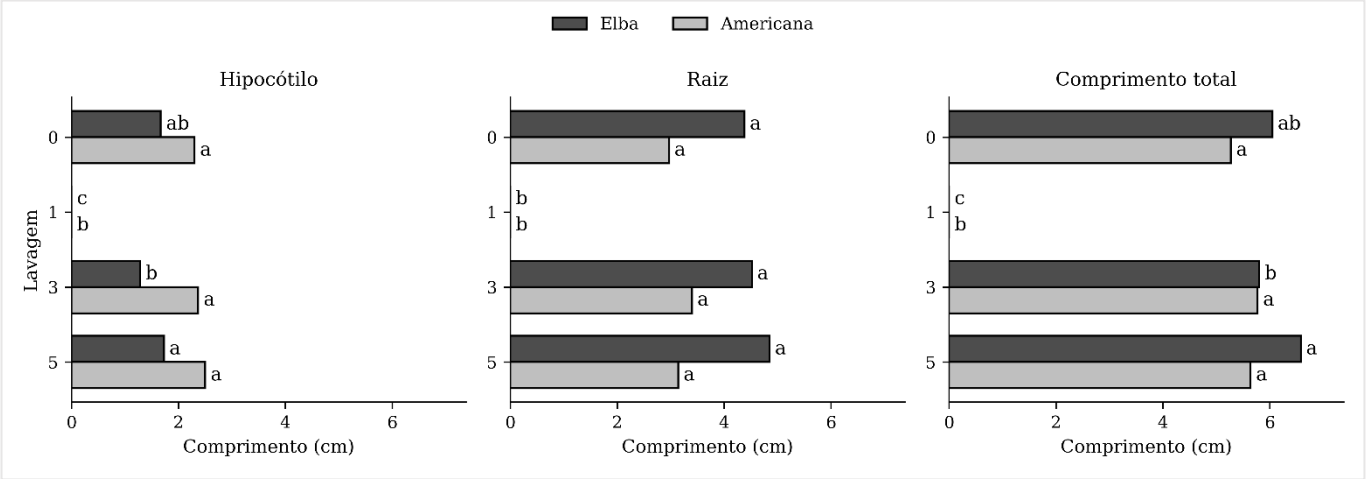


Figura 3.Comprimento de hipocótilo, raiz e comprimento total (cm) de plântulas de *L. sativa* cv. Elba e Americana submetidas a diferentes lavagens do efluente de hidrocarvão.
Fonte: Autora (2025)

Os resultados obtidos para o comprimento de hipocótilo, raiz e plântula total mostram um padrão típico de fitotoxicidade associada a compostos solúveis presentes em hidrochars frescos. Esse comportamento é amplamente descrito por Karatas et al. (2022), que destacam que a presença de ácidos orgânicos, compostos fenólicos e frações orgânicas reativas pode reduzir o crescimento radicular e o desenvolvimento inicial de plântulas. A intensidade desses efeitos está associada à concentração desses compostos, sendo mais pronunciada em materiais recém-produzidos e menos condicionados.

Puccini et al. (2018), ao avaliar hidrochar como componente de substrato para germinação e crescimento inicial de hortaliças, observaram redução significativa no comprimento das raízes quando o material não havia passado por tratamento prévio, associando esse efeito à presença de compostos solúveis potencialmente fitotóxicos.

O comportamento observado indica crescimento nulo na lavagem 1 e recuperação substancial nas lavagens 3 e 5, o que torna a análise diretamente compatível com esses achados.

De modo semelhante ao observado em estudos com efluentes hidrotérmicos, exposições iniciais à fração líquida da carbonização hidrotérmica podem reduzir o desenvolvimento radicular, mesmo quando a germinação não é totalmente inibida. Fregolente et al., (2019) verificaram que a água de processo obtida da carbonização hidrotérmica de resíduos agroindustriais apresenta elevada carga de matéria orgânica, incluindo substâncias de caráter aromático e cromóforo, o que contribui para a inibição do crescimento radicular de *Lactuca sativa*. Os autores demonstraram ainda que a diluição e o tratamento dessa fração líquida reduzem a toxicidade observada em bioensaios, resultando em maior crescimento das raízes em comparação às amostras mais concentradas. Esse padrão de diminuição progressiva da toxicidade também foi constatado no presente estudo nas lavagens subsequentes.

A comparação entre cultivares também encontra respaldo na literatura sobre variabilidade genotípica em respostas ao estresse químico. Enquanto a cultivar Americana apresentou restabelecimento completo do comprimento nas lavagens 0, 3 e 5, a cultivar Elba manteve diferenças significativas entre os tratamentos, especialmente no hipocótilo. Esses resultados sugerem que a cultivar Elba possui maior sensibilidade aos compostos residuais presentes no efluente parcialmente purificado, enquanto a Americana demonstra maior tolerância fisiológica, padrão coerente com observações de Karatas, et al. (2022) sobre a variabilidade entre espécies e cultivares quanto ao impacto do hidrochar no crescimento inicial.

A análise conjunta das massas fresca e seca de parte aérea e raiz evidencia que o efeito das lavagens sobre a biomassa das plântulas foi semelhante entre as cultivares Elba e Americana (Figura 4). Em ambas, a ANOVA indicou efeito altamente significativo de lavagem ($p < 0,05$) para todas as variáveis, e o teste de Tukey mostrou que a lavagem 1 formou sempre um grupo isolado, com biomassa estatisticamente inferior, enquanto as lavagens 0, 3 e 5 não diferiram entre si, compondo o mesmo grupo de médias.

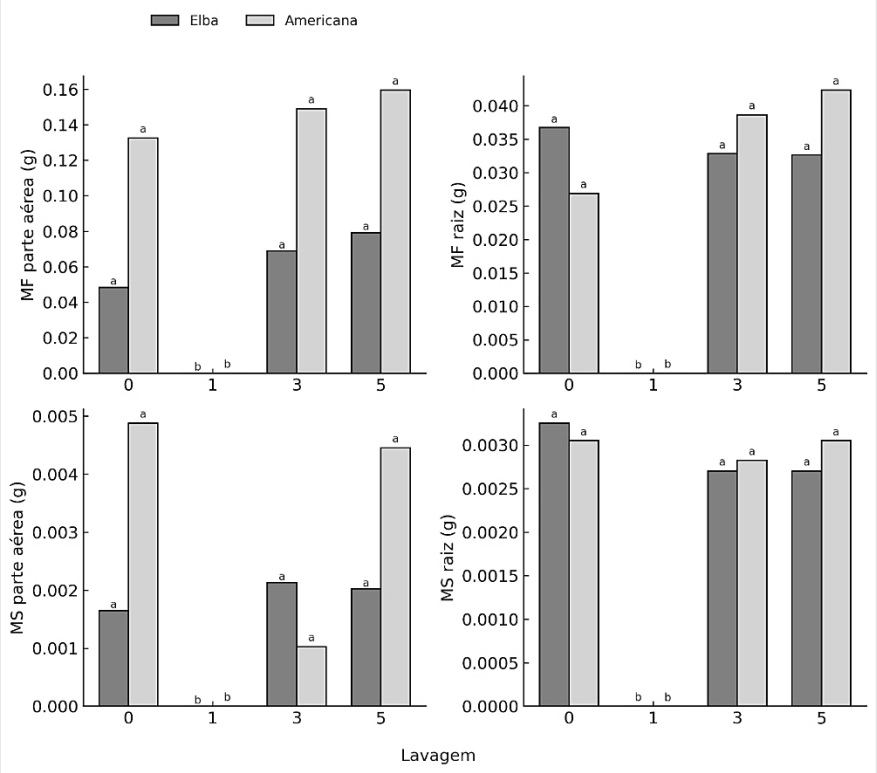


Figura 4. Massa fresca (MF) e Massa seca (MS) de parte aérea (Hipocótilo) e raiz de plântulas de alface de duas culvares submetidas à efluente de lavagem de hidrocarvão.
Fonte: Autora, 2025.

Esse padrão revela que a primeira fração líquida do efluente é suficientemente tóxica para impedir o acúmulo de massa tanto na parte aérea quanto na raiz, ao passo que, após sua remoção, a produção de biomassa retorna a níveis equivalentes ao controle, independentemente de diferenças sutis entre as lavagens 3 e 5. Comparando as cultivares, observa-se que a Americana apresenta valores absolutos de massa frequentemente superiores aos da Elba, especialmente na massa fresca de parte aérea e raiz, indicando maior capacidade de crescimento sob condições de efluente parcialmente lavado; contudo, do ponto de vista estatístico, ambas respondem de forma semelhante em termos de padrão de agrupamento das médias, com a toxicidade concentrada na lavagem 1 e estabilização nas lavagens subsequentes.

A resposta biológica das cultivares Elba e Americana ao efluente de lavagem do hidrocarvão evidencia um padrão consistente entre os diferentes parâmetros avaliados: a lavagem 1 representa o ponto máximo de fitotoxicidade, enquanto as lavagens subsequentes (0, 3 e 5) mostram efeitos estatisticamente semelhantes entre si para germinação, crescimento e acúmulo de biomassa. A completa inibição da germinação e da formação de plântulas na lavagem 1 se reflete diretamente no comprimento e na massa fresca e seca, que também apresentaram médias iguais a zero e formaram um grupo isolado em todos os testes de Tukey. Esse comportamento está associado às características químicas desse efluente, que apresentou pH fortemente ácido (4,08), elevada condutividade elétrica e maior concentração de compostos orgânicos solúveis, condições reconhecidas por induzirem forte estresse osmótico e toxicidade metabólica durante a germinação (KARATAS et al., 2022).

Esse padrão indica que, após a remoção da primeira fração do efluente, o conteúdo residual de compostos orgânicos solúveis apresenta toxicidade suficientemente reduzida para permitir o desenvolvimento normal das plântulas. Esse mesmo comportamento foi relatado por Puccini et al. (2018) ao testar hidrochar fresco e lavado na germinação de alface e por Fregolente (2019) ao avaliar o efluente da carbonização hidrotérmica do bagaço de cana e vinhaça, nos quais o crescimento radicular e a biomassa aumentaram progressivamente conforme a carga orgânica dissolvida era reduzida por processos sucessivos de lavagem ou diluição.

O índice de velocidade de germinação (IVG) apresentou comportamento coerente com a germinação total, crescimento e acúmulo de biomassa das plântulas. Como esperado para esse índice, valores mais altos indicam germinação mais rápida e vigorosa, enquanto valores menores refletem germinação lenta ou ausente. Nesse contexto, a lavagem 1, com IVG igual a zero para ambas as cultivares, confirma a completa inibição da germinação, comportamento também observado nos demais parâmetros fisiológicos, reforçando que essa fração líquida inicial do efluente apresenta a maior carga de compostos fitotóxicos.

Esses compostos, incluindo fenóis, ácidos carboxílicos e fragmentos aromáticos parcialmente oxidados, podem interferir nos mecanismos iniciais de embebição, ativação metabólica e protrusão radicular. No tratamento controle, ambas as cultivares apresentaram os maiores valores de IVG, não diferindo estatisticamente entre si ($p > 0,05$), com médias próximas de 19–20. Nos tratamentos correspondentes às lavagens subsequentes (3 e 5), observou-se recuperação do IVG em ambas as

cultivares. Na lavagem 3, os valores foram intermediários (aproximadamente 16 para Elba e 17 para Americana), diferindo significativamente do controle e da lavagem 5 ($p < 0,05$). Já na lavagem 5, os valores de IVG foram semelhantes aos do controle, não apresentando diferença estatística significativa ($p > 0,05$), indicando redução dos efeitos fitotóxicos após sucessivas lavagens.

De modo geral, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as cultivares dentro de cada tratamento. As lavagens 0 e 5, classificadas no grupo "a" pelo teste de Tukey, apresentaram os maiores valores de IVG, indicando germinação mais rápida e vigorosa, com emergência concentrada nos primeiros dias. Essa resposta é consistente com um ambiente físico-químico mais favorável, caracterizado por pH próximo à neutralidade, baixa condutividade elétrica e redução significativa de cromóforos reativos identificados no UV-Vis.

A lavagem 3, por sua vez, posicionou-se no grupo "b", com IVG intermediário. Isso indica que, embora a germinação tenha ocorrido, sua velocidade foi moderadamente reduzida, refletindo a influência de compostos orgânicos ainda presentes no efluente parcialmente lavado. A consistência desse comportamento também é observada nos parâmetros de crescimento, nos quais, apesar da recuperação em relação à lavagem 1, os valores permanecem inferiores aos observados nas lavagens 0 e 5. A lavagem 3 representa, portanto, um estágio fisiológico de transição, no qual a remoção de compostos fitotóxicos já se iniciou, mas ainda não foi suficiente para restabelecer completamente o vigor germinativo.

Comparativamente, a cultivar Americana apresentou IVG ligeiramente superior ao da Elba nas lavagens 0, 3 e 5, indicando maior vigor inicial, coerente com seus maiores valores de comprimento radicular e acúmulo de biomassa. A cultivar Elba, por sua vez, apresentou maior sensibilidade, evidenciada pela maior redução proporcional do IVG e maior impacto nos parâmetros de crescimento, especialmente na lavagem 3. Essa diferença entre cultivares reforça a influência da composição química residual do efluente sobre a germinação e o desenvolvimento inicial das plântulas.

De modo geral, os resultados evidenciam que os parâmetros biométricos de crescimento vegetal, como comprimento de hipocótilo, raiz e plântula total, além da massa fresca e seca, são indicadores sensíveis e complementares aos testes de germinação e IVG, permitindo uma avaliação integrada da fitotoxicidade. A supressão completa do crescimento observada na primeira lavagem, seguida pela recuperação total ou parcial nas lavagens subsequentes, confirma a eficácia das lavagens sucessivas na remoção de compostos solúveis responsáveis pelos efeitos tóxicos.

Os bioensaios com *Artemia salina* com efluente de primeira lavagem evidenciaram elevada toxicidade do efluente proveniente da primeira lavagem, sendo observada mortalidade total dos náuplios em todas as concentrações testadas, incluindo a menor diluição (3,125%). O controle apresentou mortalidade de 30%, valor que, embora superior ao ideal recomendado para ensaios ecotoxicológicos, não comprometeu a identificação do efeito tóxico acentuado do efluente.

Em função da ausência de variação na resposta biológica entre as concentrações avaliadas, não foi possível estimar as concentrações letais (CL_{10}, CL_{50} e CL_{90}) por meio de análise Probit. A mortalidade total observada em todas as concentrações testadas indica elevada toxicidade aguda do efluente, sugerindo que a concentração letal mediana (CL_{50}) encontra-se abaixo da menor concentração avaliada. Esse comportamento inviabiliza a aplicação de modelos dose-resposta, uma vez que tais abordagens requerem a presença de um gradiente de resposta entre os tratamentos.

Em conjunto, os resultados demonstram que a fração líquida inicial gerada no processo de carbonização hidrotérmica apresenta elevado potencial ecotoxicológico, destacando a necessidade de tratamento adequado desse efluente e a importância das etapas de lavagem para viabilizar o uso seguro do hidrocarvão em aplicações ambientais e agrícolas.

Resultados semelhantes têm sido reportados na literatura para efluentes oriundos de processos termoquímicos, como a carbonização hidrotérmica, nos quais a fase líquida apresenta elevada carga orgânica e diversidade de compostos potencialmente tóxicos, incluindo ácidos orgânicos, compostos fenólicos e derivados furânicos, formados durante a degradação da biomassa (FREGOLENTE et al., 2018). A presença desses compostos está associada ao aumento da toxicidade observada em organismos aquáticos.

Considerações Finais

O estudo demonstrou que o efluente gerado na lavagem do hidrocarvão de *Acrocomia aculeata* apresenta elevada variabilidade físico-química e ecotoxicológica ao longo das etapas de lavagem. A primeira fração líquida concentrou compostos orgânicos solúveis de alta reatividade, associados a pH ácido, maior condutividade elétrica e elevada absorbância no UV-Vis, refletindo em forte efeito tóxico.

Essa condição resultou em inibição total da germinação e do desenvolvimento inicial de *Lactuca sativa*, além de elevada mortalidade em *Artemia salina*, mesmo em baixas concentrações. Por outro lado, as lavagens subsequentes promoveram redução progressiva da toxicidade, com recuperação das respostas biológicas.

Os resultados evidenciam que a primeira lavagem representa a fração de maior risco ambiental, destacando a necessidade de manejo e tratamento adequados desse efluente. Em estudos futuros, recomenda-se avaliar diferentes relações biomassa:água no processo de carbonização hidrotérmica, visando reduzir o volume de efluente gerado e modular a concentração de compostos orgânicos solúveis liberados durante a etapa de lavagem. A otimização dessa relação pode contribuir para minimizar a carga ecotoxicológica da fase líquida, reduzir a demanda por etapas posteriores de tratamento e tornar o processo de produção de hidrocarvão mais eficiente e ambientalmente seguro. De modo geral, o trabalho reforça a importância da avaliação ecotoxicológica integrada na produção de hidrocarvão, contribuindo para práticas mais seguras e sustentáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – Campus Sorriso, pelo apoio institucional e incentivo à pesquisa, no âmbito do projeto aprovado no II Edital do Desafio de Ideias do campus. Agradecem, igualmente, à Universidade da Beira Interior, em Covilhã, Portugal, pela oportunidade de apresentação e divulgação do projeto.

Referências Bibliográficas

BARGMANN, I. et al. Hydrochar as a substitute for peat in potting media: Characterization and evaluation. *Scientia Horticulturae*, v. 150, p. 45–54, 2013.

CAVALI, M. et al. A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. *Science of The Total Environment*, v. 857, p. 159627, 2023.

CHEN, Y.; SENESI, N.; SCHNITZER, M. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. *Soil Science Society of America Journal*, v. 41, n. 2, p. 352–358, 1977.

CHIN, Y.; AIKEN, G.; O'LOUGHLIN, E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances. *Environmental Science & Technology*, v. 28, n. 11, p. 1853–1858, 1994.

CHU, Q.; LIU, X.; FENG, Y. et al. Process water from hydrothermal carbonization: from waste to liquid fertilizer and soil health amendment in circular bioeconomy. *Biochar*, v. 8, p. 96, 2026.

FREGOLENTE, L. V.; FREGOLENTE, P. B. L.; MACIEL FILHO, R. Caracterização da fase líquida da carbonização hidrotérmica de biomassa lignocelulósica. *Bioresource Technology*, v. 249, p. 578–585, 2018.

FREGOLENTE, L. G. *et al.* Avaliação da toxicidade da água de processo da carbonização hidrotérmica de subprodutos da indústria da cana-de-açúcar. *Environmental Science and Pollution Research, v. 26, p. 27579–27589, 2019.*

KARATAS, M. et al. A review of hydrochar effects on plant growth and soil properties. *Environmental Technology & Innovation*, v. 27, p. 102450, 2022.

LIBRA, J. A. et al. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, v. 2, n. 1, p. 71–106, 2011.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, v. 2, n. 2, p. 176–177, 1962.

PEURAVUORI, J.; PIHLAJA, K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances. *Analytica Chimica Acta*, v. 337, n. 2, p. 133–149, 1997.

PRIAC, A. et al. Ecotoxicological effects of biochar and hydrochar on seed germination and plant growth: a review. *Environmental Pollution*, v. 229, p. 71–80, 2017.

PUCCINI, M. et al. Effect of hydrochar on seed germination and plant growth. *Journal of Environmental Management*, v. 209, p. 421–428, 2018.

REIBE, K. et al. Impact of hydrochar application on soil properties and plant growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 178, n. 5, p. 749–757, 2015.

SUAREZ, D. et al. Influence of washing treatments on hydrochar properties and phytotoxicity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, n. 2, p. 109123, 2023.

ZHANG, C.; ZHANG, R.; SHAO, Y.; WANG, J. Recent advances in hydrothermal carbonization of biomass: the role of process parameters and the applications of hydrochar. *Journal of Renewable Materials*, v. 14, n. 1, p. 1–10, 2025.

