

ESA A Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, em conjunto com o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, apresenta mais uma edição dos Cadernos de Nota Técnica ESA (CTESA), onde tem por objetivo a publicação de contribuições técnicas e científicas nas áreas de saneamento, e suas interfaces. As contribuições são publicadas após aprovação do conselho editorial formado exclusivamente para este fim. Os artigos publicados não refletem necessariamente a opinião da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES).

Editor Geral

Maurício Alves da Motta Sobrinho

Editor Geral Adjunto

Luciano Matos Queiroz

Coordenação

Allan Rodrigues

Correspondência

Avenida Beira Mar, 216, 13º andar
CEP: 20021-060 - Rio de Janeiro (RJ),
Brasil Tel.: (21) 2277-3900 -
E-mail: esa@abes-dn.org.br

PRODUÇÃO EDITORIAL



Estatuto em Vigor: Alteração de Estatuto referendado pela Assembleia Geral Extraordinária realizada no Rio de Janeiro (RJ) em 08 de julho de 2011. Essa nova versão do Estatuto recebeu protocolo número 201108081358447 e foi averbada na matrícula número 1244 do Registro Civil de Pessoas Jurídicas do Rio de Janeiro em 25 de agosto de 2011.

cadernos técnicos engenharia sanitária e ambiental

Cadernos Técnico Eng Sanit Ambient | v.5 n.1 | 2025



Créditos da imagem da capa: magnific.com/author/kimsunho

CORPO EDITORIAL PERMANENTE

Editor Geral: Maurício Alves da Motta Sobrinho, Universidade Federal de Pernambuco, Recife (PE), Brasil
Editor Adjunto: Luciano Matos Queiroz, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia (BA), Brasil
Editor Coordenador: Allan Richard Cardoso Rodrigues, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Rio de Janeiro (RJ), Brasil

EDITORES DE SEÇÕES TEMÁTICAS

André Bezerra dos Santos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará (CE), Brasil
Caroline Maria Bezerra de Araujo, Centro de Química, Universidade do Minho (Portugal)
Davi Gasparini Fernandes Cunha, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil
Fábio Machado Cavalcanti, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco (PE), Brasil
Jorge M.G.P. Isidoro, Universidade do Algarve, Faro, Portugal
Lisete Celina Lange, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais (MG), Brasil
Lucas Meili, Universidade Federal de Alagoas, Maceió (AL), Brasil
Luciano Matos Queiroz, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia (BA), Brasil
Luiza Carla Girard Mendes Teixeira, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará (PA), Brasil
Maurício Alves da Motta Sobrinho, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco (PE), Brasil
Paula Loureiro Paulo, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul (MS), Brasil
Melissa Gurgel Adeodato Vieira, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo (SP), Brasil
Nina Paula Gonçalves Salau, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria (RS), Brasil
Paulo Sérgio Scalize, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás (GO), Brasil
Rodrigo Braga Moruzzi, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Campus de São José dos Campos, São Paulo (SP), Brasil
Sergio Francisco de Aquino, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), Brasil

Revista Engenharia Sanitária e Ambiental Fundada com o título Engenharia Sanitária em 1962 (vol.1, n.1, jun de 1962) com formato 18,0 x 26,0 cm, até o vol.12, n.3, quando foi adotado o formato A4. A partir do vol.28, abr./jun. de 1989, passou a chamar-se BIO, com o formato 21,0 x 28,0 cm, sendo a Engenharia Sanitária transformada em encarte técnico da BIO. A partir de 1996, retorna a Engenharia Sanitária, desta feita incorporando a palavra Ambiental (Ano I, n.1, jan./mar. 1996).

DIRETORIA NACIONAL

Presidente: Juliana Almeida Dutra, **Vice-Presidente:** Mário César Guerino, **Secretária Geral:** Vanessa Britto Silveira Cardoso, **Secretário Geral Adjunto:** Lúcio Henrique Bandeira, **Tesoureiro Geral:** Álvaro José Menezes da Costa, **Tesoureiro Adjunto:** Luiz Roberto Gravina Pladevall, **Diretor Sul:** Sandro Adriani Camargo **Diretor Sudeste:** Rogério Pena Siqueira, **Diretor Centro-Oeste:** Fuad Moura Guimarães Braga **Diretora Nordeste:** Maria Geny Formiga de Farias, **Diretor Norte:** Rainier Pedraça Azevedo.

CONSELHO FISCAL

Efetivos: Frieda Keifer Cardoso, Karen Juliana Do Amaral, Myriam Vieira de Carvalho Marins

Suplentes: Andrea Carla Fiaux Pereira, Rodrigo Gibbin Marconi, Samanta Tavares de Souza

CONSELHO DIRETOR

Adriana Oliveira Manicardi, Ana Maria Malateaux Silva, Antônio Carlos Nery, Camila Dantas Lúcio Roncato, César Silva Ramos, Cícero de Carvalho Monteiro, Darci Barnech Campani, Edson Filizzola, Haroldo Costa Bezerra, Heliana Kátia Tavares Campos, Isabel Cristina Pereira Gonçalves, João Paulo Tavares Papa, Josivan Cardoso Moreno, Karine Diniz Soares, Laiz Hérida Siqueira de Araújo, Luiz Antonio de Oliveira Junior, Luiz Henrique Bucco, Maíra Araújo de Mendonça Lima, Mara Regina Samensatto Ramos, Márcio Tadeu Pedrosa, Maria Lucia Bernardes Coelho Silva, Mayra De Castilho Bielschowsky, Nadja Lima Gorza, Nelson Bevilacqua, Olivia Pompeu de Mendonça Coelho, Reynaldo Eduardo Young Ribeiro, Ricardo Figueira Bidone, Sergio Antonio Gonçalves, Sérgio Bezerra Pinheiro, Virgílio Gadelha, Yara Vanessa Portuguese Fonseca

Membros Natos: Alceu Guérios Bittencourt (SP), Antônio César da Costa e Silva (SP), Antônio Marsiglia Netto (SP), Carlos Alberto Rosito (RJ), Cassilda Teixeira de Carvalho (MG), Clovis Francisco do Nascimento Filho (RJ), Dante Ragazzi Pauli (SP), Hugo de Mattos Santos (RJ), João Alberto Viol (SP), José Aurélio Boranga (SP), José Carlos Vieira (RJ), Lineu Rodrigues Alonso (SP), Luiz Otávio Mota Pereira (PA), Marcel Costa Sanches (SP), Nelson Rodrigues Nucci (SP), Paulo Cezar Pinto (RJ), Roberval Tavares de Souza (SP) e Walter Pinto Costa (RJ).

Diretoria da Seção Estadual

Cheila Santos de Oliveira - Presidente
Valdete dos Santos Araújo - Vice-Presidente
Rainier Pedraça de Azevedo - 1º Secretário
Arlindo Sales Pinto - 2º Secretário
Paulo Rodrigues de Souza - 1º Tesoureiro

Conselho Consultivo

Cheila Santos de Oliveira
Joabe Silva de Araujo
Paulo Ricarde Fernandes Diógenes

Conselho Fiscal Estadual

Josilene Monteiro Jeffres
Elionara Pereira N. da Silva
Etianne Monteiro Braga

Representante(s) junto ao Conselho Diretor

Cheila Santos de Oliveira - Membro Nato

Presidentes das Seções Estaduais (2023-2025)

Cheila Santos de Oliveira(AM)
César Silva Ramos(BA)
Gleyciane Nobre Rocha(CE)
Fuad Moura Guimarães Braga(DF)
Nadja Lima Gorza(ES)
Juliana Matos De Sousa(GO)
Jorge Ricardo Athayde Rocha(MA)
André Amaral Horta(MG)
Ariel Ortiz Gomes(MS)
Davi Cavalcante de Oliveira(PA)
José Dantas de Lima(PB)
Djair Barros Falcão(PE)

Selma Aparecida Cubas(PR)
Eduardo Pacheco Jordão(RJ)
Maria Geny Formiga de Farias(RN)
Paulo Robinson Silva Samuel (RS)
Gerson Antonio Panarotto (Subseção SERRA/RS)
Isabel Cristina Pereira Alves(SE)
Sebastião dos Reis Salvador(SC)
Luiz Roberto Gravina Pladevall(SP)
Ricardo Tierno (Subseção Centro Paulista/SP)
Jorge Luiz Monteiro(Subseção Cone Leste Paulista/SP)
Humberto do Nascimento Ferreira(Subseção LITORAL PAULISTA/SP)
Leila Maria Sotocorno e Silva(Subseção NOROESTE PAULISTA / SP)
Regina Cristina Silva Spirlandelli (Subseção NORTE PAULISTA/SP)

EDITORIAL

- 1 Saneamento, inovação e emergência climática: desafios e rumos da engenharia sanitária e ambiental no Brasil**
Sanitation, innovation, and climate emergency: challenges and future directions of sanitary and environmental engineering in Brazil
Maurício Alves da Motta Sobrinho

ARTIGOS CIENTÍFICOS

- 5 Efeitos dos parâmetros de projeto na remoção de células de *Raphidiopsis raciborskii* e de cilindropermopsinas no processo combinado de flotação por ar dissolvido e adsorção em carvão ativado em pó**
*Effects of design parameters on the removal of *Raphidiopsis raciborskii* cells and cylindropermopsins in the combined process of dissolved air flotation and adsorption onto powdered activated carbon*
Daniel Valencia-Cárdenas, Cristina Celia Silveira Brandão, Yovanka Pérez Ginoris
- 19 Influência da composição de resíduos alimentares de grandes geradores na produção de metano em biodigestor de garagem**
Influence of food waste composition from large generators on methane production in a garage-scale biodigester
Fernanda Peixoto Manéo, Wilkson Sousa dos Santos, Letícia dos Santos Macedo, Adilson Vicente da Silva, Claudia Echevengúá Teixeira
- 31 Monitoramento temporal e espacial de fármacos no esgoto de Curitiba: *insights* para a saúde pública e planejamento urbano**
Temporal and spatial monitoring of pharmaceuticals in Curitiba's wastewater: insights for public health and urban planning
Demian da Silveira Barcellos, Marines Maria Wilhelm, Allan Michael Junkert, Guilherme Samways, Barbara Zanicotti Leite, Jakson Alves, Gustavo Rafael Collere Possetti, Ramiro Gonçalves Etchepare, Roberto Pontarolo, Mario Prokopiuk
- 43 Jovens escritores: resíduos eletrônicos e consciência ambiental na forma de livros artesanais**
Young writers: electronic waste and environmental awareness through handmade books
Vanessa Souza Álvares de Mello, Rejane de Barros Araújo, Eduardo Garcia Nunes Rosa, Jéssica Costa da Silva dos Santos, Luan Eiichi Takahashi Hirota
- 53 Razões para não utilizar indicadores de perdas de água expressos em percentual**
Reasons for not using water loss indicators expressed as a percentage
Marcelo Dalcul Depexe
- 65 Os desafios do saneamento na Rocinha, a maior favela do Rio de Janeiro**
The challenges of sanitation in Rocinha, the largest favela in Rio de Janeiro
Larissa Rocha Abadias, Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira
- 75 Análise da efetividade da educação ambiental sobre resíduos sólidos e segurança no ensino fundamental**
Analysis of the effectiveness of environmental education on solid waste and safety in elementary education
Marcos Vinícios Figueiredo Nascimento, Laura Victória Nascimento de Souza, Vanessa Souza Álvares de Mello, Alacid Rodrigues de Vilhena, Raissa Tavares da Silva
- 85 Avaliação da vulnerabilidade a inundações na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé**
Assessment of flood vulnerability in the Minas Gerais portion of the Pomba and Muriaé river basins
Breno Verly Rosa, Luciana Fernandes Guimarães, Rosa Maria Formiga Johnsson, Bruna Peres Battemarco
- 97 Regulador baixa tensão/baixa tensão móvel para uso nas instalações operacionais de água e esgoto com problemas de qualidade de energia**
Low voltage/low voltage mobile regulator for use in water and sewage operational facilities with power quality issues
Rodrigo Masayuki Yamano, Leandro Pereira dos Santos, Marcos Cesar de Souza Brito
- 103 Uso combinado de coagulantes naturais derivados de *Moringa oleifera* e *Aloe vera* no tratamento de água do Rio Solimões - Amazonas**
*Combined use of natural coagulants derived from *Moringa oleifera* and *Aloe vera* in the treatment of water from the Solimões River - Amazonas*
Adriana Ribeiro Francisco, Camila Clementina Arantes

Saneamento, inovação e emergência climática: desafios e rumos da engenharia sanitária e ambiental no Brasil

Sanitation, innovation, and climate emergency: challenges and future directions of sanitary and environmental engineering in Brazil

Maurício Alves da Motta Sobrinho^{1*} 

A universalização do saneamento básico permanece como um dos compromissos socioambientais, sanitários e éticos mais urgentes do Brasil contemporâneo. O acesso à água potável, ao esgotamento sanitário, ao manejo adequado dos resíduos sólidos e à drenagem urbana constitui condição essencial para a promoção da saúde pública, a proteção ambiental, a redução das desigualdades e a construção de cidades mais resilientes. Em um cenário marcado por profundas assimetrias sociais, crescente pressão sobre os recursos naturais e agravamento dos eventos climáticos extremos, torna-se indispensável avançar para uma concepção de saneamento que articule rigor técnico, inovação tecnológica, sustentabilidade, inclusão social e políticas públicas baseadas em evidências científicas.

É nesse contexto que o 33.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (CBESA) e a Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental (Fitabes 2025) assumem particular relevância. Realizados pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (Abes), entre 25 e 28 de maio de 2025, no Centro de Convenções Ulysses Guimarães, em Brasília (DF), os eventos reuniram diferentes segmentos da sociedade em torno do tema “Saneamento Para Quem Não Tem: Inovar para Universalizar!”. A escolha da capital federal se revelou estratégica em um momento no qual questões como saneamento, segurança hídrica, mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável demandam maior articulação com os espaços de decisão política e institucional do país.

Mais do que um congresso técnico e científico, o 33.º CBESA constituiu um importante espaço de articulação entre ciência, gestão pública, setor produtivo, academia, organizações sociais e sociedade. A participação de mais de 15 mil pessoas, provenientes de todos os estados brasileiros, do Distrito Federal e de mais de dez países, demonstra as dimensão e representatividade alcançadas pelo evento. A apresentação de mais de 1.350 trabalhos técnicos e científicos evidencia, por sua vez, a vitalidade da produção de conhecimento e a capacidade da engenharia sanitária e ambiental de responder aos desafios contemporâneos por meio da pesquisa e da inovação.

A PRODUÇÃO CIENTÍFICA COMO VETOR DE TRANSFORMAÇÃO

A ciência ocupa papel central na construção de soluções capazes de enfrentar os déficits históricos do saneamento brasileiro. Os trabalhos apresentados no congresso, associados às palestras, aos painéis, aos minicursos e às visitas técnicas, demonstraram a amplitude interdisciplinar do setor. Questões relacionadas ao novo marco regulatório do saneamento, às mudanças climáticas, à segurança hídrica, à economia circular, ao *environmental, social and governance* (ambiental, social e governança — ESG), à inclusão social, à gestão de recursos hídricos, aos resíduos sólidos e às soluções baseadas na natureza estiveram entre os temas de destaque.