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE O DESEMPENHO TERMOACÚSTICO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE AGREGADOS NÃO CONVENCIONAIS

Lucas Eiti Hirose, Júlia Cássia do Nascimento, Renan Borelli Galvão, Sarah Honorato Lopes da Silva Tamura
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: lhirose@alunos.utfpr.edu.br; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: juliacassia@alunos.utfpr.edu.br; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: renanbgalvao@utfpr.edu.br; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: sarahh@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Isolamento Termoacústico; Armagassa de Reboco; Agregados Não Convencionais

Resumo

A contínua expansão da indústria da construção civil tem gerado preocupações crescentes quanto ao elevado consumo de recursos naturais não renováveis, especialmente agregados miúdos extraídos de jazidas, e à expressiva geração de resíduos sólidos. Em paralelo, a exigência por edificações mais eficientes e confortáveis, impulsionada por normativas rigorosas de qualidade e habitabilidade (como a Norma de Desempenho NBR 15575), torna imprescindível o desenvolvimento de materiais construtivos inovadores. Diante deste cenário, o presente artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura com o objetivo principal de analisar o desempenho termoacústico, físico e mecânico de argamassas de revestimento de reboco, produzidas a partir da substituição parcial ou total do agregado natural por agregados leves e resíduos recicláveis. A metodologia adotada consistiu na compilação e análise qualitativa e quantitativa de 14 estudos experimentais e de simulação numérica. Foram investigadas formulações contendo uma ampla diversidade de materiais: vermiculita expandida, resíduos de borracha de pneus, polietileno acetato de vinila (EVA), poliestireno expandido (EPS), lãs minerais, lodo de cal e materiais de mudança de fase (PCM). Os parâmetros avaliados incluíram condutividade térmica, atenuação sonora, porosidade, absorção de água e resistências mecânicas. Os resultados consolidados evidenciam que a introdução de partículas leves, com notório e recorrente destaque para a vermiculita expandida, modifica substancialmente a microestrutura da matriz cimentícia. O aumento expressivo do índice de vazios reduz drasticamente a massa específica da mistura, o que se traduz em uma expressiva diminuição da transferência de calor e em uma superior capacidade de absorção de ruídos aéreos e de impacto. Constatou-se, no entanto, que a elevação da porosidade acarreta uma queda proporcional na resistência à compressão e aderência. Contudo, a literatura demonstra que o emprego estratégico de adições minerais (como a sílica ativa) e fibras poliméricas é capaz de mitigar tais perdas, garantindo a integridade do sistema. Conclui-se que a incorporação tecnológica de resíduos não convencionais em argamassas constitui uma solução estrutural e ambientalmente viável, pois consolida os preceitos da economia circular ao reaproveitar passivos industriais e, simultaneamente, confere alta eficiência energética e conforto térmico às edificações.

Introdução

A indústria da construção civil é reconhecida globalmente como uma das atividades que mais consomem recursos naturais e, simultaneamente, uma das maiores geradoras de resíduos sólidos. Esse cenário impõe a necessidade urgente de buscar soluções que permitam o reaproveitamento de subprodutos e materiais que seriam descartados em aterros, mitigando o passivo ambiental do setor (Cintra et al., 2014).

Um dos materiais utilizados na construção, é a argamassa de reboco, que é fundamentalmente definida como uma mistura homogênea de aglutinantes, agregados miúdos e água, podendo conter adições químicas para melhorar suas propriedades. No sistema de vedação, o reboco atua como a camada final de revestimento, desempenhando funções essenciais de proteção contra agentes externos e regularização da superfície (Souza, 2020).

O isolamento termoacústico em edificações refere-se à resistência dos elementos construtivos contra fluxos energéticos distintos. O isolamento térmico diferencia-se por limitar a troca de calor entre o meio interno e externo, visando a estabilidade da temperatura, enquanto o isolamento acústico foca na atenuação da propagação de ondas sonoras e ruídos aéreos ou de impacto, onde tratando-se especificamente na alvenaria, o som pode se propagar de três formas distintas: refletido, absorvido ou incidente, conforme mostra a Figura 1 (Guilherme, 2019; Menezes, 2020).

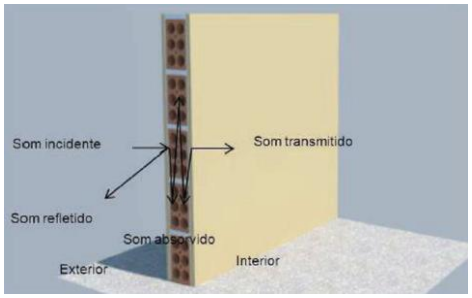


Figura 01: Propagação do Som na Alvenaria.
Fonte: (Cintra, 2013 apud Menezes, 2020)

Tais propriedades são cruciais para garantir o conforto dos usuários e para atender aos requisitos mínimos de desempenho estipulados por normas técnicas nacionais e internacionais (Menezes, 2020). Conforme estabelecido pela ABNT NBR 15575 (2013), as habitações unifamiliares devem ser projetadas de modo a garantir condições adequadas de desempenho térmico, levando em consideração a zona bioclimática onde se localizam. Nesse contexto, o zoneamento apresentado na Figura 2 organiza o território brasileiro em oito regiões com características climáticas semelhantes, sendo divididos de acordo com semelhança em temperatura, umidade do ar, entre outros. Além de delimitar essas áreas, a figura também apresenta a distribuição percentual de cada zona em relação à área total do Brasil, conforme critérios definidos na NBR 15220.

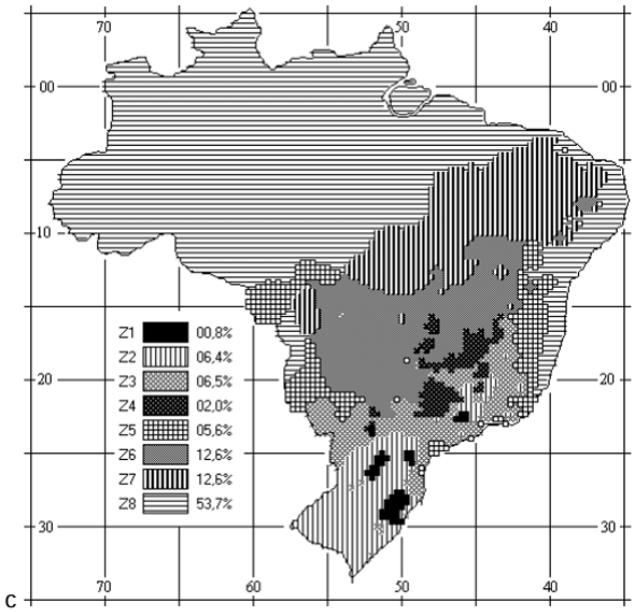


Figura 02: Zoneamento Bioclimático Brasileiro.
Fonte: ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2003)

Nesse contexto, o desenvolvimento de argamassas de reboco com maior capacidade isolante permite que as fachadas atuem como barreiras térmicas eficientes, reduzindo a necessidade de sistemas artificiais de climatização. Tal característica contribui diretamente para a eficiência energética do edifício ao longo de sua vida útil (PASSOS et al., 2016).

A incorporação de agregados leves e não convencionais, como a vermiculita expandida e polímeros reciclados, altera a microestrutura da argamassa, resultando em uma matriz mais porosa e menos densa. Essas modificações físicas são responsáveis por reduzir a condutividade térmica e melhorar a absorção de ondas sonoras pelo material (Silva et al., 2010).

A busca pela valorização de resíduos específicos, como o EVA e a borracha de pneus, quando utilizados em substituição ao agregado natural, apresenta-se como uma estratégia de economia circular. Tal prática não apenas conserva as jazidas de areia, mas também confere novas funcionalidades técnicas às argamassas de revestimento (Guilherme, 2019).

Dessa forma, considerando as exigências de desempenho habitacional, torna-se necessário sistematizar o conhecimento sobre o comportamento desses novos materiais. O presente artigo visa realizar uma revisão sistemática da literatura focada na análise do desempenho termoacústico de argamassas de reboco produzidas com agregados não convencionais (Barros, 2018).

Materiais e Métodos

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, fundamentada na análise qualitativa e quantitativa de estudos experimentais sobre argamassas de revestimento. A seleção das fontes priorizou investigações que utilizam materiais de baixa densidade, como a vermiculita expandida e polímeros reciclados, em substituição ao agregado miúdo convencional (Barros, 2018; Souza, 2020).

Os critérios de inclusão definiram como escopo principal as argamassas destinadas especificamente ao reboco, avaliando formulações compostas por cimento, cal e areia, além das misturas de ligantes mistos. Foram selecionados trabalhos que descrevem detalhadamente o efeito de diferentes preenchimentos leves e fibras nas propriedades físicas da matriz endurecida (Silva et al., 2010; Palomar et al., 2015).

Dentre os materiais não convencionais catalogados nos estudos selecionados, destacam-se a vermiculita expandida, os resíduos de borracha de pneus, o EVA e o lodo de cal. A análise permitiu observar como a variabilidade granulométrica e a origem desses resíduos influenciam diretamente na dosagem e na trabalhabilidade das misturas experimentais (CINTRA et al., 2014; Vashistha et al., 2019).

Para a avaliação do desempenho mecânico e físico, os estudos revisados empregaram ensaios padronizados de densidade de massa aparente, absorção de água por capilaridade e resistência à compressão simples. Estes parâmetros são fundamentais para correlacionar o aumento da porosidade com a redução da integridade estrutural da camada de reboco (Mo et al., 2018; Koksal et al., 2015).

A caracterização do desempenho térmico foi realizada, nas fontes consultadas, por meio da determinação da condutividade térmica e da análise da variação de temperatura em protótipos ou simulações computacionais. Já o desempenho acústico foi mensurado através do coeficiente de absorção sonora e da redução do nível de pressão sonora aérea (Guilherme, 2019; Menezes, 2020; Felix, 2019).

Adicionalmente, a metodologia incluiu a análise de pesquisas que incorporam materiais de mudança de fase (PCM) e adições minerais como a sílica ativa. Essas tecnologias foram avaliadas nas referências quanto à sua capacidade de otimizar a inércia térmica e a durabilidade das argamassas leves sob condições de exposição a elevadas temperaturas (Koksal et al., 2015; Xu et al., 2015).

A argamassa de reboco é fundamentalmente definida como uma mistura homogênea de aglutinantes, agregados miúdos e água, podendo conter adições químicas para melhorar suas propriedades. No sistema de vedação, o reboco atua como a camada final de revestimento, desempenhando funções essenciais de proteção contra agentes externos e regularização da superfície (Souza, 2020).

Resultados e Discussões

A análise dos estudos selecionados demonstra que a substituição parcial ou total de agregados naturais por materiais leves modifica profundamente a microestrutura da matriz cimentícia. Essa alteração física eleva significativamente o índice de vazios e reduz a densidade da mistura, promovendo um ganho expressivo nas propriedades isolantes da argamassa testada (Guilherme, 2019; Silva et al., 2010; Mo et al., 2018).

Apesar da notável melhoria nos índices de conforto ambiental, alguns dos principais pontos negativos destacados referem-se à queda acentuada na resistência mecânica à compressão e à tração, proporcional ao aumento do teor de substituição por agregados leves. Ademais, a natureza porosa de materiais como a vermiculita e o EVA eleva consideravelmente a absorção de água por capilaridade e a demanda de água no estado fresco para manter a trabalhabilidade (Guilherme, 2019; Souza, 2020; Mo et al., 2018). Contudo, constatou-se que o uso de adições complementares, como a sílica ativa e fibras poliméricas, é capaz de mitigar esse déficit estrutural sem comprometer o novo desempenho termoacústico adquirido (Koksal et al., 2015; Palomar et al., 2015).

Para sistematizar as evidências experimentais da literatura revisada, elaborou-se um quadro comparativo (Tabela 1). Nele, estão destacados o foco de cada investigação, os resíduos reaproveitados na dosagem, os parâmetros laboratoriais avaliados e as principais conclusões obtidas na validação dos protótipos e corpos de prova.

Autor	Desempenho	Tipo da Argamassa	Agregados Utilizados	Itens Estudados	Pontos Positivos	Resultados
Guilherme (2019)	Térmico	Revestimento	Vermiculita expandida	Condutividade térmica e resistências mecânicas	Redução acentuada na condutividade térmica do sistema	Redução de 24% na condutividade térmica para 50% de substituição, com queda proporcional da resistência.
Barros (2018)	Térmico	Revestimento	Vermiculita expandida	Difusividade térmica, densidade e resistência	Excelente comportamento como barreira ao fluxo de calor	Redução de mais de 50% na difusividade térmica nos traços com 75% a 100% de adição do agregado leve.
Cintra et al. (2014)	Termoacústico	Revestimento	Vermiculita expandida e borracha de pneus	Densidade, propriedades frescas e endurecidas	Duplo isolamento e promoção da economia circular	Diminuição da densidade da massa e potencialização significativa da capacidade de isolamento da alvenaria.
Delgado et al. (2022)	Termoacústico	Contrapiso (autonivelante)	Vermiculita expandida	Comportamento físico-mecânico e atenuação	Viabilidade de aplicação em pisos para mitigação de ruído	Efetiva atenuação de ruídos de impacto e isolamento de trocas térmicas entre diferentes pavimentos.

Tabela 01: Comparativo dos resultados obtidos nos estudos sobre argamassas não convencionais.
Fonte: Autoria Própria

Autor	Desempenho	Tipo da Argamassa	Agregados Utilizados	Itens Estudados	Pontos Positivos	Resultados
Felix (2019)	Térmico	Revestimento (simulação)	Vermiculita expandida	Comportamento térmico por simulações numéricas	Alta precisão na previsão do comportamento da matriz	Comprovou a eficácia da argamassa modificada em atuar isolando o ambiente de altas variações de temperatura.
Palomar et al. (2015)	Termoacústico	Revestimento	Fibras de celulose/PP e agregados leves	Fissuração inicial, absorção sonora e térmica	Combate eficaz à retração plástica nas primeiras idades	Agregados melhoraram a térmica/acústica, enquanto as fibras preservaram a mecânica controlando fissuras.
Passos et al. (2016)	Térmico	Revestimento (pré-moldados)	EPS, lã de rocha, lã de vidro e vermiculita	Capacidade isolante e eficiência energética	Diversidade de uso de materiais altamente descartados	Argamassas com EPS e lãs apresentaram ótima resposta isolante, atendendo os limites normativos de desempenho.
Koksal et al. (2015)	Térmico	Argamassa leve	Vermiculita expandida e sílica ativa	Durabilidade ao fogo e desempenho mecânico	Alta durabilidade frente a temperaturas severas	Sílica compensou perdas de resistência e a vermiculita transformou a mistura em excelente isolante contra o fogo.
Menezes (2020)	Acústico	Revestimento (vedação)	Vermiculita e polímero EVA	Isolamento sonoro a ruídos aéreos de fachadas	Reaproveitamento prático e normativo de polímeros	O sistema atingiu a classificação de desempenho acústico "Superior" segundo os rigorosos critérios da NBR 15575.
Mo et al. (2018)	Térmico	Argamassa cimentícia	Vermiculita expandida	Condutividade, resistência ao calor e porosidade	Forte estabilidade térmica do compósito gerado	Houve aumento da porosidade que diminuiu a densidade/resistência, mas garantiu ótima resistência ao calor.
Vashistha et al. (2019)	Termoacústico (implícito)	Diversas (incluindo argamassas)	Lodo de cal (lime sludge)	Viabilidade técnica e análise físico-mecânica	Ampla valorização de um resíduo industrial poluente	O material se mostrou viável para substituição parcial da areia, reduzindo emissões e mantendo estabilidade.
Xu et al. (2015)	Térmico	Argamassa de armazenamento	Vermiculita expandida e parafina (PCM)	Armazenamento de calor e isolamento estrutural	Inovação no controle de inércia térmica do ambiente	Isolamento térmico muito superior devido à excelente capacidade de absorver calor através de mudança de fase.
Silva et al. (2010)	Termoacústico	Revestimento (mista)	Vermiculita e perlita	Propriedades frescas, densidade e microestrutura	Alteração benéfica das redes de porosidade na matriz	O incremento drástico do índice de vazios provocou uma redução da propagação das ondas de calor e som.
Souza (2020)	Térmico	Revestimento	Vermiculita e polímero EVA	Desempenho térmico aferido in loco (protótipo)	Validação experimental em escala de ambiente real	Confirmou, na prática, a notável redução de temperatura no interior do protótipo em comparação ao traço referência.

Continuação Tabela 01: Comparativo dos resultados obtidos nos estudos sobre argamassas não convencionais.
Fonte: Autoria Própria

O detalhamento das propriedades térmicas evidencia que a eficiência dos compósitos gerados está diretamente ligada ao aprisionamento de ar no interior da matriz cimentícia. Materiais como a vermiculita e o EPS atuam como barreiras físicas que dificultam a transferência de calor por condução, justificando as expressivas quedas na difusividade térmica observadas nos ensaios práticos e nas simulações numéricas (Barros, 2018; Felix, 2019; Passos et al., 2016).

No que tange ao comportamento acústico, a porosidade introduzida pelos agregados não convencionais e a resiliência dos polímeros (como o EVA e a borracha) favorecem o amortecimento das ondas sonoras. Essa característica permite que a energia vibracional do som seja dissipada no interior do revestimento, resultando em índices superiores de isolamento a ruídos aéreos em fachadas e na atenuação de impactos em sistemas de contrapiso (Menezes, 2020; Cintra et al., 2014; Delgado et al., 2022).

Outro aspecto amplamente discutido nas pesquisas diz respeito ao comportamento das argamassas alternativas no estado fresco. A elevada área específica e a natureza celular da vermiculita demandam um maior volume de água de amassamento para garantir uma trabalhabilidade adequada para a aplicação do reboco, o que afeta diretamente o tempo de pega e a retenção de água da mistura final, conforme apresenta a comparação na Figura 3 e 4 (Silva et al., 2010; Mo et al., 2018).



Figura 03: Porosidade observada no Protótipo com Argamassa Convencional após Precipitação.
Fonte: Menezes (2020)



Figura 04: Porosidade observada no Protótipo com Argamassa com Presença de Agregados Não Convencionais após Precipitação
Fonte: Menezes (2020)

A literatura também explora inovações tecnológicas para otimizar ainda mais esse isolamento, como a impregnação de materiais de mudança de fase (PCM) na estrutura porosa dos agregados leves. O uso de parafinas abrigadas na vermiculita confere à argamassa a capacidade de armazenar e liberar energia térmica de forma latente, regulando passivamente a temperatura dos ambientes (Xu et al., 2015).

Apesar dos expressivos ganhos em conforto ambiental, os autores corroboram que a alteração microestrutural penaliza o desempenho estrutural da mistura. A redução da resistência mecânica e o aumento da absorção de água por capilaridade exigem que o uso desses compósitos seja criteriosamente restrito a elementos de vedação, ou compensado com adições pozolânicas e metodologias de reforço (Guilherme, 2019; Souza, 2020; Koksal et al., 2015).

Considerações Finais

A revisão sistemática permitiu concluir que a incorporação de agregados não convencionais em argamassas de reboco atende de forma satisfatória aos requisitos de desempenho termoacústico. A presença de vazios estruturais proporcionada pela

vermiculita e por polímeros é o fator determinante para a redução da condutividade térmica e da pressão sonora (Barros, 2018; Menezes, 2020).

A análise transversal dos estudos evidencia que a vermiculita expandida atua como o principal agente de leveza e isolamento, sendo eficaz em aplicações que variam desde o reboco de fachadas até camadas de contrapiso autonivelante. Sua eficácia é comprovada pela drástica redução da condutividade térmica e pela melhoria no conforto acústico entre pavimentos, atendendo com folga aos requisitos normativos de desempenho (Barros, 2018; Delgado et al., 2022). Dessa forma, a vermiculita (Figura 5) consolida-se como um agregado multifuncional indispensável para a viabilização de habitações termicamente eficientes e sustentáveis (Guilherme, 2019; Menezes, 2020).



Figura 05: Vermiculita Expandida.
Fonte: Menezes (2020)

Do ponto de vista ambiental, o reaproveitamento de resíduos como o EVA, a borracha e o lodo de cal mostra-se uma estratégia eficaz para a sustentabilidade na construção civil. Essas práticas transformam passivos ambientais em matérias-primas funcionais, reduzindo significativamente a extração de recursos naturais finitos para a produção de revestimentos (Cintra et al., 2014; Vashistha et al., 2019).

No entanto, a aplicação prática dessas misturas exige um controle rigoroso do traço, visto que a melhoria no isolamento frequentemente acarreta perdas na resistência mecânica. O uso de adições minerais e fibras surge como uma solução tecnicamente viável para equilibrar a porosidade necessária com a durabilidade e aderência exigidas para o reboco (Palomar et al., 2015; Koksal et al., 2015).

Em suma, as argamassas leves com agregados reciclados representam uma evolução tecnológica necessária para os sistemas de vedação vertical modernos. Os resultados consolidados nesta revisão validam esses materiais como alternativas promissoras para a execução de edifícios energeticamente mais eficientes e ambientalmente responsáveis (Souza, 2020; Passos et al., 2016).