Essa diversidade temática revela que os problemas do saneamento não podem mais ser tratados de forma fragmentada. A gestão dos recursos hídricos está diretamente relacionada à drenagem urbana, à conservação dos ecossistemas e à adaptação às mudanças climáticas. Da mesma forma, a gestão dos resíduos sólidos está vinculada à economia circular, à redução de impactos ambientais e à eficiência no uso de recursos. O tratamento e o reúso da água, por sua vez, assumem importância crescente diante dos riscos associados à escassez hídrica e à intensificação dos eventos extremos.

Nesse sentido, a incorporação de soluções baseadas na natureza, de estratégias de aproveitamento de águas pluviais, de técnicas de autodepuração e de experiências de recuperação de ecossistemas aquáticos urbanos amplia o repertório da engenharia

¹Universidade Federal de Pernambuco, Chemical Engineering Department – Recife (PE), Brasil.

*Autor correspondente: mauricio.motta@ufpe.br

sanitária e ambiental. A experiência do Lago Paranoá, apresentada como referência internacional de despoluição de lago urbano, exemplifica como conhecimento técnico, planejamento e gestão podem contribuir para a recuperação de ambientes degradados.

INOVAÇÃO PARA UNIVERSALIZAR

O próprio tema do 33.º CBESA estabelece uma relação fundamental: *não haverá universalização sustentável sem inovação*. Todavia, inovar no saneamento significa muito mais do que incorporar equipamentos ou tecnologias sofisticadas. Significa desenvolver formas de planejar, financiar, regular, operar e avaliar os serviços, considerando as especificidades territoriais, ambientais e sociais de cada região.

A Fitabes 2025 desempenhou papel essencial nesse processo ao aproximar empresas, pesquisadores, gestores e usuários de tecnologias e serviços destinados ao aprimoramento do saneamento ambiental. Com aproximadamente 4 mil m² de área e 91 empresas expositoras, a feira constituiu importante ambiente de demonstração de soluções tecnológicas e de aproximação entre o conhecimento produzido nas universidades e sua aplicação no mercado.

O Espaço Inovação, as *startups*, os projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação e o *hackathon* reforçaram ainda mais essa perspectiva. A atração de jovens pesquisadores e empreendedores é crucial para assegurar a renovação tecnológica do setor e estimular soluções capazes de responder a problemas complexos com maior eficiência, menor impacto ambiental e maior capacidade de adaptação.

A inovação, portanto, deve ser compreendida como instrumento de transformação social. Uma tecnologia só cumpre plenamente sua função quando contribui para ampliar o acesso aos serviços, reduzir desigualdades, melhorar a qualidade ambiental e promover maior eficiência e segurança dos sistemas.

SANEAMENTO DIANTE DA EMERGÊNCIA CLIMÁTICA

A emergência climática acrescenta uma nova dimensão aos desafios históricos do saneamento. Secas prolongadas, chuvas intensas, inundações, deslizamentos, ondas de calor e outros eventos extremos podem comprometer sistemas de abastecimento, esgotamento sanitário, drenagem e manejo de resíduos, afetando de maneira intensa as populações mais vulneráveis.

Por isso, pensar o futuro do saneamento significa necessariamente pensar em *resiliência climática*. Sistemas projetados exclusivamente para condições climáticas históricas podem não ser suficientes diante de um cenário de crescente variabilidade e imprevisibilidade. Planejamento, prevenção, monitoramento, tecnologias adaptativas, infraestrutura verde, soluções baseadas na natureza e gestão integrada dos recursos naturais devem ocupar posição central nas estratégias futuras.

Nesse aspecto, a criação do Espaço COP Saneamento e o lançamento da plataforma “Todos pelo Saneamento” representaram iniciativas relevantes ao conectar diretamente a agenda do saneamento às discussões climáticas internacionais e à preparação para a 30.ª Conferência das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (COP30). O movimento reforça uma compreensão fundamental: saneamento e clima são agendas inseparáveis.

O congresso buscou traduzir princípios de sustentabilidade em sua organização. Entre os resultados registrados, estão a realização de um evento carbono zero, a gestão completa dos resíduos, a utilização de 80% de fornecedores locais e impactos econômicos estimados em R\$ 36 milhões no Distrito Federal, além da geração de mais de 1.300 empregos diretos e indiretos.

FORMAÇÃO, COOPERAÇÃO E FORTALECIMENTO INSTITUCIONAL

A transformação do setor depende também da formação contínua de profissionais preparados para lidar com problemas cada vez mais interdisciplinares. A realização de 10 minicursos e seis visitas técnicas proporcionou oportunidades de capacitação e aproximação entre conhecimento teórico e experiência prática, contemplando temas como aproveitamento de águas de chuva, drenagem, resíduos sólidos, aterros sanitários, soluções baseadas na natureza, ESG, planos de saneamento e autodepuração de corpos receptores.

Essa dimensão formativa é particularmente importante para a engenharia sanitária e ambiental. O profissional contemporâneo precisa compreender não apenas os fundamentos tecnológicos dos sistemas, mas igualmente aspectos regulatórios, econômicos,

sociais, ambientais e climáticos. A complexidade dos problemas exige profissionais capazes de trabalhar de forma colaborativa e interdisciplinar.

Da mesma maneira, o fortalecimento institucional e a cooperação entre governos, prestadores de serviços, agências reguladoras, universidades, empresas e sociedade civil são condições indispensáveis para avançar na universalização. O congresso contribuiu para ampliar essas conexões e fortalecer redes de colaboração no setor.

OS DESAFIOS QUE PERMANECEM

Apesar dos avanços, os resultados do 33.º CBESA lembram a dimensão dos desafios que permanecem. A universalização ainda exige investimentos, planejamento de longo prazo, aperfeiçoamento regulatório, inovação, qualificação profissional e, sobretudo, compromisso político com as populações que permanecem sem acesso adequado aos serviços essenciais.

Não basta ampliar a infraestrutura. É necessário garantir a qualidade, continuidade, eficiência e sustentabilidade dos serviços, bem como considerar as desigualdades territoriais e sociais e desenvolver soluções compatíveis com diferentes realidades brasileiras. A universalização precisa ser compreendida como um processo de inclusão e de garantia de direitos.

Nesse cenário, a produção científica assume uma responsabilidade ainda maior. Pesquisas e trabalhos técnicos não devem permanecer restritos aos espaços acadêmicos. É fundamental fortalecer a transferência de conhecimento, aproximar pesquisadores dos gestores públicos e do setor produtivo e transformar resultados científicos em políticas, tecnologias e práticas capazes de produzir impactos concretos.

UM COMPROMISSO COM O FUTURO

O 33.º CBESA reafirmou que a engenharia sanitária e ambiental brasileira tem capacidade científica, tecnológica e institucional para contribuir de forma decisiva para a construção de um país mais sustentável. A expressiva participação de pesquisadores, estudantes, profissionais, gestores, empresas e organizações sociais demonstrou que existe uma comunidade ampla e qualificada disposta a enfrentar os desafios do setor.

O verdadeiro legado de um congresso, entretanto, não está apenas nos números alcançados, mas na capacidade de transformar debates em ações. As discussões realizadas, os trabalhos apresentados, as tecnologias demonstradas, as parcerias estabelecidas e os conhecimentos compartilhados precisam continuar produzindo efeitos após o encerramento do evento.

O desafio colocado pelo tema “Saneamento Para Quem Não Tem: Inovar para Universalizar!” permanece como uma convocação à sociedade brasileira. Universalizar significa assegurar que ninguém seja excluído do acesso à água segura, ao esgotamento sanitário, à gestão adequada dos resíduos e à drenagem urbana. Inovar significa criar condições para que essa universalização seja tecnicamente possível, economicamente viável, ambientalmente sustentável e socialmente justa.