Agradecimentos

Expresso minha sincera gratidão à minha orientadora, Professora Doutora Sarah Honorato, pela inestimável dedicação e orientação, essenciais para a realização desta pesquisa. Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BARROS, I. M. S. Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - Propriedades relevantes. Cerâmica, v. 60, p. 69-76, 2014.

DELGADO, D. A.; FOIATO, M.; CARELLI, J. M. Estudo do desempenho termoacústico de argamassa autonivelante para contrapiso com incorporação de vermiculita. Conjecturas, v. 9, 2022. DOI: 10.18593/cc.v9.30065.

FELIX, G. E. S. Análise do comportamento térmico da argamassa com agregado de vermiculita expandida por meio de simulações numéricas. 2019. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2019.

GUILHERME, D. D. P. Estudo do desempenho térmico e mecânico em argamassas de revestimento com substituição do agregado natural pela vermiculita expandida. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

KOKSAL, F.; GENCEL, O.; KAYA, M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. Construction and Building Materials, v. 88, p. 175-187, 2015.

MENEZES, F. Y. M. Avaliação do isolamento acústico de um sistema de vedação vertical composto por argamassa com adição de EVA e vermiculita. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

MO, K. H.; LEE, H. J.; LIU, M. Y. J.; LING, T.-C. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. Construction and Building Materials, v. 179, p. 302-306, 2018.

PALOMAR, I.; BARLUENGA, G.; PUENTES, J. Lime-cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. Construction and Building Materials, v. 75, p. 306-314, 2015.

PASSOS, P. M.; CARASEK, H.; AMARAL, G. M. Avaliação da capacidade isolante térmica de revestimentos de argamassa. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 2016, São Paulo. Anais **[...]**. São Paulo: ANTAC, 2016.

SILVA, L. M.; RIBEIRO, R. A.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar. Cement & Concrete Composites, v. 32, p. 19-24, 2010.

SOUZA, S. J. M. Análise do comportamento térmico em argamassas de revestimento com adição de EVA e vermiculita em protótipo de ambiente residencial. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

VASHISTHA, P.; KUMAR, V.; SINGH, S. K.; DUTTA, D.; TOMAR, G.; YADAV, P. Valorization of paper mill lime sludge via application in building construction materials: A review. Construction and Building Materials, v. 211, p. 371-382, 2019.

XU, B.; MA, H.; LU, Z.; LI, Z. Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites. Applied Energy, v. 160, p. 358-367, 2015.

APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE TONALITO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS: ANÁLISE FÍSICO-MECÂNICA E AMBIENTAL

1 Lidiane Cristina Félix de Meneses, 2 Camila Campos Gómez Famá, 3 Americo Bertulino de Oliveira, 4 Kevillyn Maria Vieira Laurindo, 5 Ana Karolina Pereira Minor da Silva

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: lidiane.meneses@ifpb.edu.br; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: camila.fama@ifpb.edu.br; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: americo@ifpb.edu.br; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: kevillyn.maria@academico.ifpb.edu.br; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, e-mail: ana.minor@academico.ifpb.edu.br.

Palavras-chave: Sustentabilidade na construção civil; Impacto Ambiental; Resíduos; Tonalito.

Resumo

A indústria da construção civil e a mineração são, sem dúvida, grandes consumidoras de recursos naturais e, consequentemente, importantes geradoras de resíduos. Nesse contexto, recai sobre esses setores uma responsabilidade significativa quanto ao gerenciamento adequado desses materiais. Ainda assim, tratam-se de atividades essenciais para a sociedade, que podem ser conduzidas de forma mais consciente do ponto de vista ambiental. Além disso, ambos os setores enfrentam desafios para atender às demandas atuais relacionadas à sustentabilidade, especialmente no que diz respeito à redução da exploração de recursos naturais e à minimização da geração de resíduos. Nesse cenário, o aproveitamento de rejeitos na produção de tijolos ecológicos torna-se uma alternativa relevante, pois contribui para um uso mais racional dos recursos ambientais, que são finitos, e, ao mesmo tempo, pode gerar ganhos econômicos antes não explorados, favorecendo uma abordagem alinhada aos três pilares da sustentabilidade: ambiental, social e econômico. Diante disso, esta pesquisa teve como proposta utilizar o rejeito do beneficiamento de tonalito na produção de tijolos ecológicos. Para tanto, foram confeccionados tijolos de referência com traço 1:8, bem como tijolos com incorporação de 10% e 20% de resíduo de tonalito. Os materiais produzidos foram avaliados por meio de ensaios em laboratórios, com o objetivo de verificar sua adequação às normas vigentes da ABNT.A interpretação conjunta dos resultados experimentais e dos gráficos tensão versus tempo permitiu identificar que o teor de 10% apresentou comportamento mecânico mais estável, com evolução progressiva da tensão até a ruptura, enquanto o teor de 20% indicou maior irregularidade, sugerindo redução da coesão da matriz em função do aumento do teor de resíduo. Esses resultados indicam a existência de um teor ótimo de incorporação, no qual há equilíbrio entre melhoria granulométrica e manutenção da integridade estrutural do material. De modo geral, os resultados indicam a possibilidade de reaproveitamento do resíduo de tonalito na produção de tijolos solo-cimento, desde que haja aprimoramento no processo de fabricação. Ainda assim, são necessários novos estudos, considerando diferentes proporções de incorporação e ajustes nos materiais utilizados. Nesse sentido, reforça-se a importância de ampliar as investigações sobre esse tipo de resíduo, bem como sua divulgação, dada a relevância de práticas mais sustentáveis para a sociedade.

Introdução

A construção civil tem grande importância para o desenvolvimento das cidades, todavia gera impactos ambientais significativos, muitas vezes irreversíveis, diante do volume de resíduos produzidos.

Morais et al (2025) afirmam que além dos impactos ambientais negativos, o setor da construção civil esgota os recursos naturais desde a confecção dos materiais até a edificação da obra e seu desenvolvimento.

Vale destacar, que o volume de entulhos de construção e demolição produzido é em muitos casos o dobro maior que o volume de detritos sólido urbano. De acordo com Gomes et al (2024) a indústria da construção civil é sem dúvida, uma das maiores consumidoras de recursos naturais e consequentemente geradora de resíduos no mundo. E com isso, traz uma grande responsabilidade no gerenciamento de seus resíduos

Diante desse cenário, Cordeiro e Machado (2017) reflete sobre a necessidade de repensar as práticas atuais e ter um olhar voltado para mitigação desses impactos ambientais, mantendo a qualidade das edificações, através de pesquisas sobre novas soluções e técnicas construtivas que criem uma relação de sustentabilidade com o meio ambiente.

Com disso, Fernandes (2015) aponta que há pouco tempo, somente se falava em destinar os resíduos da construção civil para locais específicos, separados dos demais resíduos produzidos pelo povo, porém diante de tantos desafios enfrentados pela sociedade, em tornar as ações humanas mais sustentáveis, essa indústria foi provocada a encontrar soluções para os problemas dos seus resíduos.

Nesse contexto, a sustentabilidade surge como uma resposta à emergência de sanar os danos causados pelo setor construtivo, trazendo em seu contexto seus pilares para equilibrar a preservação dos recursos naturais, trazer a justiça social e a viabilidade financeira.

A preocupação com os recursos ambientais de forma inteligente está fortemente em evidência, pois se tornou uma necessidade para o planeta e para as futuras gerações, onde o tema sustentabilidade é destaque em eventos e congressos internacionais (DA SILVA BARBOSA et al., 2018).

Nesse cenário, os tijolos ecológicos despontam como uma alternativa sustentável e promissora para substituir os tijolos convencionais na construção civil.

Partindo desse contexto, a integração entre dois setores historicamente responsáveis por elevados impactos ambientais — a construção civil e a mineração — pode se configurar como uma estratégia concreta para a mitigação desses danos.

Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos gerados pela mineração na produção de tijolos, telhas e outros componentes construtivos surge como uma alternativa viável. Essa integração permite não apenas reduzir o volume de rejeitos descartados, mas também diminuir a extração de matérias-primas naturais, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais. Assim, ao incorporar princípios de sustentabilidade, essa relação entre os dois setores deixa de ser apenas um problema e passa a fazer parte da solução.

Diante disso, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso de rejeitos provenientes do beneficiamento de tonalito na produção de tijolos ecológicos.

Material e Métodos

A confecção dos tijolos foi feita utilizando a norma NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento (ABNT, 2012). Deste modo, a preparação do material foi realizada em quatro etapas, conforme Figura 1.

A confecção dos tijolos foi realizada em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 10833, que normatiza a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com uso de prensa manual ou hidráulica (ABNT, 2012). Deste modo, a preparação dos materiais foi organizada em quatro etapas sequenciais, apresentadas na Figura 1.



Figura 01: Fluxograma das etapas de fabricação dos tijolos ecológicos com resíduo de Tonalito.
Fonte: Adaptado pelo autor com auxílio de inteligência artificial (2026).

A primeira etapa se deu através da preparação da amostra de de tonalito, que foi a conferência da granulometria do material, não necessitando de nenhum outro processo de redução da sua granulometria, e o solo pelo processo de ensaio granulométrico. Ambos os materiais deveriam atender às seguintes características:

A. 100% de material que passa na peneira com abertura de malha de 4,75 mm;

B. 10% a 50% de material que passa na peneira com abertura de malha 75$\mu\mu$m.

Já na segunda etapa, foi determinado o traço a ser utilizado nos tijolos solo-cimento de referência seria de 1:8 e que nos tijolos solo-cimento com resíduo de tonalito seriam incorporados teores de 10% e 20% deste material.

Ainda na segunda etapa, foi realizado a caracterização do solo a ser utilizado para confecção dos tijolos, onde foram realizados os ensaios de limite de liquidez e índice de plasticidade, buscando obter valores, respectivamente, menor ou igual a 45% e 18% em conformidade com a NBR 10833 (ABNT, 2012).

Logo em seguida, na terceira etapa foi realizada, a produção do tijolo ecológico, executada com prensa manual, sendo confeccionados os tijolos de referência e os com resíduo de tonalito incorporado nas dimensões de 25cm x 12,5cm x 2,5cm de acordo com as especificações das normas NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 10833 (ABNT, 2012). Após a moldagem, foi realizada a cura dos tijolos nos períodos de 24 horas e 7 dias para execução dos ensaios de adequação à norma. A Tabela 1 mostra a quantidade de cada material utilizado para a produção dos tijolos.

Materiais utilizados	Tijolos de referência	Tijolos com 10% de tonalito incorporado	Tijolos com 20% de tonalito incorporado
Solo (kg)	12	12	12
Cimento (kg)	1,5	1,80	1,60
Res. Tonalito (g)	0	200	400
Água (ml)	2000	1800	1600

Tabela 1: Quantitativo dos materiais utilizados para a moldagem dos tijolos.
Fonte: Autor (2025)

Na última etapa foram realizados os ensaios para análise da adequação dos tijolos à norma. Nesta fase foram feitos os testes de análise de absorção de água e resistência à compressão conforme relatado na NBR 8492: Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional e visual, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio (ABNT, 2012).

Resultados e Discussão

3.1 Preparação da amostra de solo e do resíduo de tonalito

A preparação da amostra de solo foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas, incluindo secagem ao ar, destorroamento e peneiramento do material (Figura 2a), de acordo com a ABNT NBR 6457. Em seguida, foram executados os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, conforme as ABNT NBR 6459 e ABNT NBR 7180, respectivamente, bem como a análise granulométrica segundo a ABNT NBR 7181.

Os dados obtidos permitiram a construção da curva de fluidez e a determinação do limite de liquidez correspondente a 25 golpes, conforme procedimento normatizado. Esse conjunto de ensaios atende às exigências da NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento (ABNT, 2012), que estabelece a necessidade de caracterização física do solo como etapa fundamental para a produção de tijolos de solo-cimento.

O resíduo de tonalito foi submetido a britagem, moagem e classificação granulométrica, com o objetivo de adequar sua distribuição de partículas à mistura solo-cimento (Figura 2b). Esse procedimento é essencial para garantir uma adequada compactação e reduzir a presença de vazios na matriz, conforme preconizado pela NBR 10833 (ABNT, 2012), que destaca a importância da homogeneidade e da granulometria adequada dos materiais constituintes.





Figura 2. Preparação do solo para ensaios (a). Preparação da amostra do resíduo de tonalito(b).
Fonte: Autor (2025)

3.2 Caracterização do solo

Os resultados obtidos indicaram um limite de liquidez de aproximadamente 17,3% e um índice de plasticidade de cerca de 0,3%, atendendo aos limites estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012), que recomenda valores de $LL \leq 45\%$ e $IP \leq 18\%$ para utilização em solo-cimento.

Apesar do atendimento aos critérios normativos, o baixo índice de plasticidade indica reduzida coesão entre as partículas do solo, característica típica de materiais com predominância de frações arenosas. Segundo os princípios de estabilização previstos na NBR 10833 (ABNT, 2012), solos com baixa plasticidade podem apresentar menor capacidade de ligação após a adição de cimento, o que pode impactar a resistência mecânica e a durabilidade dos elementos produzidos.

Dessa forma, embora o material seja tecnicamente aceitável segundo a norma, sua condição granulométrica e de plasticidade sugere a necessidade de ajustes na composição, especialmente no equilíbrio entre frações finas e grossas, visando melhorar o desempenho final dos tijolos.

3.3 Confecção do tijolo de solo-cimento

A confecção dos tijolos foi realizada por meio de preparo manual dos materiais, seguido de homogeneização, moldagem e cura, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012), que define etapas fundamentais como mistura adequada, compactação eficiente e controle das condições de cura.

Os tijolos foram armazenados em ambiente protegido, evitando exposição direta ao sol, de modo a garantir condições adequadas para o processo de hidratação do cimento. A cura adequada é um fator determinante para o desenvolvimento da resistência mecânica, conforme indicado na referida norma.

Foram produzidos tijolos de referência e tijolos com adição de 10% e 20% de tonalito, permitindo avaliar a influência da incorporação do resíduo nas propriedades do material. A variação do teor de adição constitui uma estratégia importante para análise do comportamento do sistema solo-cimento. A Figura 3(a) ilustra o processo de fabricação dos tijolos e de uma amostra dos mesmos quando finalizados Figura 3(b).



Figura 3. Processo de fabricação dos tijolos (a), tijolos solo-cimento (b).
Fonte: Autor (2025)

3.4 Análise da adequação dos tijolos à norma

A avaliação da resistência à compressão simples foi realizada conforme os procedimentos da NBR 8492: Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio (ABNT, 2012). Os critérios de aceitação dos resultados estão definidos na NBR 8491: Tijolo de solo-cimento -- Requisitos (ABNT, 2012).

A Figura 4 apresenta as etapas de preparação dos corpos de prova (Figura 4a) e sua submissão ao carregamento axial até a ruptura (Figura 4b), evidenciando a padronização do processo experimental e o adequado alinhamento dos corpos de prova durante o ensaio, condição essencial para a confiabilidade dos resultados obtidos.



Figura 4. Preparação dos tijolos (a), Ensaio de resistência à compressão simples (b).
Fonte: Autor (2025)

Os resultados experimentais obtidos para os tijolos com adição de 10% de tonalito (Figura 5) indicam um comportamento mecânico compatível com materiais cimentícios de baixa a média resistência inicial. Observa-se que a resistência à compressão alcançada apresenta tendência de crescimento contínuo até o pico de ruptura, refletindo uma boa interação entre as partículas do solo, o cimento e o resíduo incorporado. Esse comportamento é corroborado pelo gráfico tensão versus tempo (Figura 6), no qual se verifica uma evolução progressiva da tensão aplicada, seguida de ruptura relativamente abrupta, característica típica de materiais frágeis com baixa capacidade de deformação plástica.

NBR 10836 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural

Dados cadastrais da amostra

Nome Amostra:	PROJ.TIJOLO ECOLOG.TONALITO 10%
Tipo de Ensaio:	NBR 10836 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural
Cliente:	PESQUISA
Responsável:	LIDIANE
Data Moldagem:	22 dezembro, 2025

Dados cadastrais do corpo de prova

Nome C.P.	Idade	Tensão Ruptura	Carga Ruptura	- - - -
1/5 TONALITO10%	86	0,6 (MPa)	1.346 (kgf)	
2/5 TONALITO10%	86	1,8 (MPa)	4.117 (kgf)	
3/5 TONALITO10%	86	0,8 (MPa)	1.744 (kgf)	
4/5 TONALITO10%	86	0,6 (MPa)	1.437 (kgf)	
5/5 TONALITO10%	86	1,2 (MPa)	2.767 (kgf)	
Média:		**1,0 (MPa)**	**2.282 (kgf)**	

Figura 5: Resultado da resistência à compressão simples do bloco de solo-cimento com adição de 10% de tonalito.
Fonte: Autor (2025)

Gráfico dos ensaios

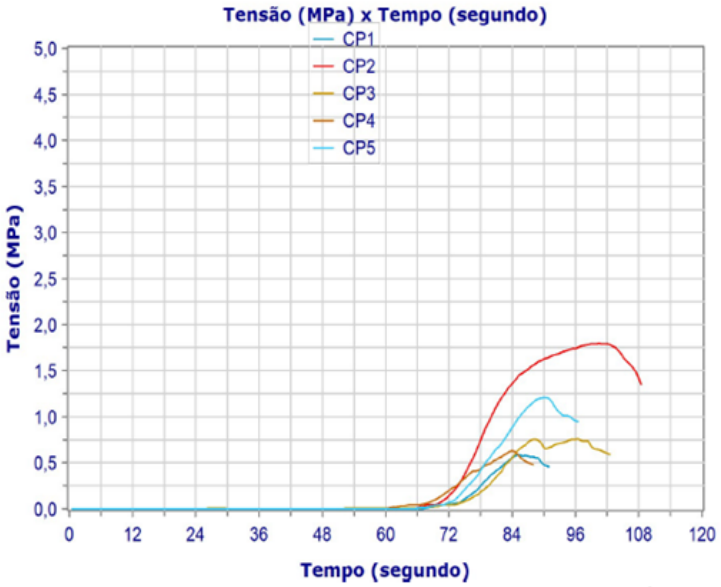


Figura 6: Gráfico Tensão (Mpa) x Tempo (s) do bloco de solo-cimento com adição de 10% de tonalito.
Fonte: Autor (2025)

Para os tijolos com adição de 20% de tonalito (Figura 7), nota-se uma alteração no desempenho mecânico em relação à composição com menor teor de resíduo. A resistência à compressão pode apresentar variação em função da maior incorporação do material granular, o que influencia diretamente a matriz cimentícia e a zona de transição interfacial. Em alguns casos, o aumento do teor de resíduo pode promover melhor empacotamento das partículas, contribuindo para o ganho de resistência; contudo, quando em excesso, pode reduzir a coesão do sistema, comprometendo o desempenho mecânico. O gráfico tensão versus tempo correspondente (Figura 8) evidencia esse comportamento, podendo apresentar menor rigidez inicial ou ruptura mais precoce, dependendo da homogeneidade da mistura e da eficiência da compactação.