À medida que o Brasil enfrenta os efeitos da emergência climática e se aproxima de importantes compromissos nacionais e internacionais de desenvolvimento sustentável, a engenharia sanitária e ambiental assume uma responsabilidade estratégica. Cabe ao setor produzir conhecimento, desenvolver tecnologias, qualificar profissionais, apoiar políticas públicas e fortalecer a cooperação institucional.

O 33.º CBESA demonstrou que ciência, inovação e cooperação podem constituir importantes vetores de transformação. O próximo passo é fazer com que esse conhecimento alcance os territórios e contribua para reduzir as desigualdades que ainda marcam o acesso ao saneamento no país.

O futuro do saneamento brasileiro será definido pela nossa capacidade de transformar conhecimento em ação, inovação em acesso e sustentabilidade em qualidade de vida.

Que este seja o compromisso permanente da engenharia sanitária e ambiental: inovar para universalizar, adaptar para resistir e transformar para incluir.

Efeitos dos parâmetros de projeto na remoção de células de *Raphidiopsis raciborskii* e de cilindropermopsinas no processo combinado de flotação por ar dissolvido e adsorção em carvão ativado em pó

*Effects of design parameters on the removal of *Raphidiopsis raciborskii* cells and cylindrospermopsins in the combined process of dissolved air flotation and adsorption onto powdered activated carbon*

Daniel Valencia-Cárdenas^{1*} , Cristina Celia Silveira Brandão¹ , Yovanka Pérez Ginoris¹ 

RESUMO

O presente estudo avaliou a eficiência do processo combinado de flotação por ar dissolvido (FAD) e adsorção em carvão ativado em pó (CAP) na remoção de células de *Raphidiopsis raciborskii* e cilindropermopsinas (CYN), investigando a influência dos parâmetros operacionais taxa de aplicação superficial (TAS), taxa de recirculação (TR), dosagem de CAP e o tipo de coagulante (quitosana ou sulfato de alumínio). A metodologia experimental incluiu duas fases, a primeira avaliando a TAS com TR fixa e a segunda avaliando a TR com TAS fixa. Os parâmetros de qualidade monitorados incluíram turbidez, cor aparente, absorvância UV a 254 nm ($UV_{254\text{ nm}}$), clorofila-a e CYN. Os resultados demonstraram que a dosagem de CAP foi o principal fator responsável pela remoção de toxinas e substâncias dissolvidas, enquanto a remoção de turbidez e cor aparente foi prejudicada pelo aumento da dosagem de CAP. As maiores remoções de CYN foram obtidas com 158 mg·L⁻¹ de CAP, mas os residuais da toxina permaneceram acima do limite recomendado pela legislação brasileira para água potável. Conclui-se que o processo combinado de FAD-CAP requer otimizações adicionais para atender aos padrões de qualidade da água.

Palavras-chave: flotação por ar dissolvido; adsorção; cilindropermopsina; cianobactérias; *Raphidiopsis raciborskii*.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the efficiency of a combined dissolved air flotation (DAF) and powdered activated carbon (PAC) adsorption process in removing *Raphidiopsis raciborskii* cells and cylindrospermopsins (CYN), investigating the influence of operational parameters surface application rate (SAR), recirculation rate (RR), PAC dosage, and coagulant type (chitosan or aluminum sulfate). The experimental methodology included two phases: the first evaluating SAR with fixed RR and the second evaluating RR with fixed SAR. The quality parameters monitored included turbidity, apparent color, UV absorbance at 254 nm ($UV_{254\text{ nm}}$), chlorophyll-a, and CYN. PAC dosage was the primary factor in removing toxins and dissolved substances, whereas increasing the PAC dosage impaired the removal of turbidity and apparent color. A PAC dosage of 158 mg·L⁻¹ resulted in the highest CYN removals, but residual levels of the toxin remained above the Brazilian legislation limit for potable water. In conclusion, the combined DAF-PAC process requires further optimization to ensure compliance with water quality standards.

Keywords: dissolved air flotation; adsorption; cylindrospermopsin; cyanobacteria; *Raphidiopsis raciborskii*.

INTRODUÇÃO

A ocorrência de cianobactérias em mananciais de abastecimento de água representa um desafio crescente para a segurança hídrica, intensificado pelo aumento da eutrofização

dos ambientes aquáticos. *R. raciborskii* (anteriormente denominada *Cylindrospermopsis raciborskii*) é uma espécie de cianobactéria capaz de se adaptar e colonizar ambientes tropicais, subtropicais e temperados (Haande *et al.*,

¹Universidade de Brasília - Brasília (DF), Brasil.

*Endereço para correspondência: Universidade de Brasília - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Anexo SG-12, Térreo, Brasília, DF. CEP: 70910-900. e-mail: dvalenciacar@gmail.com

2008) e é produtora da cianotoxina hidrossolúvel cilindropermopsina (CYN), que pode afetar vários órgãos e induzir efeitos carcinogênicos em exposições prolongadas (Falconer, 2001; Falconer; Humpage, 2006; Humpage; Falconer, 2003). Além disso, a ocorrência de *R. raciborskii* pode se intensificar sob condições de estresse ambiental, como alterações climáticas e enriquecimento de nutrientes, aumentando o risco de contaminação dos mananciais (Bouvy *et al.*, 1999; 2000).

No Brasil, o Sistema de Informação para Vigilância da Qualidade da Água para Abastecimento Humano (SISAGUA) e o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) relataram concentrações de CYN de 1,02 a 43,5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ em mananciais de abastecimento em 13 estados brasileiros (Rosado, 2022). A Portaria GM/MS nº 888 de 2021, do Ministério da Saúde Brasileiro, determina uma concentração máxima de CYN em água tratada de 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, o que representa um novo desafio para as estações de tratamento de água potável (ETA), do ponto de vista operacional.

Em geral, células de cianobactérias não são eficientemente removidas nos decantadores e podem atingir os filtros, reduzindo as carreiras de filtração e elevando o risco de gosto, odor e formação de subprodutos da desinfecção (Di Bernardo; Paz, 2008). Ainda mais crítico é o fato de que, caso a ETA não disponha de processos adaptados para a remoção eficaz das toxinas extracelulares, a água distribuída poderá representar risco à saúde pública. Nesse contexto, a flotação por ar dissolvido (FAD) se destaca como uma operação alternativa apropriada para a remoção de cianobactérias (Assis, 2006; Di Bernardo; Dantas, 2005; Oliveira, 2005), e apresenta como vantagens operacionais as menores dosagens de coagulante usadas e a maior concentração de sólidos no lodo, em comparação à sedimentação (Di Bernardo; Dantas, 2005).

Apesar de sua efetividade na remoção de cianobactérias, a FAD é ineficiente na remoção das cianotoxinas dissolvidas na água, como a CYN. Entretanto, a adsorção em carvão ativado em pó (CAP) tem se mostrado eficaz e economicamente viável para remover essa toxina; a taxa e a capacidade de adsorção de CYN são dependentes de características como área superficial e volume de micro

e mesoporos do material adsorvente (Ho *et al.*, 2008; Mashile; Dimpe; Nomngongo, 2019).

Embora ambas as tecnologias tenham sido investigadas isoladamente, a associação entre FAD e adsorção deve ser avaliada, especialmente quanto à influência de parâmetros operacionais como taxa de aplicação superficial (TAS), taxa de recirculação (TR) e dosagem de CAP. Estudos como o de Bui, Nam e Han (2015) apontam que a TR, quando inadequadamente adotada, pode comprometer a eficiência da flotação, enquanto Edzwald *et al.* (1992) sugerem a existência de limites mínimos e máximos para esses parâmetros.