NBR 10836 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural

Dados cadastrais da amostra

Nome Amostra:	PROJ. TIJOLO ECOLOG. TONALITO 20%
Tipo de Ensaio:	NBR 10836 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural
Cliente:	
Responsável:	
Data Moldagem:	22 dezembro, 2025

Dados cadastrais do corpo de prova

Nome C.P.	Idade	Tensão Ruptura	Carga Ruptura	- - - -
1/5 PROJ.TIJOLO ECO	86	1,0 (MPa)	2.370 (kgf)	
2/5 PROJ.TIJOLO ECO	86	0,9 (MPa)	1.991 (kgf)	
3/5 PROJ.TIJOLO ECO	86	0,8 (MPa)	1.894 (kgf)	
4/5 PROJ.TIJOLO ECO	86	1,4 (MPa)	3.102 (kgf)	
5/5 PROJ.TIJOLO ECO	86	0,8 (MPa)	1.844 (kgf)	
Média:		**1,0 (MPa)**	**2.240 (kgf)**	

Figura 7: Resultado da resistência à compressão simples do bloco de solo-cimento com adição de 20% de tonalito.
Fonte: Autor (2025)

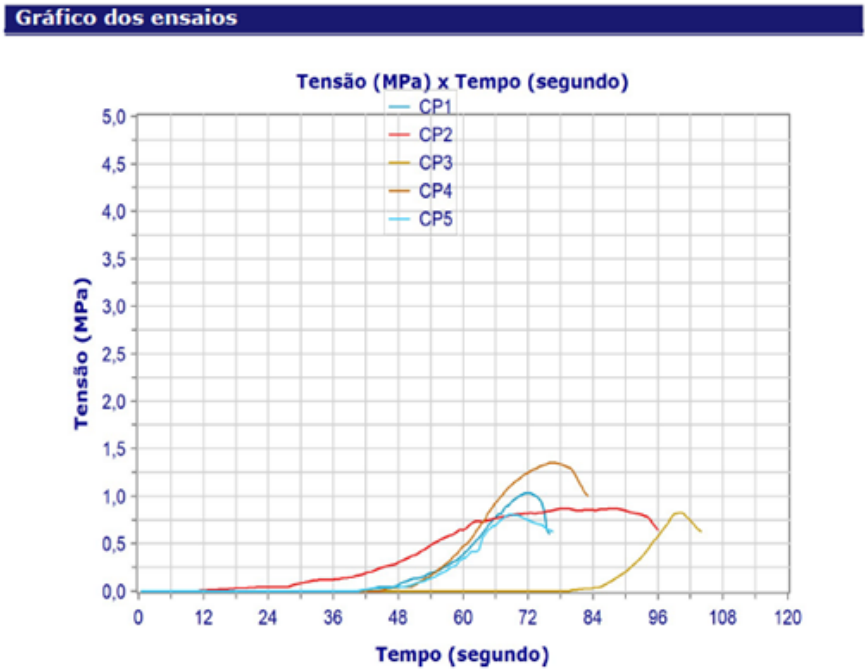


Figura 8: Gráfico Tensão (Mpa) x Tempo (s) do bloco de solo-cimento com adição de 10% de tonalito.
Fonte: Autor (2025)

De forma geral, a análise comparativa entre os teores de adição de tonalito sugere que existe um teor ótimo de incorporação capaz de equilibrar os efeitos positivos da melhoria granulométrica com a manutenção da coesão da matriz solo-cimento. A interpretação dos gráficos tensão versus tempo permite ainda avaliar a rigidez e o modo de ruptura dos materiais, sendo possível identificar comportamentos mais frágeis ou mais estáveis conforme a composição adotada.

A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão simples, evidenciando que a incorporação de tonalito promoveu aumento da resistência média dos tijolos em relação ao traço de referência. Observa-se que o teor de 10% apresentou o maior valor médio (1,00 MPa), seguido do teor de 20% (1,00 MPa), ambos superiores ao valor obtido para os tijolos de referência (0,70 MPa). Entretanto, o elevado desvio padrão observado para o teor de 10% indica maior variabilidade dos resultados, possivelmente associada a diferenças no processo de moldagem e compactação. De modo geral, os resultados indicam que a incorporação de tonalito contribui para o aumento da resistência, com desempenho mais consistente para o teor de 20%

RESISTÊNCIA	Referência	10% de tonalito	20% de tonalito
C.P. 1	0.6 (MPa)	0.6 (MPa)	1,0 (MPa)
C.P. 2	0,8 (MPa)	1,8 (MPa)	0,9 (MPa)
C.P. 3	0,7 (MPa)	0,8 (MPa)	0,8 (MPa)
C.P. 4	—	0.6 (MPa)	1,4 (MPa)
C.P. 5	—	1,2 (MPa)	0,8 (MPa)
Média	0,7 (MPa)	1,0 (MPa)	1,0 (MPa)
Desvio padrão	0,10 MPa	0,53 MPa	0,24 MPa

Tabela 2: Ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos de solo-cimento
Fonte: Autor (2025)

Considerações finais

Os resultados obtidos neste estudo permitiram avaliar a viabilidade da incorporação do resíduo de tonalito na produção de tijolos de solo-cimento, evidenciando seu potencial como material alternativo no contexto da construção civil sustentável. A caracterização do solo indicou conformidade com os requisitos estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012), embora a baixa plasticidade observada sugira limitações quanto à coesão da matriz, podendo influenciar o desempenho mecânico dos elementos produzidos. No que se refere à resistência à compressão simples, verificou-se que a incorporação de tonalito contribuiu para o aumento da resistência média dos tijolos em relação ao traço de referência, com valores de 1,00 MPa para os teores de 10% e 20%, superiores ao valor de 0,70 MPa obtido para os tijolos sem adição. Contudo, a análise do desvio padrão evidenciou maior variabilidade nos resultados para o teor de 10%, indicando possível influência de fatores operacionais, como heterogeneidade da mistura e eficiência da compactação.

A interpretação conjunta dos resultados experimentais e dos gráficos tensão versus tempo permitiu identificar que o teor de 10% apresentou comportamento mecânico mais estável, com evolução progressiva da tensão até a ruptura, enquanto o teor de 20% indicou maior irregularidade, sugerindo redução da coesão da matriz em função do aumento do teor de resíduo. Esses resultados indicam a existência de um teor ótimo de incorporação, no qual há equilíbrio entre melhoria granulométrica e manutenção da integridade estrutural do material.

Apesar dos ganhos observados, os valores de resistência obtidos ainda se encontram inferiores aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), evidenciando a necessidade de ajustes no processo de fabricação, especialmente no que se refere à dosagem de cimento, controle da umidade e melhoria das condições de compactação.

Dessa forma, conclui-se que o uso do resíduo de tonalito na produção de tijolos de solo-cimento apresenta potencial técnico e ambiental, contribuindo para a redução de impactos associados à disposição de resíduos e ao consumo de recursos naturais. No entanto, recomenda-se a realização de estudos complementares, com diferentes traços, teores de cimento e possíveis correções granulométricas, visando à obtenção de um material que atenda plenamente aos requisitos normativos e apresente desempenho adequado para aplicação prática.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/CNPq pela concessão de bolsas aos estudantes envolvidos, cujo apoio foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABNT.* Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8491: Tijolo maciço de solo- cimento: Método de ensaio.* Rio de Janeiro, 2012.

ABNT.* Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8492: Tijolo maciço de solo-cimento: Determinação da resistência à compressão e à tração por compressão diametral.* Rio de Janeiro, 2012.

ABNT.* Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria: Requisitos.* Rio de Janeiro, 2014.

CORDEIRO, C. R.; MACHADO, V. C. **Sustentabilidade na fabricação do tijolo solo-cimento: estudo comparativo com blocos convencionais**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Aparecida de Goiânia, Aparecida de Goiânia, 2017.

DA SILVA BARBOSA, Uende; SALOMÃO, Pedro Emílio Amador; LAUAR, Guilherme Taroni; RIBEIRO, Paulo Toledo. Reutilização do concreto como contribuição para a sustentabilidade na construção civil. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro– Unipac** ISSN, v. 2178, p. 6925, 2018.

FERNANDES, Bruna Cristina Mirandola. **A utilização de resíduos da construção civil e demolição (RCD) como agregado para o concreto**. 2015. Disponível em: https://repositorioinstitucional.uniformg.edu.br:21074/xmlui/handle/123456789/290. Acessado em: 10/07/2024.

MORAIS, J. M. P. et al. **Tijolo ecológico como alternativa sustentável: avaliação técnica e econômica frente ao déficit habitacional**. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 18, n. 9, p. 1–22, 2025.

GOMES, Sofia Roxanne Felix; MONTEIRO, Luan José Pereira; FAMÁ, Camila Campos Gómez; GOMES, Lidiane Cristina Félix. **Análise da incorporação de rejeitos de minérios para fabricação de tijolos de solo-cimento sustentáveis**. *Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente*, v. 5, n. 4, 2024. ISSN: 2675-813X.

AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DE ANTIBIÓTICO NITROFURANTOÍNA POR BENTONITA CÁLCICA

Thiago Mercês de Oliveira, Mariana Consiglio Kasemodel,
Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, e-mail: thiagomerces@usp.br , mariana.kasemodel@usp.br

Palavras-chave: Nitrofurantoína, Adsorção, Bentonita cálcica.

Resumo

A presença de antibióticos em compartimentos ambientais é um problema de magnitude global, contribuindo diretamente para a crise da resistência antimicrobiana (RAM), que causou milhões de mortes em 2019. Este estudo avaliou o potencial de adsorção do antibiótico nitrofurantoína (NIT) utilizando a bentonita cálcica (BB) de Tremembé-SP em sua forma natural. O adsorvente foi caracterizado físico-quimicamente, apresentando uma área superficial específica de 395,85 $m^2\ g^{-1}$, capacidade de troca catiônica (CTC) alta (50,56 $cmolc\ kg^{-1}$) e carga superficial líquida negativa (ΔpH -0,7). Os ensaios de sorção em lote foram conduzidos por 24 horas, variando a massa do adsorvente (0,25g 0,5g 0,75g 1g e 2g) e a concentração do adsorvato (47,5 mg/L 95mg/L e 190 mg/L). Os resultados obtidos indicaram uma eficiência de remoção variando de 25% a aproximadamente 80%, com o valor máximo obtido quando a massa de adsorvente foi superior a 0.75g.

Introdução

Os antibióticos são compostos amplamente utilizados na medicina humana e veterinária, bem como em práticas agrícolas, com o objetivo de prevenir e tratar infecções microbianas (WU et al., 2025). Eles desempenham um papel central nas políticas públicas de saúde, compondo diretrizes fundamentais como a Relação Nacional de Medicamentos Essenciais (RENAME), que atua como um instrumento racionalizador para garantir a padronização e o acesso equitativo a tratamentos (BRASIL, 2024). Contudo, o uso excessivo e muitas vezes inadequado desses medicamentos tem provocado a sua acumulação no meio ambiente e a consequente perda de sua eficácia, ameaçando o núcleo da medicina moderna (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2015).

Dentre os antibióticos, destaca-se a nitrofurantoína, um sintético extensamente empregado no tratamento de infecções urinárias. Devido à sua eficácia contra bactérias gram-positivas e gram-negativas, este fármaco é presente na lista de medicamentos essenciais da Organização Mundial da Saúde (OMS) e está classificado pelo Ministério da Saúde do Brasil na categoria de "Acesso" (classificação AWaRe), o que assegura sua indicação como opção de primeira ou segunda linha com ampla disponibilidade na atenção básica (BRASIL, 2024).

Apesar de sua importância clínica, estima-se que mais de 50% dos antibióticos consumidos entrem no meio ambiente, seja como composto original ou através de seus metabólitos. O descarte contínuo proveniente de efluentes industriais, efluentes hospitalares e fertilizantes agrícolas resulta na presença frequente desses contaminantes em solos, rios e águas subterrâneas (WU et al., 2025; XIE et al., 2024). Essa poluição ambiental atua como uma forte pressão seletiva sobre as comunidades microbianas, acelerando a disseminação de Genes de Resistência aos Antibióticos (ARGs) e o surgimento de cepas multirresistentes (WU et al., 2025).

O impacto direto dessa poluição é a Resistência Antimicrobiana (RAM), uma crise global que, se não controlada de forma urgente, pode nos levar a uma era "pós-antibiótico" na qual infecções comuns voltem a ser fatais (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2015). Apenas em 2019, a RAM esteve associada a 4,95 milhões de mortes em todo o mundo, sendo a causa direta de 1,27 milhão de óbitos — uma carga de mortalidade superior à do HIV e da malária, afetando desproporcionalmente países de baixa e média renda (ANTIMICROBIAL RESISTANCE COLLABORATORS, 2022). Esse cenário crítico é agravado pela estagnação no desenvolvimento de novos fármacos, resultando em um portfólio clínico insuficiente e com pouca inovação para combater os patógenos prioritários (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2024).

Com isso, a eliminação e descontaminação de águas e efluentes torna-se imperativa. Os métodos convencionais de tratamento de águas residuais frequentemente apresentam dificuldades operacionais para degradar compostos sintéticos complexos e estáveis (KASEMODEL et al., 2024). Tecnologias alternativas, como a adsorção, têm recebido grande destaque por sua eficácia, simplicidade de projeto, caráter ecologicamente amigável e baixo custo (MAJD et al., 2022; XIE et al., 2024).

Nessa perspectiva de tratamento, a escolha do material sorvente é crucial. Os argilominerais têm despontado como alternativas altamente vantajosas por serem abundantes na natureza, renováveis e econômicos (XIE et al., 2024). A bentonita, composta predominantemente por montmorilonita (um argilomineral de estrutura lamelar 2:1), destaca-se por sua grande área superficial específica, porosidade, alta capacidade de troca catiônica e presença de grupos funcionais (como hidroxilas) que promovem forte atração eletrostática e troca iônica (PANDEY, 2017; XIE et al., 2024). Modificações químicas e o uso de compostos à base de bentonita vêm demonstrando capacidades excepcionais e versáteis de remoção para uma ampla variedade de contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes em águas residuais (PANDEY, 2017).

Embora a bentonita já tenha sido aplicada com sucesso na sorção de diversos poluentes e corantes sintéticos (KASEMODEL et al., 2024; PANDEY, 2017), não foram encontrados estudos específicos sobre a sua aplicação para a remoção da nitrofurantoína. Portanto, este projeto justifica-se pela necessidade de avaliar a capacidade de adsorção deste poluente emergente no argilomineral bentonita, visando contribuir para o entendimento do processo sortivo e para a proposição de materiais alternativos e sustentáveis para o tratamento de efluentes.

Materiais e Métodos

Adsorvente

A bentonita (BB) utilizada neste estudo foi fornecida pela mineradora Sociedade Extrativista Santa Fé, localizada em Tremembé, São Paulo. O material, de nome comercial Aporofo ALL 75-80 (lote 768-3), é uma argila natural do grupo das esmectitas (ilita-montmorilonita), de natureza calcária e sem tratamento químico prévio. O material foi utilizado em sua forma natural para avaliar seu potencial como adsorvente de baixo custo.

Adsorvato

A solução de nitrofurantoína (NIT) foi preparada a partir do antibiótico comercializado pela Teuto Farmacêutica em cápsulas de 100 mg. As cápsulas foram dissolvidas em água deionizada e a concentração foi monitorada via espectrofotometria UV-Vis (K37-UV VIS, KASVI) no comprimento de onda de 375 nm, correspondente ao pico máximo de absorção do antibiótico. Para determinação da concentração de NIT na solução aquosa, foi realizada uma curva de calibração relacionando a absorbância e a concentração teórica para quantificação analítica. Foram feitas 11 diluições sucessivas das concentrações da NIT em duplicata para garantir precisão no método e foi analisado por espectrofotometria UV-Vis e desenvolvido o gráfico e determinação da equação da reta.

Caracterização físico-química do adsorvente

As medidas de pH e Eh foram determinadas em suspensão (proporção 1:2,5) após agitação e repouso, utilizando eletrodos de vidro e Ag/AgCl (Embrapa, 2017). Condutividade Elétrica (CE) foi determinada em solução (1:1) com célula condutiva (IAC, 2009). A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Superfície Específica (SE) foram determinadas pelo método de adsorção de azul de metileno (Arab, et al, 2015).
Todos os ensaios foram realizados em triplicata para garantir a precisão dos valores médios e desvios padrões.

Estudos de sorção em lote

Os experimentos foram conduzidos em modo batelada sob agitação constante em um período de 24 horas para garantir o equilíbrio termodinâmico. As condições analisadas tiveram variação de massa e de concentração onde foram de 0,250g à 2g, para variação de massa, e de 190mg/L à 19mg/L, para variação de concentração de antibiótico.
Os materiais foram dispostos em tubo Falcon e feitos em duplicata. Dadas as 24 horas as amostras foram submetidas à centrifugação para separação dos sólidos para posterior leitura por espectrofotometria.
Com os resultados foram desenvolvidos os cálculos pelo software Excel para calcular a eficiência da adsorção e desenvolvidos gráficos apresentando o comportamento geral da relação adsorvato/adsorvente.

Resultados e Discussão

Curva de calibração da NIT

A curva de calibração da NIT é apresentada na Figura 1. A diluição foi realizada com concentrações sempre inferiores a 200 mg/L devido ao fator de solubilidade do antibiótico. A partir da correlação dos dados de absorbância com os dados de concentração, obteve-se uma curva com ajuste linear e R^2 igual a 0,9983 e o valor que representa a concentração a partir da absorbância é apresentada na equação abaixo:

$$C = 129{,}56 \times ABS + -5{,}603 \qquad (1)$$

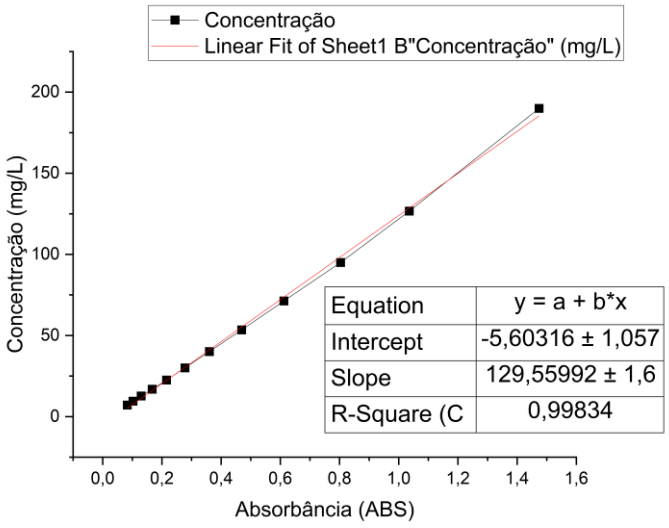


Figura 1: Curva de calibração da NIT. Fonte: autores (2026)

Caracterização da bentonita

Os resultados da caracterização físico-química da amostra de bentonita obtida em Tremembé são apresentados na Tabela 1.

Parâmetro	Valor Médio ± Desvio Padrão
pH em H_2O	7,81 ± 0,00
pH em KCl	7,12 ± 0,01
Delta pH (pH(KCl) - pH(H_2O))	-0,69 ± 0,01
Potencial Redox (Eh)	-44,2 ± 3,47 mV
Condutividade Elétrica (CE)	1654 ± 262 µS cm^{-1}

Tabela 1: Caracterização físico-química Bentonita. Fonte: autores (2026)

A bentonita apresentou um pH ligeiramente básico (H_2O), o que está de acordo com os valores relatados em estudos anteriores, com um pH médio de 7,9 ± 0 (n = 3). Os valores de ΔpH fornecem informações sobre as características de carga superficial do material. Observou-se um valor de ΔpH de −0,7, indicando que a superfície da bentonita possui uma carga negativa líquida, o que favorece a retenção de espécies catiônicas.

As medições do potencial redox (Eh), quando interpretadas juntamente com os valores de pH, são comumente usadas para avaliar as condições ambientais, uma vez que muitas reações do solo e dos minerais envolvem processos de transferência de elétrons. O valor de Eh medido de −44,2 mV ± 3,46 indica condições ligeiramente redutoras no sistema. Tais condições podem influenciar a estabilidade e o comportamento das fases de óxido, o que pode contribuir para a adsorção de íons metálicos e outras espécies carregadas.

A capacidade de troca catiônica (CTC) da bentonita foi de 50,56 cmolc kg^{-1} ± 2,93, classificada como alta de acordo com a classificação proposta por Catani e Jacinto (1974). Uma CTC alta indica uma forte capacidade do mineral argiloso de trocar cátions com a solução circundante, uma propriedade particularmente relevante para processos de adsorção envolvendo corantes catiônicos.

A área superficial específica (SE) determinada para a amostra foi de 395,85 m^2 g^{-1}. Essa área superficial relativamente grande sugere a presença de numerosos sítios de adsorção potenciais, o que pode aumentar a capacidade de adsorção do material.

A condutividade elétrica (CE) da suspensão de bentonita apresentou uma média de 1654 µS cm^{-1}, indicando a presença de íons dissolvidos no sistema. A condutividade elétrica reflete a força iônica da solução e pode servir como um indicador de mudanças na composição química, como a liberação ou adsorção de espécies iônicas.

Ensaio em Batelada NIT

A Figura (2) apresenta os resultados obtidos através do procedimento em batelada para obter a eficiência de remoção da NIT do meio aquoso, onde o gráfico à esquerda representa as variações de massa de concentração de NIT e o à direita representa as variações de massa de BB em cada ensaio.