O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência do processo combinado de FAD e adsorção em CAP na remoção de células de *R. raciborskii* e CYN. A pesquisa foi focada na influência dos parâmetros de projeto da FAD, como TAS e TR; assim como o efeito da dosagem de CAP e o uso de coagulantes alternativos, como a quitosana.

METODOLOGIA

Os ensaios de coagulação, floculação e FAD combinados com adsorção em CAP foram realizados em um floteste de colunas, projetado para simular o processo de FAD. A configuração experimental foi baseada na metodologia descrita por Pinto (1999). O sistema era composto de três colunas de acrílico transparente, cada uma com capacidade útil de 4 L, e uma câmara de saturação de ar. As colunas, de 8,5 cm de diâmetro interno e 100 cm de altura, tinham orifícios laterais para injeção de coagulante, suspensão de CAP e coleta de amostras. O fornecimento de água saturada às colunas era realizado por meio de registros de esfera e mangueiras de 1/2 polegada, conectadas à câmara de saturação, cuja pressão interna era controlada manualmente. A representação esquemática do floteste de colunas é ilustrada na Figura 1.

A água de estudo foi preparada a partir da inoculação de células e da diluição de extrato de *R. raciborskii* em água do lago Paranoá (Brasília/DF). As células de *R. raciborskii* (cepa CYP011K, produtora de CYN) foram cultivadas em meio de cultura ASM-1, em condições laboratoriais controladas de temperatura (24°C) e fotoperíodo de 12 horas. As células foram inoculadas na água

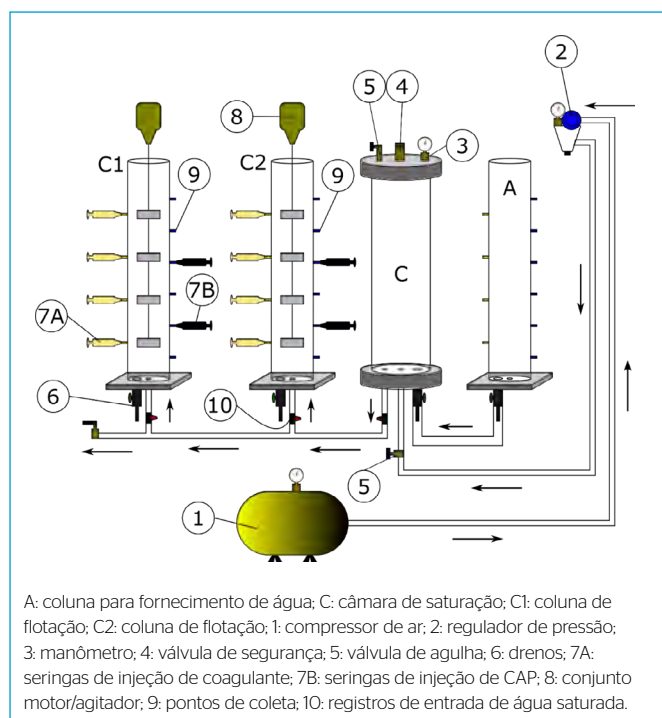


Figura 1 – Representação esquemática do flote teste de colunas

de estudo quando atingiram a fase exponencial de crescimento, caracterizada por uma densidade celular aproximada de 10^7 células/mL. O extrato de *R. raciborskii* foi preparado de acordo com o procedimento descrito por Valencia-Cárdenas (2016).

Foram testados os coagulantes sulfato de alumínio e quitosana. Foi utilizado o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{-}18\text{H}_2\text{O}$) grau PA. A quitosana foi adquirida na forma pulverizada (Sigma-Aldrich), com grau de desacetilação entre 0,75 e 0,85 e baixo peso molecular (50 a 190 kDa). A solução de quitosana foi preparada em meio ácido, usando ácido clorídrico, conforme descrito por García (2011), alcançando uma concentração de $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

O CAP avaliado é comercializado no Brasil e foi produzido a partir de madeira. O CAP tem área superficial BET de $904,8 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, $1,4 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ de microporos, $0,34 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ de mesoporos e ponto de carga zero (pH_{PCZ}) de 7,5. A suspensão de CAP foi preparada 24 horas antes da utilização nos ensaios seguindo o procedimento descrito por Valencia-Cárdenas (2016).

Os parâmetros operacionais e de projeto avaliados foram selecionados com base nos estudos prévios realizados por Valencia-Cárdenas (2016). Para a etapa de

coagulação, foi adotado um gradiente de velocidade de 780 s^{-1} , com tempo de mistura rápida de 1 minuto. A etapa de floculação foi conduzida com um gradiente de velocidade de 100 s^{-1} , durante 15 minutos. As dosagens de coagulantes e os valores de pH de coagulação também foram definidos a partir de ensaios de flotação realizados por Valencia-Cárdenas (2016). A dosagem otimizada de quitosana foi de $0,7$ e $9,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para o sulfato de alumínio. Os valores do pH de coagulação foram estabelecidos em 6,5 para a quitosana e 6,0 para o sulfato de alumínio. O CAP foi dosado no início da mistura rápida, permitindo 16 minutos de tempo de contato com a fase aquosa, antes do início da flotação.

No que se refere à adsorção em CAP, foram testadas três condições distintas de dosagem: 0 mg/L , representando o controle (sem adição de CAP); $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, correspondente à dosagem de referência, calculada a partir dos ensaios de capacidade adsorptiva realizados por Valencia-Cárdenas (2016); e $158 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, equivalente a uma dose 75% maior que a dosagem de referência. As dosagens de CAP avaliadas, de acordo com Ho *et al.* (2011), são consideradas altas e pouco práticas para serem aplicadas em ETAs. Ainda assim, essas dosagens foram utilizadas para avaliar a eficiência de remoção de CYN em função da dosagem de CAP aplicada e a influência da dosagem de CAP na remoção de turbidez, cor aparente, $\text{UV}_{254 \text{ nm}}$ e clorofila-a em função da TAS ou da TR.

As TAS e as TR foram selecionadas com base nas faixas comumente utilizadas em sistemas de FAD. Podem ser empregadas TAS convencionais ou de alta taxa — essa escolha influencia diretamente o dimensionamento e o desempenho do processo. As TAS convencionais variam entre 100 e $300 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{dia})$, enquanto os sistemas de alta taxa operam com TAS entre 300 e $1000 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{dia})$ (Crittenden; Trussell; Hand, 2012; Gregory; Edzwald, 2011). No presente estudo, foram avaliadas três TAS: $105,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{dia})$ e $211,2 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{dia})$, ambas dentro da faixa convencional, e $316,8 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{dia})$, considerada ainda como convencional, porém próxima do limite inferior da faixa de altas taxas.

Em relação à TR, ETAs que operam com FAD geralmente utilizam valores entre 6 e 12% (Crittenden; Trussell;

Hand, 2012; Gregory; Edzwald, 2011). Assim, para abranger essa faixa, foram testadas TR de 5, 10 e 15%.

Os ensaios foram realizados em duplicata e estruturados em duas fases com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros operacionais na remoção de turbidez, cor aparente, $UV_{254\text{ nm}}$, clorofila-a e CYN. Na primeira fase, foi investigado o efeito da TAS sobre a remoção dos parâmetros de qualidade da água de interesse. Nessa etapa, a TR foi mantida constante em 10%, sendo testadas todas as combinações possíveis entre as taxas de aplicação superficial (105,6; 211,2 e 316,8 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{dia})$) e as dosagens de CAP (0, 90 e 158 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Ao final dessa fase, foi selecionada a TAS que apresentou o melhor desempenho na remoção de turbidez e de cor aparente, para ser utilizada na fase seguinte. A segunda fase consistiu na avaliação da influência da TR. A TAS foi fixada no valor definido na fase anterior e, a partir dessa condição, foram testadas todas as combinações possíveis entre as diferentes TR (5, 10 e 15%) e as dosagens de CAP (0, 90 e 158 mg/L). Os mesmos parâmetros de qualidade da água avaliados na fase anterior foram considerados.