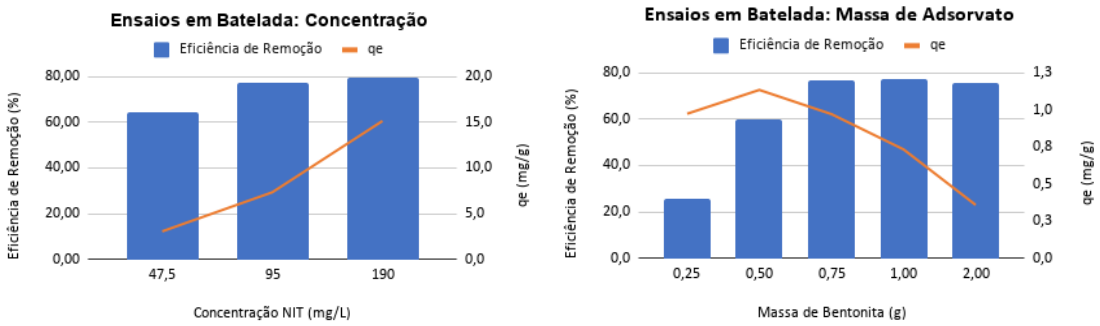


Figura 2 – Gráficos dos Resultados do Ensaio em Batelada da NIT. Fonte: autores (2026)

Considerações Finais

A caracterização físico-química da bentonita cálcica natural demonstrou propriedades estruturais promissoras para processos adsortivos, como uma elevada área superficial e alta capacidade de troca catiônica. Os resultados dos testes de equilíbrio apontaram maior eficiência conforme aumento da massa de bentonita aplicada, o que é explicado pelo aumento da disponibilidade de sítios adsortivos no meio de reação, nas variações de concentração de NIT nota-se que há um ponto de capacidade máxima de adsorção, já que mesmo quando a solução contém o dobro de concentração a eficiência é similar.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa Unificado de Bolsas (PUB) e toda instituição da Universidade de São Paulo pelas oportunidades de aprender sobre o mundo acadêmico. Agradeço a minha orientadora, que está como coautora deste artigo, por todos os ensinamentos. Agradeço a minha família que sempre me apoia e se faz presente, mesmo aqueles que estão mais longe, e um agradecimento especial à minha namorada, que sempre me incentivou a buscar aquilo que me faz bem.

Referências Bibliográficas

ANTIMICROBIAL RESISTANCE COLLABORATORS. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. The Lancet, v. 399, n. 10325, p. 629–655, fev. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0

ARAB, P. B.; ARAÚJO, T. P.; PEJON, O. J. Identification of clay minerals in mixtures subjected to differential thermal and thermogravimetry analyses and methylene blue adsorption tests. Applied Clay Science, v. 114, p. 133-140, set. 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. Relação Nacional de Medicamentos Essenciais: Rename 2024. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2024

CATANI, R. A.; JACINTO, A. O. Análise química para avaliar a fertilidade do solo. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, 1974. (Boletim Técnico, 37).

EL AZZOUZI, L., EL AGGADI, S., ENNOUHI, M., ENNOUARI, A., KABBAJ, O. K., & ZRINEH, A. (2022a). Removal of the Amoxicillin antibiotic from aqueous matrices by means of an adsorption process using Kaolinite clay. Scientific African, 18, e01390. https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2022.E01390

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

HACIOSMANOĞLU, G. G., MEJÍAS, C., MARTÍN, J., SANTOS, J. L., APARICIO, I., & ALONSO, E. (2022). Antibiotic adsorption by natural and modified clay minerals as designer adsorbents for wastewater treatment: A comprehensive review. Journal of Environmental Management, 317, 115397. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115397

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: IAC, 2009. 77 p. (Boletim Técnico, 106).

KASEMODEL, M. C.; DE AGUIAR, L. G.; RODRIGUES, V. G. S.; ROMÃO, É. L. The Investigation of the Adsorption of Methylene Blue from Water by Torrefied Biomass. Colorants, v. 4, 21, jun. 2025 (a). https://doi.org/10.3390/colorants4020021

KASEMODEL, M. C.; RODRIGUES, V. G. S.; FARAH SILVA, J. M. R.; VALLIM, B. S. C.; ROMÃO, É. L. Investigation of Methylene Blue Removal from Aqueous Solutions Using Biochar Derived from Mango and Pitanga Pruning Waste. Colorants, v. 4, 28, sep. 2025 (b). https://doi.org/10.3390/colorants4030028

KASEMODEL, M. K.; ROMÃO, E. L.; PAPA, T. B. R. Adsorption of methylene blue on babassu coconut (Orbignya speciosa) mesocarp commercial biochar. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 21, n. 2, p. 1671–1682, jan. 2024. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05066-6

MARTINS, R. S. A.; SILVA, M. R. M.; LOURENÇO, M. A. S.; KASEMODEL, M. C. Evaluation of the adsorption potential of iron mining tailing and its effect on *Raphanus sativus* germination. Engenharia Sanitária e Ambiental, 29, jun. 2024.

https://doi.org/10.1590/S1413-415220230150

MESSAOUDI, M.; DOUMA, M; TIJANI, N.; DEHMANI, Y.; MESSAOUDI, L. Adsorption process of the malachite green onto clay: kinetic and thermodynamic studies. Desalination and Water Treatment, v. 240, p. 191–202, nov. 2021.

MOZAFFARI MAJD, M.; KORDZADEB-KERMANI, V.; GHALANDARI, V.; ASKARI, A.; SILLANPÄÄ, M. Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010−2020). Science of The Total Environment, v. 812, p. 151334, mar. 2022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151334

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Global action plan on antimicrobial resistance. Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2015

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. WHO Bacterial Priority Pathogens List, 2024: bacterial pathogens of public health importance to guide research, development and strategies to prevent and control antimicrobial resistance. Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2024

ÖZACAR, M.; ŞENGIL, İ. Ayhan. Adsorption of reactive dyes on calcined alunite from aqueous solutions. Journal of Hazardous Materials, v. 98, n. 1–3, p. 211–224, mar. 2003. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00358-8

PANDEY, Sadanand. A comprehensive review on recent developments in bentonite-based materials used as adsorbents for wastewater treatment. Journal of Molecular Liquids, v. 241, p. 1091–1113, set. 2017. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.06.115

TZABAR, N.; TER BRAKE, H. J. M. Adsorption isotherms and Sips models of nitrogen, methane, ethane, and propane on commercial activated carbons and polyvinylidene chloride. Adsorption, v. 22, n. 7, p. 901–914, out. 2016. https://doi.org/10.1007/s10450-016-9794-9

ULLAH, S.; RAHMAN, A. U.; ULLAH, F.; RASHID, A.; ARSHAD, T.; Viglašová, E.; Galamboš, M.; MAHMOODI, N. M.; ULLAH, H. Adsorption of Malachite Green Dye onto Mesoporous Natural Inorganic Clays: Their Equilibrium Isotherm and Kinetics Studies. Water, v. 13, n. 7, p. 965, 31 mar. 2021. https://doi.org/10.3390/w13070965

WU, D.; BAI, H.; HE, L. Y.; HE, L. X.; GAO, F. Z.; LIU, C. X.; VAN DEN BRINK, P. J.; SMIDT, H.; YING, G. G. From river to groundwater: Antibiotics pollution, resistance prevalence, and source tracking. Environment International, v. 196, 109305, jan. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109305

XIE, S.; HUANG, L.: CHAGQING, S.; YAN, J.; CHEN, Z.; LI, M.; DU, M.; ZHANG, H. Application of clay minerals as adsorbents for removing heavy metals from the environment. Green and Smart Mining Engineering, v. 1, n. 3, p. 249–261, sep. 2024. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.07.002.

VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE ARAMES NA PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

1 Ângela de Mello Ferreira; 2 Luzia Sergina de França Neta; 3 Michele de Oliveira Pimenta
[123] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos e Produtos; E-mails: angelamelo44@gmail.com; luziasergina@gmail.com; michele.18oliveirap@gmail.com

Palavras-chave: pelotização; lodo de ETEI; minério de ferro

Resumo

A indústria de arames é responsável pela geração de efluentes contendo ácidos e íons metálicos provenientes do processo de decapagem ácida, cujo tratamento é realizado em Estações de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI). Este tratamento resulta na formação de lodo constituído predominantemente por hidróxidos metálicos, compostos de cálcio e resíduos de polímeros floculantes. Esse resíduo é, em geral, destinado a aterros industriais, o que implica custos operacionais elevados e potenciais impactos ambientais. Paralelamente, o processo de pelotização de minério de ferro utiliza aglomerantes convencionais, como a bentonita, com a finalidade de conferir resistência mecânica às pelotas, tornando relevante a busca por materiais alternativos capazes de reduzir custos e impactos ambientais associados ao processo. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar a caracterização química do lodo gerado por uma indústria de arames e avaliar a viabilidade da sua utilização como aglomerante alternativo no processo de pelotização de finos de minério de ferro. Neste trabalho foi realizada a caracterização química e mineralógica de amostras do lodo por meio das técnicas de fluorescência de raios X, difração de raios X e análise de carbono total. Os resultados indicaram a presença predominante de compostos de cálcio, ferro e enxofre, além de fase mineralógica associada à gipsita e frações carbonosas relacionadas a polímeros residuais. Posteriormente, foram produzidas pelotas do fino de minério de ferro contendo a proporção de 1% de lodo e outra com 1% de bentonita, utilizada como material de referência. Os resultados obtidos indicaram viabilidade quanto a aplicação do lodo como aglomerante alternativo no processo de pelotização, com formação adequada de pelotas esféricas com boa resistência mecânica e estabilidade operacional durante o processo. Espera-se que o reaproveitamento desse material contribua para redução da sua disposição em aterros industriais, ao mesmo tempo em que agrega valor ao resíduo e promove a sustentabilidade industrial, em consonância com os princípios da economia circular.

Introdução

A crescente preocupação com a preservação ambiental e com a gestão adequada dos resíduos industriais tem se consolidado como uma demanda estratégica nos mais diversos setores produtivos. A disposição inadequada desses resíduos pode provocar impactos significativos ao meio ambiente, incluindo contaminação do solo, da atmosfera e dos recursos hídricos, além de representar perdas econômicas associadas ao descarte de materiais com potencial de reaproveitamento (Ahamad et al., 2024). Nesse contexto, diversos estudos têm sido desenvolvidos com foco na valorização de resíduos e na produção de novos materiais a partir de subprodutos industriais, buscando conciliar desenvolvimento econômico, eficiência produtiva e sustentabilidade ambiental (Muraina et al., 2025).

Nesse cenário, destaca-se o conceito de economia circular, modelo que propõe a manutenção dos materiais em uso pelo maior tempo possível, por meio de estratégias como reutilização, reciclagem, recuperação e reinserção em cadeias produtivas. Diferentemente do modelo linear tradicional de extrair, produzir e descartar, a economia circular busca reduzir a geração de resíduos e otimizar o aproveitamento de recursos ao longo do ciclo de vida dos produtos (Abdala et al., 2018). Para Bernardin e Velho (2011), organizações que buscam ampliar a competitividade e a sustentabilidade têm investido em inovação, pesquisa aplicada e alternativas capazes de reduzir custos com matérias-primas e aumentar a eficiência operacional.

Entre os setores industriais de elevada relevância econômica, a mineração se destaca pela expressiva contribuição ao desenvolvimento nacional. Entretanto, suas atividades também são amplamente demandadas quanto à adoção de práticas ambientalmente responsáveis e ao uso racional de recursos naturais. Nesse contexto, o processo de pelotização de minério de ferro assume papel estratégico, uma vez que consiste na aglomeração de partículas finas de minério, transformando-as em pelotas com características adequadas para utilização em fornos de redução e produção de aço (Monhol et al., 2014). Para garantir desempenho físico e mecânico satisfatório, esse processo requer a adição de aglomerantes, sendo a bentonita um dos materiais mais utilizados industrialmente. Esse argilomineral apresenta elevados teores de sílica e alumina e contribui para a resistência das pelotas durante as etapas de manuseio, transporte e processamento térmico (Murray, 2001). Apesar de sua ampla utilização, torna-se relevante investigar materiais alternativos que possam reduzir custos operacionais e impactos ambientais associados ao consumo de insumos convencionais.

Paralelamente, indústrias metalúrgicas voltadas à produção de artefatos de aço, como arames, geram efluentes líquidos em diferentes etapas produtivas, especialmente em operações de lavagem, resfriamento e tratamentos químicos superficiais. Esses efluentes são encaminhados para Estações de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI), nas quais ocorre a remoção de contaminantes dissolvidos, especialmente íons metálicos e compostos ácidos, por meio de processos físico-químicos de

neutralização, coagulação, floculação e separação sólido-líquido (Giordano et al., 2004). Como resultado desse tratamento, forma-se um lodo industrial constituído majoritariamente por precipitados metálicos, compostos de cálcio e materiais particulados removidos da corrente líquida.

Em função das características desses efluentes, o lodo gerado pode apresentar concentrações relevantes de ferro e cálcio, sendo este último geralmente proveniente da utilização de hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, como agente neutralizante para correção de pH. Tal composição sugere potencial de aplicação desse resíduo em processos industriais, especialmente na pelotização de minério de ferro, uma vez que compostos cálcicos podem atuar como agentes aglomerantes e favorecer mecanismos de sinterização. Boyrazli et al. (2015) demonstraram que o hidróxido de cálcio apresenta desempenho satisfatório como aglomerante na produção de pelotas, contribuindo para o aumento da resistência mecânica e para a formação de fases cimentantes durante o tratamento térmico.

Além disso, durante o tratamento de efluentes industriais, é comum a utilização de polímeros floculantes, como a poliacrilamida (PAM), os quais podem permanecer parcialmente incorporados ao lodo gerado. A poliacrilamida consiste em uma macromolécula solúvel em água contendo grupos amida capazes de formar ligações intermoleculares, favorecendo a adesão entre partículas sólidas. Quando empregada como aditivo em sistemas particulados, esse polímero pode atuar como ligante orgânico, aumentando a resistência de pelotas verdes e secas por meio da formação de pontes entre partículas minerais (Kulicke et al., 1982; Zhao et al., 2022).

Apesar desse potencial de reaproveitamento, grande parte do lodo proveniente de ETEI ainda é destinada a aterros industriais, o que implica custos de disposição, ocupação de áreas licenciadas e riscos ambientais associados ao armazenamento prolongado. Nesse sentido, a busca por rotas tecnológicas capazes de reinserir esse resíduo em cadeias produtivas representa importante estratégia de sustentabilidade e aderência aos princípios da economia circular.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a composição do lodo proveniente do tratamento de efluentes de uma indústria produtora de arames e seu potencial de utilização como aditivo aglomerante alternativo no processo de pelotização de minério de ferro, investigando sua contribuição para o aproveitamento de resíduos industriais, redução da disposição em aterros e promoção da sustentabilidade produtiva.

Materiais e Métodos

O estudo foi estruturado em três fases principais: (I) coleta e caracterização das amostras de lodo de uma ETEI de uma indústria de arames; (II) produção das pelotas em escala laboratorial; e (III) caracterização física e mecânica e das pelotas produzidas.

Na primeira fase foram realizadas três campanhas de amostragem do lodo proveniente de uma Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI), com frequência quinzenal, visando garantir a representatividade do material e avaliar possíveis variações de composição. O lodo está representado pela Figura 01:



Figura 01: Amostra de lodo
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O material foi fornecido por uma indústria de fabricação de arames localizada no estado de Minas Gerais. Em cada amostragem foram coletados aproximadamente 7 kg de material, identificados sequencialmente como Lodo 01, Lodo 02 e Lodo 03. O fino de minério de ferro, aqui denominado de *pellet feed,* utilizado no estudo foi fornecido por empresa do setor mineral localizada no estado de Minas Gerais.

A bentonita utilizada como material de referência foi adquirida comercialmente sob a denominação Volclay, sendo empregada como aglomerante convencional para comparação com o lodo avaliado. A caracterização das amostras de lodo foi realizada por meio de análises químicas, mineralógicas e físicas, com o objetivo de avaliar a adequação dos materiais empregados no processo de pelotização. A composição química das amostras de lodo foi determinada utilizando a técnica de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF), no equipamento Panalytical, modelo Axios mAX. As amostras foram previamente preparadas pelo método do pó prensado, sendo os resultados expressos em percentual em massa. Adicionalmente, foi determinada a perda de massa por calcinação (PPC), em forno mufla, a uma temperatura 1050 °C. Para o *pellet feed*, os dados de composição química foram fornecidos pela empresa responsável pelo fornecimento do material.

A caracterização mineralógica das amostras de lodo e do *pellet feed* foi realizada por difração de raios X, utilizando difratômetro Shimadzu, modelo XRD-7000. As análises foram conduzidas com radiação CuKα, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA e varredura na faixa angular de 5° a 80° (2θ). A identificação das fases cristalinas presentes foi realizada por comparação dos difratogramas obtidos com padrões do banco de dados PDF-2, utilizando o software XPowder®.

A distribuição granulométrica do lodo foi determinada por difração a laser, utilizando granulômetro CILAS, modelo 1090. Os dados granulométricos referentes ao *pellet feed* foram obtidos a partir de informações fornecidas pela empresa cedente do material. A determinação do carbono total nas amostras de lodo foi realizada utilizando o método oficial de oxidação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), com os resultados expressos em base percentual mássica

Na segunda fase, os ensaios de pelotização foram realizados no Laboratório de Geotecnologias e Geomateriais do Centro de Produção Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais, localizado em Pedro Leopoldo, Minas Gerais.

As amostras de lodo foram previamente secas em estufa a 60 °C por 24 h, desagregadas em gral e peneiradas em malha de 212 µm conforme representada na Figura 02. A mistura foi homogeneizada em moinho de bolas com capacidade de 2 kg, em bateladas sucessivas, com tempo de moagem de 5 min por ciclo.



Figura 02: Amostra de lodo seca
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A produção das pelotas foi realizada em disco pelotizador com diâmetro de 125 cm e profundidade de 20 cm, operando com uma inclinação de 60° em relação ao plano horizontal e rotação de 20 rpm. Em seguida, as pelotas foram submetidas à secagem em estufa de laboratório (Limatec, modelo LT 502/200) à temperatura de 60 °C, durante 24 horas, visando remover a umidade residual antes da etapa de tratamento térmico.

Após secagem as pelotas foram submetidas à etapa de queima no forno elétrico de sinterização (Grion, série 1767). O ciclo térmico consistiu em aquecimento com taxa de 5 °C/min até a temperatura de 1300 °C, permanência por 20 minutos na temperatura máxima e posterior resfriamento lento até temperatura ambiente.

A terceira fase compreendeu nos ensaios de compreensão para avaliação da resistência mecânica das pelotas, sendo este um dos principais parâmetros utilizados para verificar a qualidade física das pelotas produzidas e a eficiência do lodo como aglomerante alternativo.

O procedimento experimental foi conduzido de acordo com a ABNT NBR ISO 4700:2018 que se refere a pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta, determinação da resistência à compressão. As pelotas previamente queimadas foram resfriadas à temperatura ambiente e submetidas individualmente ao ensaio em máquina universal de ensaios de compressão modelo 5982, marca Instron, equipada com célula de carga compatível a capacidade mínima de 100 kN para transmissão da carga e pratos de compressão planos e paralelos.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em quintuplicada, selecionadas pelotas com diâmetro na faixa granulométrica entre 8,0 mm e 10,0 mm. A resistência à compressão (RC) será expressa como a média aritmética das medidas válidas obtidas, em quilograma-força por pelota (kgf/pelota)

Resultados e Discussões

A caracterização das matérias-primas constitui etapa fundamental para a compreensão do comportamento tecnológico das pelotas produzidas, uma vez que a composição química influencia diretamente parâmetros como formação de compostos, resistência mecânica e porosidade das pelotas. Nesse contexto, foram analisados o *pellet feed*, a bentonita e o lodo proveniente da ETEI, visando avaliar suas contribuições individuais ao sistema.

A composição química do lodo da ETEI foi determinada a partir de análises de FRX e estão apresentadas na Tabela 01.

Composição (%)	Lodo 01	Lodo 02	Lodo 03
CaO	17,64	18,41	20,48
Fe_2O_3	23,75	19,24	21,42
SO_3	21,66	21,80	23,56

Cl	2,17	3,32	2,40
MgO	1,47	0,78	0,34
SiO_2	0,83	0,79	0,68
Al_2O_3	0,19	0,17	0,17
Outros	2,31	1,88	2,25
PPC*	29,98	33,60	28,70

*Determinação de Perda Por Calcinação (PPC)

Tabela 01: Resultados FRX das amostras de lodo
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As amostras apresentaram composições químicas com pequenas variações entre si. Os teores de óxido de ferro variaram entre 19,2% e 23,7%, enquanto os teores de óxido de cálcio situaram-se na faixa de 17,6% a 20,4%. A presença do óxido de cálcio (CaO) está associada ao uso da cal no processo de neutralização do efluente, enquanto o ferro presente no lodo decorre da solubilização dos óxidos metálicos durante a etapa de decapagem ácida dos arames, seguida de sua precipitação após a adição de agentes alcalinos e coagulantes. A presença de trióxido de enxofre (SO_3) e cloro (Cl) estão relacionadas ao uso de soluções ácidas no processo de decapagem, especialmente ácido sulfúrico e ácido clorídrico, cujos íons podem ser incorporados ao lodo durante as etapas de tratamento do efluente. Os demais elementos identificados estão associados à solubilização de espécies metálicas presentes no efluente industrial.