A turbidez, a cor aparente e a densidade celular de *R. raciborskii* foram determinadas seguindo os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association, 1999). A medição do pH foi realizada por potenciometria. A clorofila-a foi quantificada conforme o método descrito por Nusch (1980). A concentração de CYN foi determinada por meio de ensaio imunológico tipo ELISA, utilizando

kit comercial e seguindo o procedimento recomendado pelo fabricante (Abraxis, 2014).

Os resultados obtidos em cada fase experimental foram inicialmente analisados de forma exploratória, por meio da avaliação visual dos dados, com o objetivo de identificar os principais efeitos associados aos parâmetros operacionais e às dosagens de CAP. Posteriormente, a influência dos parâmetros avaliados foi quantificada por meio de análises de variância (ANOVA). Foram realizadas duas ANOVAs com três fatores cada uma. A primeira ANOVA foi realizada para identificar e classificar os efeitos individuais e combinados do tipo de coagulante, da TAS e da dosagem de CAP, considerando a proporção em que contribuíram para a variação observada nos resultados da primeira fase. A segunda ANOVA teve como objetivo avaliar os efeitos do tipo de coagulante, da TR e da dosagem de CAP nos resultados obtidos na segunda fase. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o *software* R, versão 4.4.1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da água de estudo

Os resultados de caracterização da água do lago Paranoá e da água de estudo empregada nos ensaios encontram-se na Tabela 1. A inoculação de culturas de *R. raciborskii* buscou reproduzir densidades celulares típicas de ambientes aquáticos eutrofizados. Os teores de clorofila-a na água de estudo situaram-se na faixa usualmente

Tabela 1 – Valores dos parâmetros de qualidade medidos na água de estudo utilizada neste trabalho

Parâmetro	Unidades	Água do lago Paranoá	Água do lago Paranoá inoculada com células e extrato de <i>R. raciborskii</i>
pH	-	6,55	6,98
Alcalinidade	$\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$	31	38
Turbidez	uT	3,76	8,83
Cor aparente	PtCo APHA	32	173
Condutividade	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	104	118,4
Absorbância $UV_{254\text{ nm}}$	cm^{-1}	0,025	0,044
Clorofila-a	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	9,2	143,02
Densidade celular	células/mL	-	$1,01\times 10^6$
Cilindrospermopsinas	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	-	52,00

Fonte: elaboração própria.

reportada para corpos d'água eutrofizados (Bartram *et al.*, 1999). Observou-se, ainda, aumento da turbidez e da cor aparente em relação à água do lago Paranoá, atribuído ao aumento da concentração de partículas coloidais e à presença de células de *R. raciborskii* em suspensão.

Avaliação da influência da taxa de aplicação superficial, da dosagem de carvão ativado em pó e do tipo de coagulante

Foram evidenciados padrões distintos de remoção entre os parâmetros de qualidade da água analisados. Os resultados dos ensaios de flotação que embasam essa análise estão ilustrados na Figura 2. Nos ensaios com quitosana, sem adição de CAP, a remoção de turbidez manteve-se alta, próxima de 91% e sem evidente dependência da TAS. Quando foi adicionado CAP, o aumento da TAS reduziu a eficiência de remoção. Com a dosagem de CAP de 90 mg·L⁻¹, as remoções de turbidez diminuíram. Na dosagem de CAP de 158 mg·L⁻¹, as remoções foram ainda menores, com percentuais de 56, 34 e 22%, para as taxas de 105,6; 211,2; e 316,8 m³/(m²·dia), respectivamente. A cor aparente

seguir uma tendência análoga. Em contraste, a remoção de absorvância UV_{254 nm} permaneceu estável e próxima de 61%, frente à variação de TAS e dose de CAP. A remoção de clorofila-a superou 99% quando foi adicionado CAP em todas as TAS. A remoção de CYN dependeu majoritariamente da dose de CAP, alcançando percentuais superiores a 83,35% com 158 mg·L⁻¹ de dosagem de CAP, independentemente da TAS.

Remoções comparáveis foram obtidas com sulfato de alumínio. Na ausência de CAP, as remoções de turbidez e de cor aparente mantiveram-se em torno de 85% para todas as TAS avaliadas. Com a adição de CAP, sobretudo na dosagem de 158 mg/L, a remoção de turbidez foi prejudicada, atingindo 3% na menor TAS e não superou 15% nas taxas superiores, enquanto a remoção de cor aparente teve impacto menos acentuado e permaneceu próxima de 47% em todas as TAS nessa maior dosagem de CAP. Diferentemente do comportamento observado para turbidez e a cor, UV_{254 nm} foi favorecida pela aplicação de CAP, com remoção média próxima de 82% a 158 mg·L⁻¹ de adsorvente. A clorofila-a apresentou remoções

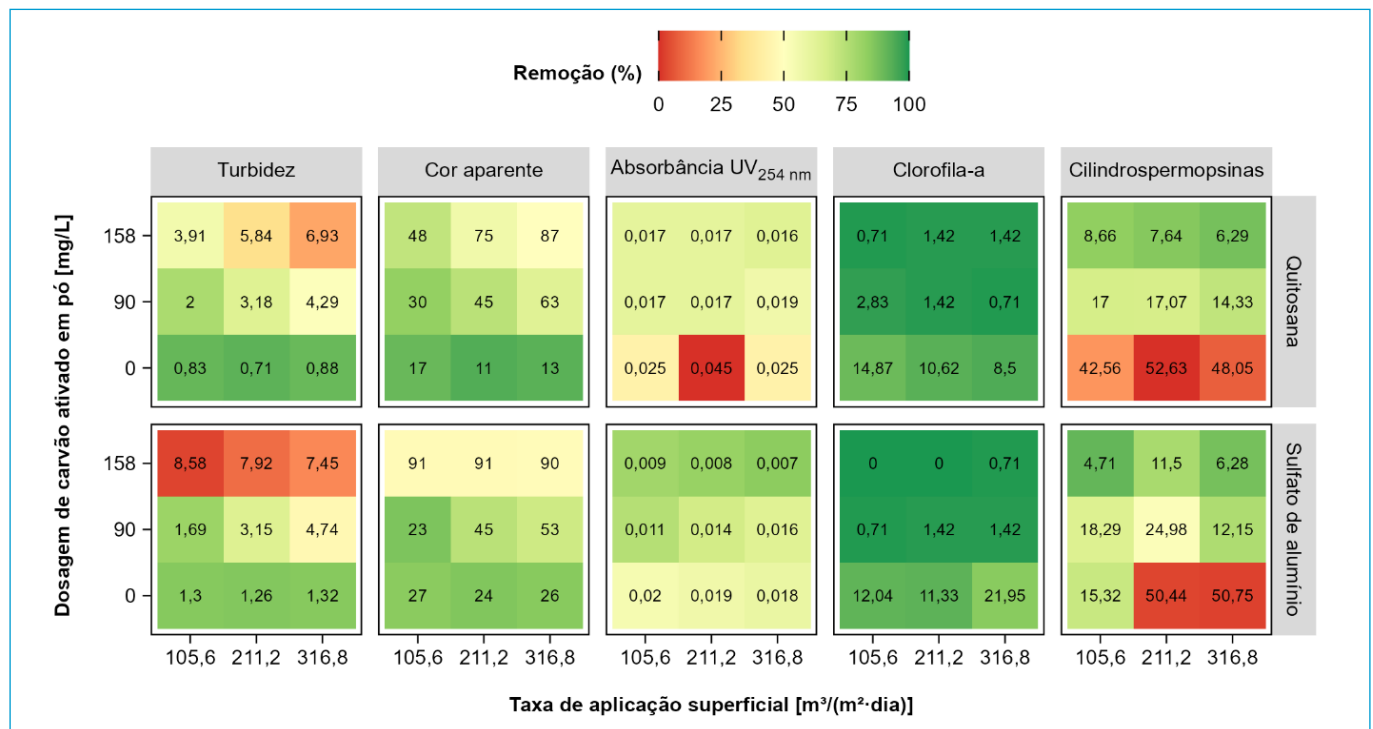


Figura 2 - Heatmap dos percentuais de remoção (escala de cores) e os residuais (valores no centro das células do heatmap) dos parâmetros de qualidade da água monitorados na avaliação da influência da taxa de aplicação superficial, da dosagem de carvão ativado em pó e do tipo de coagulante