Os resultados de perda por calcinação (PPC) indicam a presença de compostos que sofrem decomposição ou volatilização durante o aquecimento (Ferreira, 2024). Esse comportamento pode estar associado à presença de hidróxidos, carbonatos e frações orgânicas provenientes do tratamento de efluentes. Destaca-se, nesse contexto, a possível contribuição do polímero floculante utilizado na etapa de coagulação/floculação, geralmente à base de poliacrilamida (PAM), cuja degradação térmica durante a calcinação também pode contribuir para a perda de massa observada. Durante a etapa de queima das pelotas, a decomposição térmica desses componentes orgânicos pode favorecer a geração de porosidade na estrutura das pelotas, podendo influenciar propriedades como porosidade e resistência mecânica do produto (Ferreira et. al., 2015). Entretanto, a presença residual desse polímero pode ser particularmente relevante, uma vez que compostos poliméricos são conhecidos por atuar como agentes aglomerantes orgânicos, favorecendo a formação e a coesão das pelotas na etapa de pelotamento (Zhao, H. et al., 2022) em consonância com o objetivo deste trabalho.

No contexto da pelotização, a presença de enxofre é um aspecto relevante, uma vez que teores elevados desse elemento podem impactar a qualidade metalúrgica das pelotas e da qualidade da liga Fe-C obtida, sendo importante avaliar seu comportamento após o tratamento térmico, bem como controlar as proporções de incorporação do resíduo na mistura.

Quanto a caracterização mineralógica das amostras de lodo foi realizada por difração de raios X (DRX). Para melhor visualização dos resultados, a Figura 03 apresenta o difratograma da amostra Lodo 01.

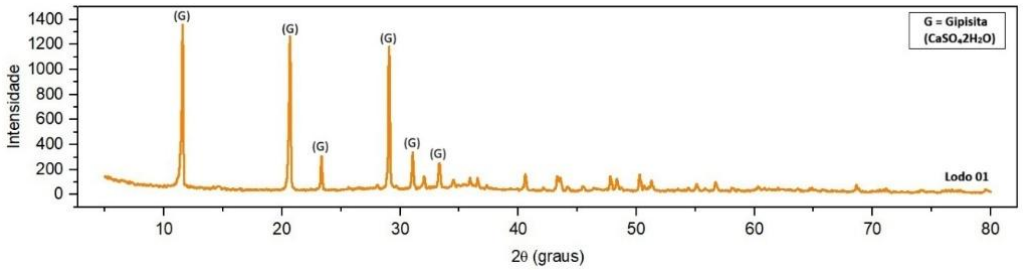


Figura 03: Difratograma amostra de lodo 01
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De modo geral, o difratograma apresentado evidência a presença predominante da fase cristalina Gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), identificada pelos principais picos característicos indicados no gráfico pela letra G pertencente ao sistema cristalino monoclínico e parâmetros de rede característicos a = 10, Å, b = 15,15 Å e c = 6,51 Å, além de ângulo β 151,55°, distinto de 90°, típico desse sistema cristalino. Observa-se que o pico de maior intensidade ocorre na região próxima a $2\theta \approx 11–12°$, característico da gipsita. Outros picos atribuídos à gipsita também podem ser observados em aproximadamente $2\theta \approx 20–21°$ e 29–30°, reforçando a presença da fase mineralógica gipsita.

A presença desse composto pode estar associada aos reagentes utilizados no processo de tratamento de efluentes industriais, especialmente a cal frequentemente empregada em etapas de neutralização e precipitação química. Do ponto de vista da aplicação do lodo como material no processo de pelotização, a presença de compostos contendo cálcio pode influenciar o comportamento do material durante a formação da microestrutura e durante o aquecimento das pelotas. Em elevadas temperaturas, esses compostos podem reagir com sílica e óxidos de ferro, promovendo a formação de fases como silicatos e

ferritas de cálcio, contribuindo para os mecanismos de sinterização durante a etapa de queima (Boyrazli et al., 2015).

Embora a análise de fluorescência de raios X (FRX) tenha indicado a presença significativa de ferro nas amostras de lodo, com valores médios próximos a 20%, não foram identificadas fases cristalinas contendo ferro de forma evidente nos difratogramas obtidos. Esse resultado pode estar associado ao fato de que o ferro presente no material se encontra em formas amorfas ou pouco cristalinas. Esses precipitados apresentam, em geral, baixa cristalinidade ou caráter amorfo, o que dificulta sua detecção por difração de raios X (Yang et al., 2020). As demais amostras, Lodo 02 e Lodo 03, também apresentaram as mesmas reflexões características, indicando a presença da mesma fase mineralógica em todas as amostras.

A análise de carbono total (TOC) das amostras de lodo apresentou pouca variação, com valores entre 16,0% e 17,2%, conforme apresentado na Tabela 02. Essa variação pode estar associada a diferenças nas condições operacionais do sistema de tratamento de efluentes no período de geração do resíduo, especialmente no que se refere à dosagem de reagentes utilizados nas etapas de coagulação e floculação.

TOC %		
Lodo 01	**Lodo 02**	**Lodo 03**
16,9	17,2	16,0

Tabela 02: Resultado TOC das amostras de lodo de ETEI
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Considerando que os efluentes provenientes das etapas de decapagem e lavagem são predominantemente caracterizados por compostos inorgânicos, a presença de carbono nas amostras de lodo pode estar associada principalmente aos reagentes utilizados no tratamento de efluentes, especialmente aos polímeros orgânicos empregados como agentes floculantes, geralmente à base de poliacrilamida (PAM). Esses compostos poliméricos tendem a se adsorver às partículas sólidas durante a formação dos flocos, sendo posteriormente incorporados ao lodo gerado no processo de tratamento.

No contexto da pelotização, a presença desses compostos orgânicos pode influenciar o comportamento do material durante as etapas de pelotamento e queima. Durante a formação das pelotas verdes, polímeros orgânicos podem atuar como agentes aglomerantes auxiliares, contribuindo para a coesão entre as partículas de minério.

O *pellet feed* utilizado nos experimentos, caracteriza-se como um concentrado de ferro proveniente do beneficiamento de minério, separado por método magnético, com predominância de Fe_2O_3 (81,02%), além de MgO (5,76%), SiO_2 (3,32%), CaO (3,30%) e traços de outros metais (3,3%). O elevado teor de ferro indica potencial de aplicação no processo de pelotização, enquanto os teores de CaO, MgO e ZnO refletem a origem do material e a presença de minerais carbonáticos associados ao minério de zinco.

A análise por difração de raios X confirmou a presença de hematita (Fe_2O_3) como fase cristalina predominante, característica desejável para matérias-primas empregadas na produção de pelotas de minério de ferro. Também foram identificadas fases secundárias compatíveis com dolomita [$CaMg(CO_3)_2$], em concordância com os resultados químicos obtidos.

A distribuição granulométrica apresentou valores de D10 = 30 µm, D50 = 70 µm e D90 = 150 µm, evidenciando predominância de partículas finas. Essa característica é favorável ao processo de pelotização, pois amplia a área superficial específica e favorece a atuação do aglomerante, contribuindo para a formação e integridade das pelotas verdes.

As pelotas de minério de ferro com diâmetro médio entre 9 e 12 mm foram obtidas contendo em sua composição 1% de resíduo proveniente do tratamento de efluente. A Figura 04 apresenta as pelotas produzidas com o resíduo proposto como aglomerante, bem como aquelas obtidas com bentonita, utilizada como material de referência.



Figura 04: Pelotas produzidas com 1% de lodo
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As pelotas apresentaram morfologia predominantemente esférica, aspecto homogêneo e com boa integridade estrutural, sem geração excessiva de finos ou ocorrência significativa de quebras, estando em conformidade com a faixa granulométrica entre usual reportada na literatura (Meyer, 1980). Observa-se também que as pelotas obtidas com o aglomerante oriundo do resíduo e as obtidas com bentonita, aglomerante de referência, apresentaram conformação esféricas bem definidas, indicando que o resíduo avaliado apresenta potencial para atuar como aglomerante no processo de pelotização.

A tabela 03 apresenta os valores individuais e médias da resistência à compressão das pelotas produzidas com as proporções de bentonita e lodo.

Amostras	Misturas – kgf/pelota	
	1% Bentonita	1% Lodo
Amostra 01	264,21	293,85
Amostra 02	230,59	173,52
Amostra 03	218,53	198,26
Amostra 04	193,12	166,56
Amostra 05	196,00	228,18
Média	220,49	212,07

Tabela 03: Resultado teste de compressão
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Observa-se que as pelotas produzidas com 1% de bentonita apresentaram a maior resistência média à compressão, atingindo valores em torno de 220,49 kgf/pelota, comportamento coerente com o desempenho esperado para o aglomerante convencional amplamente utilizado na pelotização. As pelotas contendo 1% de lodo apresentaram resistência média em torno de 212,07 kgf/pelota, valor próximo ao obtido para a bentonita. De acordo com Meyer (1980), pelotas destinadas a aplicações siderúrgicas devem apresentar resistência à compressão superior a aproximadamente 200 kgf/pelota, a fim de garantir sua integridade durante as etapas de transporte, manuseio e carregamento.

Comentários finais

Os resultados obtidos indicam que o lodo proveniente do tratamento de efluentes da indústria de arames apresenta potencial de aplicação como aglomerante alternativo no processo de pelotização de minério de ferro.

A caracterização do material evidenciou que a presença de compostos que podem contribuir para a coesão das partículas, e os ensaios mecânicos demonstraram que a adição de 1% de lodo resultou em pelotas com resistência à compressão em torno de 212,07 kgf/pelota, valor próximo ao obtido com o aglomerante convencional.

Dessa forma, o uso do lodo em baixa proporção mostra-se promissor do ponto de vista técnico, podendo contribuir para a valorização de resíduos industriais. Como perspectivas futuras, destacam-se a realização de ensaios mecânicos complementares e análises microestruturais para melhor compreensão do comportamento das pelotas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), por meio do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos e Produtos, pelo suporte acadêmico e científico ao desenvolvimento deste trabalho. Agradecem também à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pela parceria estabelecida, especialmente pela disponibilização do Laboratório de Geomateriais, fundamental para a realização das análises experimentais. Por fim, expressam gratidão à indústria parceira pela disponibilização do resíduo utilizado no estudo, contribuindo de forma significativa para a execução e viabilidade da pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABDALLA, F. A.; SAMPAIO, A. C. F. Os novos princípios e conceitos inovadores da Economia Circular. Entorno Geográfico, Uberlândia, p. 1-21, jun. 2018. DOI: https://doi.org/10.25100/eg.v0i15.6712.

AHAMAD, Hafez; et. al. Current environmental management practices in major manufacturing industries of Chattogram, Bangladesh. Environment, Development and Sustainability, [s.l.], 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-024-05697-w.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 4700:2018 – Pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta — Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2018

BOYRAZLI, Mustafa; et al. The effect of some binders and their combinations on the porosities and strengths of the pellets produced from magnetite concentrates. International Journal of Scientific and Technological Research, v. 1, n. 3, 2015

FERREIRA, Isadora. Estudo da utilização dos insumos no processo de pelotização do minério de ferro. 2024. Dissertação (Mestrado) – Repositório Institucional do CEFET MG, 2024.

GIORDANO, Gandhi et al. Tratamento e controle de efluentes industriais. Revista ABES, v. 4, n. 76, p. 1-84, 2004

IDRISSI, M. et al. Characterisation of iron inclusion during the formation of calcium sulfoaluminate phase. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 8, p. 1314-1319, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.009

KULICKE, W. M.; et. al. Preparation, characterization, solution pro-perties and rheological behaviour of polyacrylamide. Progress in polymer science, v. 8, n. 4, p. 373-468, 1982. https://doi.org/10.1016/0079-6700(82)90004-1

MEYER, Kurt. Pelletizing of Iron Ores. Berlin: Springer-Verlag, 1980.

MONHOL,Felipe; MARTINS, Marcio. Combustíveis alternativos obtidos a partir de resíduos para utilização em fornos de pelotização de minério de ferro*. 69° Congresso Anual da ABM - Inter-nacional, [s.l.], 2014. DOI:10.5151/1516-392X-24795

MURAINA, Sodiq A.; et. al. Advanced recycling and reuse of metallurgical wastes for sustainable materials processing. International Journal of African Research and Sustainability Studies, v. 9, n. 2, set. 2025. DOI: https://doi.org/10.70382/caijarss.v9i2.043

MURRAY, H. H. Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays. Applied Clay Science, v. 21, n. 1–2, p. 1–7, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00102-0

VELHOA, Pedro L. T.; et al. Reuse of sludge treatment plant effluent for industrial production of engobes. Cerâmica Industrial, v. 16, n. 2, p. 45 52, mar./abr. 2011.

YANG, Xigang et al. A Novel, Amorphous, Non-equiatomic Fe3Cr2Al2CuNi4Si5 High-Entropy Alloy with Exceptional Corrosion Resistance and Mechanical Properties: X. Yang et al. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), v. 33, n. 8, p. 1057-1063, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s40195-019-00977-1

ZHAO, Hongxing; et. al.; LONG, Wenjun. Bonding Mechanism and Process Characteristics of Special Polymers Applied in Pelletizing Binders. Coatings, v. 12, n. 11, p. 1618, 2022. DOI: 10.3390/coatings12111618.

BIOFILIA E BIOMIMÉTICA: REVISÃO E AVALIAÇÃO DOS CONCEITOS PARA EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS E EFICIENTES

1 Maria Clara Mattos do Nascimento, 2 Richieri Antônio Sartori
1 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), e-mail: mariaclaramnascimento@gmail.com; 2 PUC-Rio, orientador, e-mail: richierisartori@puc-rio.br

Palavras-chave: biofilia; biomimética; edificações sustentáveis.

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão e avaliação dos conceitos de biofilia e biomimética aplicados à prática de edificações sustentáveis e eficientes. Parte-se do entendimento de que a construção civil interfere diretamente no consumo de recursos naturais, na geração de resíduos e na qualidade ambiental dos espaços ocupados. A pesquisa combina levantamento bibliográfico e análise de conteúdo sobre sustentabilidade, mudanças climáticas, relação homem-natureza, estratégias projetuais inspiradas na natureza e sistemas de certificação ambiental. São discutidos os fundamentos da biofilia, associados ao bem-estar humano e à reinserção de elementos naturais no ambiente construído, e da biomimética, voltada à aprendizagem com princípios, processos e formas da natureza para solucionar problemas de projeto. Também são observados instrumentos de avaliação e certificação, como ABNT NBR ISO 14001, PBE Edifica, AQUA-HQE e LEED. Os resultados indicam que biofilia e biomimética são abordagens complementares: a primeira contribui para conforto, saúde, percepção ambiental e conexão afetiva com a natureza; a segunda amplia possibilidades técnicas para eficiência energética, uso racional de materiais e inovação construtiva. Conclui-se que a integração dessas estratégias pode fortalecer o desempenho ambiental das edificações e aproximar critérios técnicos de sustentabilidade da experiência cotidiana dos usuários.

Introdução

No filme The Matrix (1999), o agente Smith deixa claro para Morfeu que a forma de vida dos seres humanos degrada o planeta, é insustentável e ineficiente, fazendo um paralelo entre humanos e vírus, que agem de forma destrutiva sem considerar o ecossistema. A escolha para começar esse artigo com um exemplo de filme busca chamar a atenção para um assunto de relevância real: a relação homem-natureza.

O filme Matrix foi lançado dois anos após o livro *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* de Janine M. Benyus que difundiu a ideia de biomimética, uma disciplina que se inspira na natureza para criar soluções sustentáveis para diversas áreas. Nesse livro, a natureza foi introduzida como mentora e modelo para criar novos designs e processos e de como solucionar problemas de forma sustentável através da observação da vida natural do planeta.

Anterior ao conceito da biomimética, a ideia da biofilia já havia sido discutida por Edward Osborne Wilson no livro *Biophilia*: *The human bond with other species*, em 1984. Nesse primeiro livro, o autor apresenta a biofilia como "a tendência inata de se concentrar na vida e nos processos semelhantes à vida" (Wilson, 1984, p.1, tradução nossa). O conceito foi mais bem debatido no livro *The Biophilia Hypothesis* (Kellert, Wilson, 1993) que traz opiniões que vão ao encontro das ideias do filme Matrix e inicia discussões sobre uso dos recursos naturais e pensamentos de como viver a vida de forma eficiente.

As duas ideias – biofilia e biomimética – trazem a importância da ligação homem-natureza em um convívio sustentável e eficiente. No entanto, é necessário que o ser humano compreenda que ele é parte integrante da natureza. Como salienta Benyus (1997, p.8), "nós somos apenas uma espécie dentre muitas que habitam este planeta e não estamos isentos à seleção natural". Ela considera que os seres que sobrevivem são aqueles que não consomem todo o capital ecológico, enfatizando a ideia da necessidade de vivermos em harmonia com os demais ecossistemas existentes ao nosso redor.

A harmonia homem-natureza precisa ser também observada nas construções civis, que muito impactam no ambiente e na natureza, e para tanto se faz necessário abordar estratégias que minimizam o impacto no ecossistema durante e após a implantação das edificações. Essa relevância é relatada por Campos *et al.* (2014, p.104) que afirmam que o setor de construção civil é um dos que mais consomem recursos naturais, estimando que 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto de atividades humanas sejam provenientes da construção. Diante do contexto atual, o interesse por métodos baseados na observação da vida natural com o embasamento para inovações sustentáveis e a integração eficiente entre homem e natureza torna-se uma possível alternativa para práticas de edificações sustentáveis e eficazes.

Sendo assim, o presente estudo visa analisar as informações desses dois conceitos - biofilia e biomimética, bem como utilizar projetos e exemplos em conformidade com recomendações, parâmetros e pré-requisitos prescritos pelos órgãos de certificação de empreendimentos da construção civil sustentáveis, para avaliação das práticas existentes dessas duas ideias como possíveis modelos a serem seguidos no âmbito de edificações sustentáveis e eficientes.

Por meio dos conceitos de biofilia e biomimética e da apresentação de exemplos existentes de edificações sustentáveis, esse estudo tem como objetivo geral uma análise da mitigação dos efeitos climáticos e econômicos de construções que receberam certificação ambiental.

Para tanto, algumas metas foram traçadas, que se referem aos seguintes objetivos específicos:

a) Levantamento dos conceitos de biofilia e biomimética, através de reflexões teóricas sobre a ligação desses métodos com as práticas de execução de edificações eficientes e sustentáveis;

b) Discussão das principais diferenças entre os dois métodos citados;
c) Observação dos critérios, práticas obrigatórias e pré-requisitos que levam a uma edificação ser certificada como eficientes e sustentáveis, de acordo com os órgãos existentes para tal finalidade, sendo considerado nesse estudo o PBE Edifica, o LEED, o AGUA-HQE e a normativa ABNT NBR IS0 14001;
d) Análise de edificações certificadas, por meio de estudo de caso, no que se refere ao uso dos métodos de biomimética e biofilia, aos impactos no ecossistema dessas construções conscientes e ao uso eficiente de recursos naturais.

Método da pesquisa

Essa pesquisa utilizou o método de levantamento bibliográfico, a partir de produções literárias e acadêmicas, que apresentavam teorias e práticas relevantes à qualidade de vida dos seres humanos, bem como suas utilizações para desenvolvimento de edificações sustentáveis e eficientes. No caso de teorias e/ou práticas que não supriram as duas demandas do estudo, foram utilizados estudos de áreas correlatas para suprir as lacunas existentes sobre o assunto abordado nesta dissertação.

Conforme Fonseca (2002), os instrumentos que são utilizados na realização da pesquisa bibliográfica são livros, artigos científicos, teses dissertações, dentre outros tipos de fontes escritas publicadas, o que permite o pesquisador colher conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta.

Somada à pesquisa bibliográfica foi realizado uma pesquisa de campo, dentre de construções certificadas, com a finalidade de analisar os resultados práticos de projetos sustentáveis. Essas construções foram selecionadas a partir da observação dos critérios considerados para a construção ou manutenção de edificações sustentáveis, essas certificadas por algum dos órgãos citados de certificação ou normatização.