superiores a 99,5% sempre que houve adição de CAP. Já a remoção de CYN aumentou com a dosagem de CAP, sendo mais eficiente a 158 mg·L⁻¹; mesmo assim, a concentração residual na água clarificada permaneceu acima do padrão de potabilidade brasileiro.

Os resultados dos ensaios com quitosana e com sulfato de alumínio mostraram um padrão comum. A dosagem de CAP aumentou a concentração de partículas em suspensão e impactou o processo de flotação, o que se traduziu na queda da eficiência de clarificação. Na ausência de CAP, a variação da TAS exerceu uma influência discreta sobre as remoções de turbidez e de cor aparente. Com o CAP, o aumento da TAS tendeu a reduzir progressivamente essas remoções, efeito compatível com o incremento de sólidos que passam a competir pela captura e pela ascensão das bolhas, conforme já relatado em estudos que combinaram pré-cloração, adsorção em CAP e flotação (Rosa, 2008).

A adição de CAP também favoreceu a redução de UV_{254 nm} e de CYN. Observou-se também um ganho adicional na remoção de clorofila-a quando o CAP foi aplicado, ainda que esse parâmetro represente majoritariamente a fração particulada de células de *R. raciborskii*. O aumento da dosagem de CAP resultou em incrementos na eficiência para esses parâmetros. Esse conjunto de resultados reforça a pertinência do uso combinado de FAD e adsorção, sobretudo para remover a fração extracelular de cianotoxinas.

Quando a TAS foi reduzida, a velocidade ascensional dos agregados floco-bolha também diminuiu, o que aumentou o tempo de interação e o tempo de residência

na coluna. Dessa forma, as bolhas de ar de menor diâmetro, que têm velocidades de ascensão inferiores às das bolhas maiores, conseguem alcançar a superfície com maior frequência. Como consequência, as menores TAS testadas resultaram em melhor desempenho para todos os parâmetros avaliados, sendo ainda mais evidente nos ensaios com maiores dosagens de CAP.

Embora as remoções tenham sido elevadas, os residuais de CYN permaneceram acima do valor de 1 µg·L⁻¹ estabelecido na Portaria GM/MS nº 888/2021 para água potável. Dessa forma, para atender ao padrão de potabilidade, recomenda-se ampliar o tempo de contato da água com o CAP, preferencialmente em unidade dedicada de adsorção, ou incorporar etapa complementar de tratamento, como a oxidação com cloro.

Em geral, os resultados indicam que a dosagem de CAP foi o fator que mais influenciou as remoções das substâncias dissolvidas, enquanto a variação da TAS exerceu papel secundário nesse conjunto de respostas. Em contrapartida, a TAS apresentou influência mais evidente sobre a clarificação, sobretudo na presença de CAP, o que se refletiu nas menores remoções de turbidez e de cor aparente.

A ANOVA de três fatores (Tabela 2) confirmou que a dosagem de CAP foi o principal determinante da eficiência de remoção, com diferenças estatisticamente significativas para todos os parâmetros (p < 0,05). Esses resultados foram condizentes com as tendências observadas e reforçam que o CAP, além de promover a remoção de contaminantes dissolvidos, influencia a eficiência global da clarificação, refletindo diretamente nos comportamentos de turbidez e cor aparente.

Tabela 2 – Resultados da ANOVA de três fatores para a identificação e a classificação dos efeitos individuais e combinados do tipo de coagulante, da taxa de aplicação superficial e da dosagem de carvão ativado em pó

Parâmetro	Efeito	Estatística F	Valor p	Significância (p < 0,05)	% da variação total
Clorofila-a	Dosagem de CAP	79,041	4,89×10 ⁻⁵	*	86,12
CYN	Dosagem de CAP	37,684	4,01×10 ⁻⁴	*	83,74
Turbidez	Dosagem de CAP	2106,819	2,87×10 ⁻⁹	*	82,26
Cor aparente	Dosagem de CAP	388,665	4,49×10 ⁻⁷	*	80,80
UV _{254 nm}	Dosagem de CAP	6,132	3,50×10 ⁻²	*	57,98

CAP: carvão ativado em pó.
Fonte: elaboração própria.

Avaliação da influência da taxa de recirculação, da dosagem de carvão ativado em pó e do tipo de coagulante

Nesta etapa, investigou-se a influência da TR, da dosagem de CAP e do tipo de coagulante mantendo a TAS fixa em 105,6 m³/(m²·dia). Esse valor foi selecionado a partir dos resultados da fase anterior por apresentar o melhor desempenho na remoção dos parâmetros de qualidade da água. Os resultados dos ensaios de flotação estão apresentados na Figura 3.

Nos ensaios com quitosana, a turbidez foi removida em cerca de 88% quando não houve adição de CAP, com pouca sensibilidade à variação da TR nas três condições avaliadas. Com 90 mg·L⁻¹ de dosagem de CAP, as eficiências diminuíram e houve melhor desempenho na TR de 10%, quando a remoção atingiu 77%. Ao aumentar a dose de CAP para 158 mg·L⁻¹, as remoções tornaram-se ainda menores, com valor máximo de 56% também na TR de 10%. A cor aparente acompanhou essa tendência, com os maiores percentuais registrados na ausência de CAP.

Diferentemente do comportamento observado na turbidez e na cor aparente, o processo forneceu maior eficiência na remoção de UV_{254 nm} na TR de 5% para todas as dosagens de CAP. Nessa TR, as remoções foram de 61, 77 e 89% para as dosagens de 0, 90 e 158 mg·L⁻¹, respectivamente.

A remoção de clorofila-a foi superior a 99% em todas as condições com adição de CAP, independentemente da TR. Na ausência de CAP, as remoções ficaram ao redor de 90%. Para CYN, o desempenho foi predominantemente dependente da presença de CAP, alcançando 67,5 e 87% para as dosagens de 90 e 158 mg·L⁻¹, respectivamente, com pouca influência da variação da TR. Sem CAP, foram registrados valores negativos nas TR de 5 e 15%, o que pode ser atribuído à incerteza do método ELISA e não ao aumento da concentração da toxina na água.