A análise de conteúdo foi desenvolvida a partir de:

a) Uma normativa (ABNT NBR ISO 14001): A normativa escolhida está diretamente relacionada à prática da biomimética e serviu como calibre para a avaliação das teorias e práticas de biofilia e biomimética abordadas neste trabalho.
b) Duas certificações brasileiras (PBE Edifica, AGUA-HQE e LEED): As certificações selecionadas são relacionadas a edificações eficientes e sustentáveis e serviram para finalizar analisar as construções certificadas apresentadas nessa pesquisa, por meio da observação das técnicas escolhidas – biofilia e biomimética - e sua real potência para desenvolver edificações sustentáveis e eficientes, mantendo a qualidade de vida do ser humano e estreitando a ligação homem-natureza.

Os documentos analisados levaram em consideração os critérios de energia, água, materiais, resíduos, conforto ambiental, qualidade interna, gestão do empreendimento e relação com o entorno. Em seguida, esses critérios foram avaliados com as possibilidades de contribuição da biofilia e da biomimética, buscando identificar pontos de conexão entre os projetos e instrumentos formais de avaliação.

Também foram considerados exemplos de edificações certificadas ou reconhecidas por soluções sustentáveis, com atenção aos elementos biofílicos e biomiméticos presentes nos projetos. A análise comparou a finalidade das soluções, os benefícios esperados e sua relação com conforto ambiental, eficiência energética e redução de impactos. Como o objetivo é a revisão e avaliação conceitual, os exemplos foram utilizados de modo ilustrativo, sem a pretensão de auditoria técnica individual de cada obra.

Fundamentos da biofilia aplicados ao design e à arquitetura

A relação entre biofilia e arquitetura reflete uma das inovações necessárias do design contemporâneo. A premissa de que “somos humanos em grande parte pela maneira como nos afiliamos a outros organismos” (Wilson, 1984, p.1), estendida por Kellert (2005), que defende que o design biofílico deve ser parte essencial da arquitetura para promover ambientes que representem as necessidades psicológicas e biológicas dos seres humanos, traduz a importância de estratégias fundamentadas na sustentabilidade de todos os recursos naturais. Quando aplicada em construções, essa conexão pode gerar impactos positivos e significativos para a saúde, produtividade e bem-estar dos usuários dos espaços.

Browning et al. (2014) descrevem os princípios biofílicos em 14 padrões práticos, separados em três categorias, sendo:

a) Experiência direta com a natureza: luz natural, qualidade do ar e ventilação natural, presença de água, elementos vegetais e vida animal, conexão com sistemas naturais;
b) Experiência indireta com a natureza: imagens e representações da natureza, materiais naturais, cores naturais, formas e padrões biomórficos, complexidade e ordem;
c) Condições espaciais e psicológicas: perspectiva, refúgio, mistério, risco controlado.

Nunes (2022, p.5) apresenta alguns pré-requisitos para a prática efetiva do design biofílico, sendo eles:

a) Promover o envolvimento repetitivo e sustentado com a natureza;
b) Adaptar a vida humana ao meio natural, para aumentar a saúde, condicionamento e bem estar;
c) Encorajar um apego emocional à ambientes e lugares especiais;
d) Promover interações positivas entre pessoas e natureza, que incentiva um senso expandido de relacionamento e responsabilidade pela comunidade humana e natural;
e) Incentivar o fortalecimento mútuo, a interconexão e soluções de arquitetura de forma integrada.

Ulrich (1984) afirma que a presença de elementos naturais nos ambientes construídos proporciona vários benefícios e, em seu estudo, apresenta um caso de pacientes hospitalizados com vista para a natureza, que se recuperaram mais rapidamente

e com menos medicamentos, do que aqueles pacientes sem vista. Kaplan e Kaplan (1989) reafirmam que fadiga mental é reduzida nos contatos com ambientes naturais, demonstrando que o design biofílico não é somente estético, mas sim funcional. Kellert (2005) também indaga sobre sustentabilidade do design funcional, que visa à eficiência energética, o uso racional dos recursos, o estímulo de conexões emocionais regenerativas, promovidos pela biofilia.

Obras arquitetônicas com aplicação da biofilia

O design biofílico está diretamente relacionado às práticas de arquitetura sustentável, pois ambos visam reduzir os impactos ambientais da construção civil, propondo eficiência no uso dos recursos naturais. Sustentabilidade e biofilia se complementam ao procurar não apenas construções eficientes, mas edifícios regeneradores emocionalmente para seus usuários. Dois projetos (internacional e brasileiro) foram selecionados como exemplos considerados emblemáticos visto que possuem a certificação mais difundida mundialmente, o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design):

1) Jewel Changi Airport (Singapura, Ásia): Desenvolvido em 2019, pelo arquiteto Moshe Safdie, o complexo é um exemplo de design biofílico em espaços públicos, tendo como destaque uma floresta interna com mais de 2.000 árvores e a maior cachoeira indoor do mundo, integradas a um shopping e a um ponto central de distribuição de mercadorias. A floresta interna que oferece uma experiência sensorial imersiva, a integração da luz natural, a água em movimento e a diversidade vegetal, estimulam o descanso mental e a atenção involuntária.
2)



Figura 01: Jewel Changi Airport, Singapura
Fonte: Disponível em https://www.architecturaldigest.com/story/moshe-safdie-singapores-jewel-changi-airport

Instituto Cultural Inhotim (Brumadinho, Brasil): Aberto ao público em 2006, o projeto que foi idealizado na década de 1980, pelo empresário Bernardo de Mello Paz, combina museu de arte contemporânea e jardim botânico. Representa uma das mais relevantes expressões da biofilia no Brasil, com obras expostas em meio à vegetação nativa e jardins paisagísticos, o espaço oferece aos visitantes uma experiência integrada entre arte, natureza e arquitetura. O Inhotim à um exemplo singular de biofilia que promove experiências emocionais, sensoriais e contemplativas.



Figura 02: Inhotim, Brasil
Fonte: Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/tag/inhotim

Essas obras acima analisadas evidenciam, de maneira concreta, como os princípios da biofilia podem ser integrados ao ambiente construído. Pode-se notar que, em cada um desses projetos, os elementos naturais são inseridos de modo a transcender o valor estético, assumindo papel funcional e psicológico.

Fundamentos da biomimética aplicados ao design e à arquitetura

Em uma visão similar as observadas na biofilia, Vincent et al. (2006) relata que os princípios da biomimética têm sido explorados por arquitetos e engenheiros de forma crescente, buscando a integração dos edifícios aos ciclos naturais. Os autores dividem os princípios em categorias, sendo:

a) Biomimética de forma: inspiração nas estruturas e morfologias naturais para conceber formas arquitetônicas inovadoras;
b) Biomimética de processo: baseia-se nos métodos naturais de produção, como o auto organização e o crescimento, buscando reduzir resíduos e energia;
c) Biomimética de sistema: inspira-se nos ecossistemas naturais para criar edifícios que funcionem como organismos vivos, com ciclos fechados de energia, água e resíduos.

A análise de fenômenos morfológicos da natureza facilita e estimula a capacidade de percepção de detalhes presentes em sua estrutura. Ideias inovadoras vêm surgindo de pesquisas sobre sistemas e propriedades naturais, e como a forma natural favorece o ganho de eficiência. (Arruda; Freitas, 2018).

Steadman (1988) apresenta quatro tipos específicos de Analogias relacionadas ao mundo natural, que são:

a) Analogia Orgânica: busca encontrar equilíbrio entre os organismos humanos, as obras de artes e os sistemas mecânicos;
b) Analogia Classificatória: observa os métodos estabelecidos da botânica e zoologia para aplicação na Arquitetura e no Design;
c) Analogia Anatômica: traz uma sistemática de trabalho que estuda a estrutura do esqueleto animal comparando-os com as construções da engenharia;
d) Analogia Darwiniana: busca explicar que os objetos e as construções são feitos através de cópias repetidas através dos tempos, como acontece com a evolução natural.

Diversas outras analogias cabem dentro dessas classificações acima, pois são muitos os organismos e, portanto, muitas comparações ou imitações são possíveis. Para Santos (2010, p.30), "a historia da arquitetura está repleta de exemplo de soluções arquitetônicas em que formas foram diretamente copiadas da natureza". O autor apresenta várias analogias estruturais em seu artigo que podem ser percebidas em construções.

Obras arquitetônicas com aplicação da biomimética

O uso da biomimética se faz presente em projetos arquitetônicos onde a inspiração tem origem animal, vegetal ou mineral. Para Meira (2008, p.5), "a aproximação de designers, engenheiros e biólogos com o mundo natural é imprescindível quando se quer detectar soluções de projetos em organismos da natureza". Diversos casos de produtos e construções fundamentados em design biomimético demonstram que alguns organismos vivos pertencentes aos sistemas biológicos apresentam mecanismos, que por analogia, podem ser aplicados no processo de desenvolvimento de edificações e bens.
Assim como os projetos explorados na biofilia, os dois projetos (internacional e brasileiro) selecionados como exemplos também são certificados pelo LEED e considerados relevantes para o tópico:

1) Quadracci Pavilion (Milwaukee, EUA): O Pavilhão de Quadracci foi inaugurado em 2001 e desenvolvido pelo arquiteto. O projeto se caracteriza pela integração harmônica entre lago e cidade.O pavilhão é conhecido por suas asas móveis, que se assemelham às asas de um pássaro, e se abrem e fecham para controlar a luz solar. A estrutura possui tecnologias, com treliças de aço que lembram a caixa torácica de um pássaro. Em uma visão de biomimética funcional, se adapta automaticamente conforme luz e vento, integrando-se ao ecossistema local.
2)



Figura 03: Museu de Arte, Milwaukee
Fonte: Disponível em: https://www.gettyimages.com.br/search/2/image?phrase=%20Museu%20de%20Arte%20de%20Milwaukee%20&sort=mostpopular&license=rf%2Crm

3) Museu do Amanhã (Rio de Janeiro, Brasil): Outro projeto desenvolvido pelo arquiteto Santiago Calatrava, incorpora formas orgânicas, que refletem as formas encontradas na natureza, A construção possui estrutura que se assemelha a uma flor ou a uma estrutura óssea, demonstrando uma analogia orgânica. A edificação inspira-se nas bromélias do Jardim Botânico e utiliza água da Baia de Guanabara para climatização e espelho d'água, buscando soluções naturais para problemas humanos.



Figura 04: Museu do Amanhã, Rio de Janeiro
Fonte: Disponível em: https://www.shutterstock.com/pt/search/museu-do-amanha.

A Biomimética, também chamada de Biônica no Brasil, vem demonstrando ser um caminho viável para solucionar problemas em diversas áreas, desde a engenharia até a medicina. Na arquitetura apresenta um campo amplo para pesquisa de estruturas, formas, materiais e uso da energia. (Santos, 2010). A intenção é observar os processos biológicos e compreender como o funcionamento natural de um ser vivo auxilia na sua própria existência, adequação e no seu funcionamento. A partir dessa percepção, inserir estratégias similares na criação de produtos, visando o funcionamento em harmonia com seu meio, ou seja, que não afetam seu habitat.

Principais diferenças entre biofilia e biomimética

O crescente aumento das preocupações ambientais e da procura de soluções sustentáveis tem impulsionado a disseminação de conceitos que buscam reaproximar o ser humano da natureza. Destaca dentre esses conceitos a biofilia e a biomimética, que partem do estudo da natureza, mas divergem em seus métodos e aplicações.

Apesar de Biofilia e Biomimética estarem relacionadas, diretamente, com a observação da natureza e o meio ambiente, a primeira foca na relação do homem com o ecossistema e o impacto dessa interação, e a segunda foca nas estruturas e funcionamento de seres da natureza para resolver problemas humanos.

As principais diferenças entre esses conceitos podem ser identificadas em seus objetivos, abordagens e impactos. Enquanto a biofilia trata da relação emocional e sensorial entre humanos e natureza, a biomimética tenta aprender com a natureza para utilizar esse aprendizado para solucionar problemas funcionais e tecnológicos. Um se preocupa em melhorar o local onde as pessoas estão inseridas e aumentar o vínculo com a natureza, o outro observa a natureza para imitá-la, e criar ou melhorar processos, sistemas ou estruturas. A biofilia prioriza o bem-estar, e a biomimética a otimização de desempenho.

A biofilia e a biomimética, apesar das diferenças que muito se destaca na maneira que são aplicadas, não são excludentes, podendo se completarem em projetos que integram bem estar e eficiência ecológica.

Aspecto	Biofilia	Biomimética
Foco	Conexão humana com a natureza e qualificação da experiência espacial.	Aprendizagem com formas, processos e sistemas naturais para resolver problemas.
Aplicação	Vegetação, luz natural, água, vistas, materiais naturais e padrões orgânicos.	Estruturas, materiais, ventilação, proteção solar, eficiência energética e adaptação.
Resultado esperado	Bem-estar, conforto, saúde, pertencimento e valorização ambiental.	Inovação, redução de impactos, eficiência no uso de recursos e desempenho técnico.
Risco de uso superficial	Inserção decorativa de elementos naturais sem desempenho ambiental claro.	Imitação formal da natureza sem compreender princípios funcionais.

Tabela 01: Síntese comparativa entre biofilia e biomimética.
Fonte: Adaptado pela autora a partir da revisão bibliográfica.

Resultados e Discussão

Os exemplos arquitetônicos levantados na pesquisa mostram que a incorporação de vegetação, fachadas verdes, iluminação natural, áreas de convivência abertas, ventilação passiva e soluções de controle térmico pode gerar benefícios ambientais e sociais. Contudo, a presença de elementos naturais não garante, isoladamente, sustentabilidade. É necessário avaliar desempenho, manutenção, ciclo de vida, consumo de recursos e coerência com os critérios técnicos de certificação.

No âmbito das certificações, observou-se que os sistemas analisados organizam critérios de sustentabilidade em dimensões como gestão ambiental, energia, água, materiais, resíduos, conforto e relação com o entorno. A ISO 14001 orienta sistemas de gestão ambiental; o PBE Edifica enfatiza a classificação de eficiência energética; o AQUA-HQE avalia gestão e qualidade ambiental da construção; e o LEED estrutura créditos voltados a localização, recursos, energia, materiais e qualidade interna.

A ISO 14001 contribui por estabelecer uma lógica de sistema de gestão ambiental. Embora não seja uma certificação específica de edifícios, sua ênfase em planejamento, execução, verificação e melhoria contínua pode orientar organizações envolvidas na construção e operação de edificações. A relação com biomimética e biofilia aparece quando a gestão assume metas de redução de impactos, uso racional de recursos, monitoramento e revisão constante das práticas.

O PBE Edifica concentra-se na eficiência energética da edificação. Essa abordagem é relevante porque o desempenho da envoltória, da iluminação e do condicionamento artificial influencia diretamente o consumo de energia. Estratégias biomiméticas e biofílicas podem contribuir para esse desempenho quando favorecem sombreamento, ventilação natural, iluminação adequada, microclimas e soluções passivas coerentes com o clima local.

O AQUA-HQE apresenta uma visão abrangente de gestão sustentável e qualidade ambiental, incluindo conforto, saúde, energia, água, resíduos e relação com o canteiro. Sua estrutura permite relacionar a biofilia com dimensões de qualidade interna e conforto dos usuários, ao mesmo tempo que permite aproximar a biomimética de soluções de desempenho e gestão de recursos.

O LEED organiza seu sistema por créditos e categorias relacionadas à localização, transporte, eficiência hídrica, energia, materiais, recursos e qualidade ambiental interna. A lógica de pontuação favorece a comparação entre empreendimentos e a adoção de metas mensuráveis.

As certificações ou etiquetagem servem como referência para tornar objetivos ambientais mais verificáveis. A documentação, critérios e acompanhamento, são instrumentos que possibilitam que a sustentabilidade não seja abstrata ou tratada apenas como intenção. Contudo, para que a certificação resulte em transformação efetiva, é preciso que as escolhas não sejam apenas pontuais, mas façam parte de uma estratégia coerente de projeto e operação. Cabe ressaltar que a existência de selo não garante que todas as dimensões qualitativas da relação homem-natureza estejam contempladas.

Instrumento	Ênfase observada	Relação com biofilia e biomimética
ABNT NBR ISO 14001	Gestão ambiental, melhoria contínua e controle de impactos.	Apoia processos de gestão que podem incorporar metas ambientais inspiradas em sistemas naturais.
PBE Edifica	Eficiência energética e desempenho da envoltória, iluminação e condicionamento.	Relaciona-se a soluções passivas, ventilação, sombreamento e estratégias biomiméticas.
AQUA-HQE	Gestão sustentável, conforto, saúde, energia, água e canteiro.	Permite associar conforto do usuário, qualidade ambiental interna e recursos biofílicos.
LEED	Sistema de créditos ambientais para projeto, construção e operação.	Abrange eficiência, materiais, qualidade interna e estratégias compatíveis com ambas as abordagens.

Tabela 02: Relação entre instrumentos ambientais e contribuições para edificações eficientes.
Fonte: Adaptado pela autora a partir dos documentos de certificação e da dissertação original.

A análise ampliada reforça que a sustentabilidade em edificações precisa ser entendida como um processo de tomada de decisão, e não apenas como resultado. A decisão sobre orientação solar, implantação, forma, abertura, vegetação, sistema construtivo, equipamentos e operação cria uma cadeia de efeitos que acompanha o edifício durante toda sua vida útil.

Considerações Finais

A revisão e avaliação realizadas indicam que biofilia e biomimética são estratégias relevantes para a construção de edificações sustentáveis e eficientes. A biofilia contribui para a humanização dos espaços, para a percepção de conforto e para a reaproximação entre homem e natureza. A biomimética amplia a capacidade de inovação do projeto ao traduzir princípios naturais em soluções construtivas, energéticas e materiais.

Os sistemas de certificação e normas ambientais analisados oferecem parâmetros para verificar se as intenções sustentáveis se convertem em práticas mensuráveis. Sendo assim, a integração entre os dois conceitos (biofilia e biomimética) e instrumentos de avaliação é indispensável. Projetos que combinam biofilia, biomimética e certificações tendem a responder melhor aos desafios climáticos, econômicos e sociais da construção civil.

A adoção dessas abordagens deve ocorrer desde as fases iniciais de planejamento, com participação interdisciplinar e avaliação contínua. Mais do que tendência estética, a natureza pode funcionar como referência ética, técnica e sensorial para construir ambientes de menor impacto e maior qualidade de vida.

Esse artigo visa organizar uma leitura integrada de conceitos, métodos e instrumentos de avaliação que podem apoiar futuras pesquisas e práticas projetuais. Estudos posteriores que aprofundem análises pós-ocupação, comparação de desempenho

entre edificações certificadas e não certificadas, custos de manutenção de soluções biofílicas e biomiméticas e indicadores de saúde e bem-estar associados à presença da natureza no ambiente construído são de extrema importância e pouco observado na literatura atual.

Agradecimentos

A autora agradece à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, ao orientador Prof. Richieri Antônio Sartori e aos colaboradores que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa original.

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.

ALMEIDA, Fernando. O bom negócio da sustentabilidade. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2002.

AMARAL, J. J. F. Como fazer uma pesquisa bibliográfica. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2007.

ARRUDA, Amilton; FREITAS, Theska Laila de. Novas estratégias da biomimética: as analogias no biodesign e na bioarquitetura. Mix Sustentável, v. 4, n. 1, 2018.

BARBIERI, José Carlos. Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2011.

BENYUS, Janine M. Biomimicry: innovation inspired by nature. New York: Harper Collins, 1997.

BOERI, Stefano. Bosco Verticale: designing a home for trees and humans. Milan: Corraini Edizioni, 2015.

BROWNING, William; RYAN, Catherine; CLANCY, Joseph. 14 patterns of biophilic design: improving health and well-being in the built environment. New York: Terrapin Bright Green, 2014.

FONSECA, João José Saraiva. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará, 2002.

KAPLAN, Rachel; KAPLAN, Stephen. The experience of nature: a psychological perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

KELLERT, Stephen R.; WILSON, Edward O. The biophilia hypothesis. Washington: Island Press, 1993.

KELLERT, Stephen R. Building for life: designing and understanding the human-nature connection. Washington: Island Press, 2005.

KELLERT, Stephen R. Biophilic design: the theory, science and practice of bringing buildings to life. Hoboken: Wiley, 2008.

KELLERT, Stephen R.; CALABRESE, Elizabeth F. Nature by design: the practice of biophilic design. New Haven: Yale University Press, 2015.

LEFF, Enrique. Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. 3. ed. Petrópolis: Vozes, 2001.

PBE EDIFICA. Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações. Documentos técnicos e materiais institucionais, 2025.

ULRICH, Roger S. View through a window may influence recovery from surgery. Science, v. 224, n. 4647, 1984.

VANZOLINI, Fundação. Certificação AQUA-HQE: guia prático de gestão sustentável e referencial técnico. São Paulo: Fundação Vanzolini, 2017.

VINCENT, Julian F. V. et al. Biomimetics: its practice and theory. Journal of the Royal Society Interface, v. 3, n. 9, 2006.

WILSON, Edward O. Biophilia: the human bond with other species. Cambridge: Harvard University Press, 1984.

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL

1 Juliana Miranda Bacelar, 2 Luiz Carlos Andrade Fileti, 3 Nora Katia Saavedra del Aguila Hoffmann
1 UFG, email: juliana.miranda@discente.ufg.br; 2 UFG, email: luiz_fileti@discente.ufg.br; 3 UFG, e-mail: kasaavedra@ufg.br

Palavras-chave: Digestão anaeróbia; biogás; metano.

Resumo

A digestão anaeróbia tem se destacado como uma alternativa sustentável para o tratamento de resíduos orgânicos e geração de energia renovável na forma de biogás. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a produção de metano a partir da digestão anaeróbia de resíduo agroindustrial, utilizando melaço de cana-de-açúcar como substrato, com foco na atividade metanogênica específica (AME) e na influência da concentração de substrato e da adição de nutrientes no desempenho do processo. Os ensaios experimentais foram conduzidos em sistema anaeróbio de bancada, operado em batelada, utilizando lodo proveniente de reator de circulação interna (IC) como inóculo. Foram realizadas duas etapas experimentais com diferentes proporções de substrato, água, lodo e solução nutritiva. O monitoramento do processo foi realizado por meio da análise de parâmetros físico-químicos, incluindo demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos voláteis (SSV) e sólidos totais (ST). Os resultados indicaram elevada carga orgânica inicial, com reduções significativas de DQO em determinadas condições, evidenciando a eficiência do processo na degradação da matéria orgânica e potencial produção de biogás. Observou-se também variação nos valores de SSV, indicando adaptação e dinâmica da biomassa microbiana ao longo dos ensaios. De modo geral, os resultados demonstraram que a concentração de substrato e a disponibilidade de nutrientes influenciam diretamente a eficiência do sistema anaeróbio, afetando a atividade microbiológica e a produção de metano. Conclui-se que o uso de resíduos agroindustriais, como o melaço de cana-de-açúcar, apresenta elevado potencial para aplicação em processos de digestão anaeróbia, contribuindo para a geração de energia renovável e redução de impactos ambientais.

Introdução

A demanda cada vez maior por fontes de energia renováveis, associada à necessidade de destinação adequada de resíduos orgânicos, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis voltadas à recuperação energética. Nesse contexto, a digestão anaeróbia destaca-se como uma alternativa promissora, capaz de promover simultaneamente o tratamento de resíduos e a produção de biogás, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação de impactos ambientais (SCHIEVANO et al., 2009).

A digestão anaeróbia consiste em um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio, no qual microrganismos atuam de forma sequencial na conversão da matéria orgânica em produtos mais estáveis, como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Esse processo envolve quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (FORESTI, 1997; CHERNICHARO, 2009; AQUINO et al., 2007). Além disso, apresenta vantagens relevantes em relação aos processos aeróbios, como menor produção de lodo, menor consumo energético e possibilidade de recuperação de energia por meio do biogás (CHERNICHARO, 2007).

O biogás gerado é constituído predominantemente por metano e dióxido de carbono, sendo o teor de metano o principal parâmetro associado ao seu poder calorífico e potencial energético (CHERNICHARO, 2009; PROBIOGÁS, 2015). Nesse sentido, a eficiência da digestão anaeróbia é aferida pela sua capacidade de converter, de forma otimizada, a matéria orgânica em metano.

O metano constitui o principal componente energético do biogás, sendo responsável por seu poder calorífico e potencial de aproveitamento energético (PROBIOGÁS, 2015). Dessa forma, a produção e o teor de metano são indicadores fundamentais do desempenho da digestão anaeróbia e da viabilidade do uso energético do biogás.

O desempenho desse processo depende, sobretudo, das características do substrato utilizado, incluindo sua composição química, biodegradabilidade e presença de compostos inibidores. Diversos resíduos podem ser empregados, como resíduos alimentares, agrícolas, efluentes industriais e lodos de sistemas de tratamento (LI et al., 2019).

Entre os resíduos com elevado potencial para digestão anaeróbia, destacam-se os resíduos agroindustriais, que apresentam alta biodegradabilidade e são gerados em grandes volumes ao longo do ano. No Brasil, setores como o sucroenergético e alimentício são responsáveis por significativa geração desses resíduos, tornando importantes fontes potenciais para a produção de energia renovável (CREMONEZ et al., 2021). O aproveitamento desses materiais permite não apenas a redução da carga poluidora no meio ambiente, mas também a valorização energética dos resíduos, contribuindo para a sustentabilidade dos processos produtivos (KAINTHOLA, J. et al., 2019).

Dentre esses resíduos, o melaço de cana-de-açúcar destaca-se como um substrato estratégico, dada a sua elevada carga orgânica e alto teor de açúcares redutores. Essa constituição favorece a cinética da degradação anaeróbia, resultando em um rendimento superior de biogás. Evidências apontam que o aproveitamento desse subproduto detém um potencial energético expressivo, superando, inclusive, rotas convencionais de conversão energética (LI et al., 2010).

A eficiência da digestão anaeróbia também está relacionada à atividade da biomassa microbiana, sendo a metanogênese a etapa mais sensível do processo. Sob tal perspectiva, a atividade metanogênica específica (AME) configura-se como um importante parâmetro para avaliação do desempenho da biomassa, permitindo estimar a capacidade de produção de metano por unidade de massa de sólidos voláteis (AQUINO et al., 2007; LONGARETTI, 2014). Além disso, o monitoramento de parâmetros físico-químicos, como

demanda química de oxigênio (DQO), pH e sólidos suspensos voláteis (SSV), é essencial para o controle e avaliação da eficiência do processo (CHERNICHARO, 2007).

A DQO é amplamente empregada como indicador da carga orgânica presente no sistema, sendo diretamente relacionada ao potencial de produção de biogás, de modo que sua redução ao longo do processo reflete a conversão da matéria orgânica em metano (APHA, 2017; AQUINO, 2006). Paralelamente, o pH exerce influência sobre a atividade metabólica dos microrganismos, especialmente os metanogênicos, que apresentam maior atividade em faixas próximas à neutralidade. Oscilações nesse parâmetro podem resultar em acúmulo de ácidos voláteis, promovendo desequilíbrio entre as etapas do processo e possível inibição da metanogênese (CHERNICHARO, 2007). Complementarmente, os sólidos suspensos voláteis (SSV), por sua vez, são utilizados como indicador da concentração de biomassa ativa no sistema, sendo fundamentais para a avaliação da atividade biológica do lodo anaeróbio. A relação entre a produção de metano e a concentração de SSV permite inferir o desempenho microbiológico do sistema (AQUINO et al., 2007).

No que se refere às tecnologias empregadas, os reatores anaeróbios, como o reator de circulação interna (IC), apresentam elevada eficiência no tratamento de efluentes com alta carga orgânica, permitindo maior retenção de biomassa e intensificação do contato entre substrato e microrganismos, favorecendo a produção de biogás (LETTINGA et al., 1995; AMARO et al., 2013).

Diante desse contexto, a digestão anaeróbia aplicada a resíduos agroindustriais apresenta-se como uma alternativa estratégica para a geração de energia renovável e redução de impactos ambientais. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a produção de metano a partir da digestão anaeróbia de resíduo agroindustrial, com foco na atividade metanogênica específica, bem como analisar a influência da concentração de substrato e da adição de nutrientes sobre o desempenho do processo.

Material e Métodos

Os materiais utilizados na pesquisa incluíram lodo anaeróbio proveniente de agroindústria, melaço de cana-de-açúcar utilizado como substrato, solução de hidróxido de sódio (NaOH) P.A. e água destilada.

A área de estudo compreende uma unidade agroindustrial localizada na região metropolitana de Goiânia – GO, onde foi realizada a coleta de lodo proveniente de um reator anaeróbio de circulação interna (IC), integrante do sistema de tratamento de efluentes da unidade. No sistema avaliado, o efluente bruto é inicialmente direcionado a um tanque de equalização, no qual permanece sob agitação constante, com a finalidade de promover a homogeneização da carga orgânica e minimizar variações bruscas de pH.

A coleta das amostras foi realizada em 28 de outubro de 2025, diretamente no sistema de tratamento da agroindústria, com o objetivo de obter o lodo para utilização como inóculo nos ensaios de AME, utilizando melaço de cana-de-açúcar como substrato orgânico, bem como para a realização de análises físico-químicas.

Após a coleta, o material foi acondicionado em frascos de polietileno devidamente lacrados e armazenado em caixa térmica, a fim de evitar contaminações externas e preservar suas características físico-químicas e microbiológicas durante o transporte até o Laboratório de Biologia (LABIO) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), onde foram conduzidas as etapas experimentais.

Os ensaios experimentais foram realizados em sistema anaeróbio de bancada, operado em batelada, com o objetivo de avaliar a influência da concentração de substrato e da adição de nutrientes sobre a atividade microbiológica e a produção de biogás.

O experimento foi conduzido em duas etapas experimentais. Na primeira etapa, foram preparadas duas amostras com diferentes concentrações de substrato (amostras 1 e 2). Na segunda etapa, realizada posteriormente, novos ensaios foram conduzidos com variações nas concentrações de substrato, mantendo-se o mesmo inóculo. O esquema experimental utilizado para a medição da produção do metano está representado pela Figura 01.

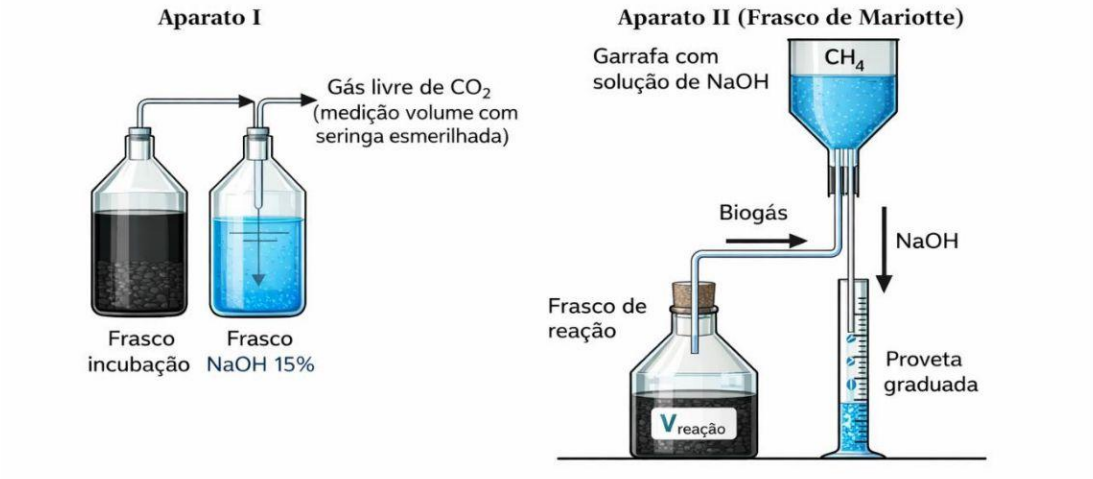


Figura 01: Aparato experimental para medição do metano.
Fonte: AQUINO et al. (2007)

Primeira etapa experimental

Para os ensaios realizados em 28/09/2025, foi preparada uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) P.A. a 15%, mediante dissolução do reagente em água destilada.

As amostras foram preparadas utilizando melaço de cana-de-açúcar nas concentrações de 60 g e 40 g, homogeneizadas com 40 mL e 60 mL de água destilada, respectivamente. Em seguida, as soluções foram completadas em balões volumétricos e homogeneizados. As proporções adotadas estão apresentadas no Quadro 1.

Amostras	Melaço de cana-de-açúcar (g)	Água Destilada (ml)	Lodo Anaeróbio (ml)	Solução nutritiva para bactérias (ml)
01	60	40	150	15
02	40	60	100	30

Quadro 01: Proporções das amostras (1ª etapa). Fonte: autores (2026)

Após o preparo, as amostras foram acondicionadas em recipientes devidamente vedados, a fim de evitar trocas gasosas com o meio externo.

Segunda etapa experimental

Na segunda etapa, realizada em 04/11/2025, foi utilizada a mesma metodologia de preparo da solução de NaOH. As amostras foram preparadas com 50 g de melaço, homogeneizadas com 50 mL de água destilada, mantendo proporções distintas de lodo e solução nutritiva. As condições adotadas estão apresentadas no Quadro 2.

Amostras	Melaço de cana-de-açúcar (g)	Água Destilada (ml)	Lodo Anaeróbio (ml)	Solução nutritiva para bactérias (ml)
01	50	50	150	10
02	50	50	100	5

Quadro 02: Proporções das amostras (2ª etapa). Fonte: autores (2026)

Monitoramento e análises

Durante os ensaios, a produção de biogás foi monitorada ao longo do tempo por meio de medições periódicas, permitindo a avaliação da atividade metanogênica da biomassa sob diferentes condições operacionais.

Ademais, foram realizadas análises físico-químicas das amostras (afluente, efluente), incluindo determinação de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos voláteis (SSV) e sólidos totais (ST), conforme APHA (2017). Esses parâmetros foram utilizados para avaliar o potencial de biodegradabilidade da matéria orgânica e a eficiência do processo de digestão anaeróbia na produção de metano.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos nas análises laboratoriais indicam que o efluente agroindustrial e o lodo utilizado como inóculo apresentaram características típicas de resíduos com elevada carga orgânica, evidenciadas pelos altos valores de demanda química de oxigênio (DQO) observados ao longo dos ensaios.

Na primeira etapa experimental, os valores iniciais de pH das amostras situam-se na faixa ácida (3,8–3,9), condição associada à elevada concentração de matéria orgânica facilmente biodegradável presente no melaço de cana-de-açúcar. Esse comportamento é esperado, uma vez que substratos ricos em açúcares favorecem a formação de ácidos voláteis nas etapas iniciais da digestão anaeróbia, podendo interferir negativamente na atividade dos microrganismos metanogênicos, que apresentaram melhor desempenho em pH próximo à neutralidade.

Os resultados de DQO obtidos na primeira etapa apresentaram comportamento semelhante entre as amostras. A amostra 01 apresentou valor inicial de 994.000 mg/L, reduzindo para 149.100 mg/L ao final do ensaio, já a amostra 02, apresentou a redução de 960.000 mg/L para 386.000 mg/L, indicando elevada remoção de matéria orgânica e sugerindo boa eficiência do processo anaeróbio.

Amostras	DQO (mg/L)	SSV (mg/L)	ST (mg/L)
Início - 01	994.000	145.250	186.420
Início - 02	960.000	185.900	564.080

Final - 01	149.100	5.890	163.362
Final - 02	386.000	453.300	107.600

Quadro 03: Resultados das amostras da 1ª etapa experimental. Fonte: autores (2026)

Na segunda etapa experimental, os valores iniciais de DQO também indicaram elevada carga orgânica, com destaque para a amostra 01 (392.940 mg/L) em relação à amostra 02 (153.800 mg/L). Ao final do ensaio, observou-se redução expressiva da DQO na amostra 01, atingindo 168.900 mg/L e em relação à amostra 02 (111.300 mg/L), o que reforça a eficiência da digestão anaeróbia na degradação da matéria orgânica e indica potencial produção de biogás.

Os valores de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) apresentaram redução na amostra 01 (de 147.600 mg/L para 63.250 mg/L), e na amostra 02 (de 57.600 mg/L para 41.700 mg/L), indicando consumo da fração biodegradável da matéria orgânica.

Os sólidos suspensos voláteis (SSV) apresentaram aumento em ambas as amostras, passando de 14.450 mg/L para 38.850 mg/L na amostra 01 e de 13.530 mg/L para 21.490 mg/L na amostra 02, indicando possivelmente crescimento da biomassa microbiana e adaptação dos microrganismos às condições do sistema.

Amostras	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SSV (mg/L)	ST (mg/L)
Início - 01	147.600	392.940	14.450	118.316
Início - 02	57.600	153.800	21.490	95.518
Final - 01	63.250	168.900	38.850	105.262
Final - 02	41.700	111.300	13.530	105.132

Quadro 03: Resultados das amostras da 2ª etapa experimental. Fonte: autores (2026)

De modo geral, os resultados indicam que a eficiência do processo anaeróbio está diretamente relacionada à concentração de substrato e às condições operacionais adotadas. A redução da DQO observada em algumas condições experimentais evidencia a conversão da matéria orgânica em biogás, enquanto os aumentos pontuais desse parâmetro sugerem a ocorrência de etapas intermediárias da digestão anaeróbia, como a hidrólise e acidogênese. Além disso, a variação dos SSV demonstrou a dinâmica da biomassa microbiana, refletindo processos de crescimento, adaptação ou consumo da matéria orgânica disponível.

Comentários finais

Os resultados obtidos neste estudo indicaram que a digestão anaeróbia de resíduo agroindustrial, utilizando melaço de cana-de-açúcar como substrato, apresentou potencial promissor para a produção de metano, atendendo ao objetivo proposto de avaliar a atividade metanogênica e a influência das condições operacionais no processo.

Observou-se que, em relação à remoção de DQO na primeira etapa experimental, a amostra 01 apresentou maior eficiência, com remoção de aproximadamente 85%, enquanto a amostra 02 apresentou eficiência de 59,8%. Na segunda etapa, verificou-se novamente maior eficiência na amostra 01, com remoção de cerca de 57%, em comparação à amostra 02, que apresentou eficiência de 27,6%.

A produção de biogás está diretamente relacionada à remoção da matéria orgânica presente no sistema, sendo a demanda química de oxigênio (DQO) um dos principais parâmetros indicativos desse processo. Em sistemas anaeróbios, a eficiência de remoção de DQO pode atingir valores elevados, situando-se, em condições favoráveis, na faixa de aproximadamente 70 a 95% (PROBIOGÁS, 2015).

Nesse contexto, os resultados obtidos indicaram que a amostra 01 da primeira etapa apresentou desempenho compatível com valores típicos reportados na literatura, enquanto as demais condições experimentais apresentaram eficiências inferiores, possivelmente associadas às variações operacionais e às características do substrato.

Por fim, destaca-se a importância do controle de parâmetros operacionais, como pH e concentração de substrato, para otimização da digestão anaeróbia. Recomenda-se a realização de estudos adicionais para aprofundar a compreensão da dinâmica microbiana e aprimorar as condições operacionais visando maior eficiência na produção de metano.

Agradecimentos

Os autores agradecem o V Congresso Internacional de Engenharia Ambiental pela oportunidade de publicação deste trabalho em seus anais, bem como à Universidade Federal de Goiás (UFG) pelo apoio institucional, e ao CNPq pela concessão de bolsa de pesquisa PIBIC (IC).

Referências Bibliográficas.

APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.

AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L.; FORESTI, E.; SANTOS, M. L. F.; MONTEGGIA, L. O. *Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 12, n. 2, p. 192–201, 2007.

AQUINO, S. F. *Caracterização e avaliação da atividade metanogênica de lodos anaeróbios*. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

AMARO, H. M. et al. Anaerobic reactor performance in high organic load systems. 2013.

ANDRADE, R. C. *Influência do pH na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BENVENUTI, T. *Avaliação da biomassa anaeróbia por meio de sólidos suspensos voláteis*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Projeto PROBIOGÁS. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás. Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios*. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

FORESTI, E. *Fundamentos do processo anaeróbio*. In: CAMPOS, J. R. (org.). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. Rio de Janeiro: ABES, 1997. p. 29–52.

KAINTHOLA, J. et al. **Enhanced biogas production techniques review**. Process Biochemistry, 2019.

LETTINGA, G. et al. Anaerobic digestion technology development. Water Science and Technology, 1995.

LI, Y. et al. Enhancement of methane production in anaerobic digestion. Applied Energy, 2019.

LONGARETTI, G. *Avaliação da atividade metanogênica específica em sistemas anaeróbios*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SCHIEVANO, Andrea; D'IMPORZANO, Giuliano; ADANI, Fabrizio. Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production. Journal of Environmental Management, v. 90, n. 8, p. 2537–2541, 2009.

VERAS, Shyrlane Torres Soares et al. Nota técnica 1 — Caracterização qualitativa do esgoto bruto. Cadernos Técnicos de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 3, n. 4, p. 3–14, 2023.