Com sulfato de alumínio, o comportamento foi similar ao observado com quitosana. Sem CAP, a remoção de turbidez aumentou discretamente com a TR, partindo de cerca de 80% na TR de 5% e alcançando aproximadamente 85% nas TR de 10 e 15%. Com 90 mg·L⁻¹ de dosagem de CAP, o melhor desempenho ocorreu na TR de 10%, enquanto

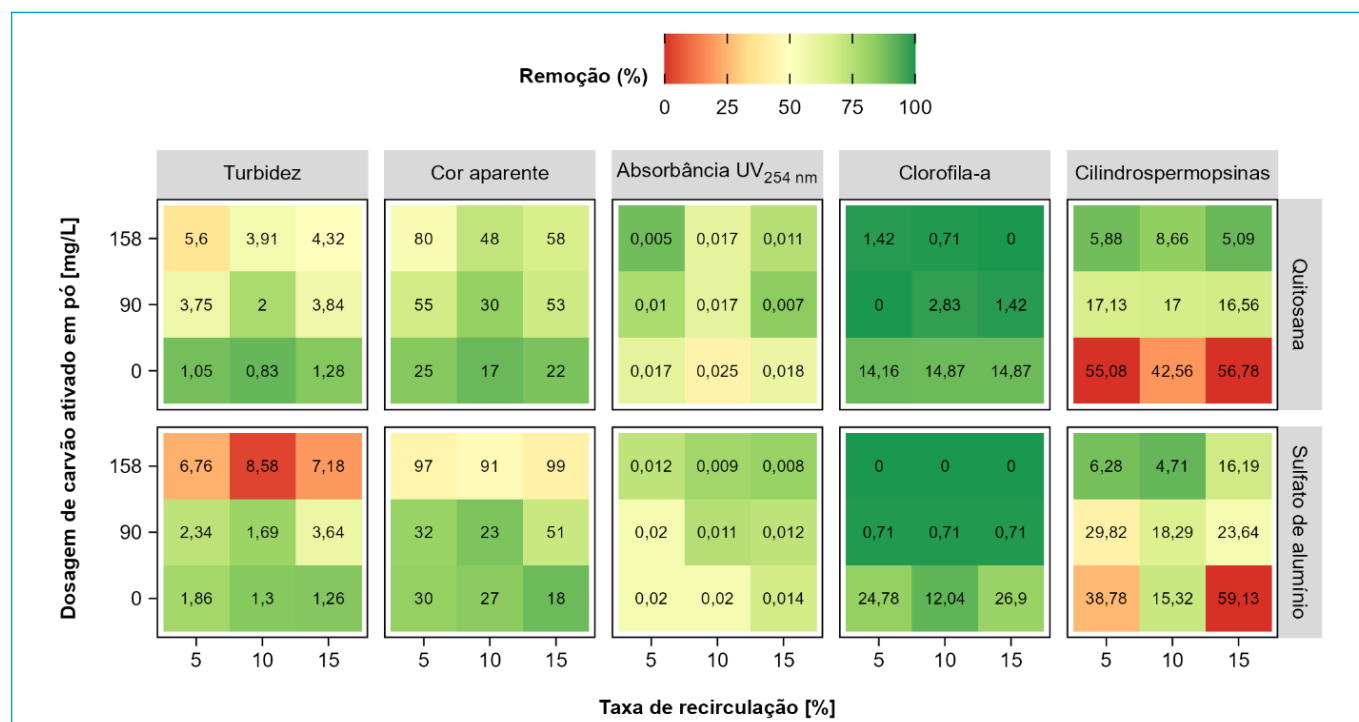


Figura 3 - Heatmap dos percentuais de remoção (escala de cores) e residuais (valores no centro das células do heatmap) dos parâmetros de qualidade da água na avaliação da influência da taxa de recirculação, da dosagem de carvão ativado em pó e do tipo de coagulante

a dosagem de 158 mg·L⁻¹ reduziu as eficiências em todas as condições. Para a cor aparente, os ensaios sem CAP e com 90 mg·L⁻¹ apresentaram resultados próximos nas TR de 5 e 10%; já a maior dose de CAP resultou novamente em menores remoções.

O aumento da dosagem de CAP favoreceu a remoção de UV_{254 nm}, principalmente nas TR de 10 e 15%, com remoções superiores a 80%. A remoção de clorofila-a se manteve acima de 99,5% em todas as condições com CAP. Já a remoção de CYN foi favorecida pelo uso do adsorvente, atingindo até 91% na TR de 10% quando aplicada a dosagem de 158 mg·L⁻¹.

De modo geral, para ambos os coagulantes, as TR de 10% proporcionaram os melhores resultados de remoção de turbidez, cor aparente e CYN, com destaque para as condições com adição de CAP. As três taxas avaliadas produziram remoções de turbidez compatíveis com a recomendação de 5,00 uT para água clarificada, conforme Di Bernardo e Paz (2008). No entanto, os ensaios sem CAP ou com 90 mg·L⁻¹ não alcançaram as maiores remoções de CYN, que ocorreram apenas com a dosagem de CAP de 158 mg·L⁻¹.

A influência da TR sobre o desempenho da flotação está coerente com o que descreve a literatura. Edzwald *et al.* (1992) apontam a existência de uma TR mínima necessária para assegurar a remoção efetiva de turbidez, com valor dependente da qualidade da água bruta. Bui, Nam e Han (2015) destacam que aumentos além desse patamar tendem a não produzir melhorias significativas. No sistema avaliado, a TR de 10% mostrou-se a condição mínima eficaz, pois o aumento para 15% não resultou em

melhorias apreciáveis nas remoções dos parâmetros de qualidade da água.

Conforme a Tabela 3, a análise de variância de três fatores confirmou a dosagem de CAP como o principal determinante dos comportamentos observados. Foi verificada diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) para clorofila-a, CYN, turbidez e cor aparente. Para UV_{254 nm}, o efeito da dosagem de CAP não foi estatisticamente significativo, o que indica que outros fatores podem ter exercido influência na remoção de substâncias orgânicas dissolvidas. Esses resultados corroboram a interpretação de que a dosagem de CAP é determinante para a remoção de toxinas, enquanto a TR atuou sobretudo na otimização operacional sem alterar o comportamento geral do tratamento.

Mecanismos de remoção

No presente estudo, a remoção de células de *R. raciborskii* pode ser relacionada às etapas de coagulação, floculação e FAD. A coagulação reduz a estabilidade coloidal das células e filamentos e de partículas presentes, permitindo a aproximação e a formação de flocos. A floculação promove a formação e o crescimento dos flocos. Por último, na FAD, microbolhas de ar aderem aos flocos, formando aglomerados floco-bolha, com tendência ascensional e que se concentram no lodo flotado.

Os resultados obtidos indicam que, para a remoção de células, a etapa limitante do processo não esteve associada à separação física propriamente dita na FAD, mas sim à formação de flocos com características adequadas para, posteriormente, favorecer a captura por microbolhas.

Tabela 3 – Resultados da ANOVA de três fatores para a identificação e a classificação dos efeitos individuais e combinados do tipo de coagulante, da taxa de recirculação e da dosagem de carvão ativado em pó

Parâmetro	Efeito	Estatística F	Valor p	Significância (p < 0,05)	% da variação total
Clorofila-a	Dosagem de CAP	27,422	9,59×10 ⁻⁴	*	94,33
CYN	Dosagem de CAP	13,176	6,00×10 ⁻³	*	86,71
Turbidez	Dosagem de CAP	36,586	4,35×10 ⁻⁴	*	82,24
Cor aparente	Dosagem de CAP	29,98	7,53×10 ⁻⁴	*	80,24
UV _{254 nm}	Dosagem de CAP	4,395	6,70×10 ⁻²	ns	69,86

CAP: carvão ativado em pó; ns: sem diferença significativa.
Fonte: elaboração própria.

A literatura indica que, quando as condições de coagulação e floculação são otimizadas, a FAD é capaz de promover elevadas remoções de células de cianobactérias, sem evidências de lise celular significativa (Teixeira; Rosa, 2006a).

As variações de TAS e de TR não resultaram em aumentos proporcionais na remoção de clorofila-a (indicador da contagem de cianobactérias), sugerindo uma robustez nas faixas testadas para esses parâmetros. Esse comportamento indica que a limitação do processo pôde estar mais relacionada à eficiência da desestabilização na coagulação e à formação dos flocos do que aos parâmetros operacionais avaliados. Em sistemas de FAD, a eficiência depende da probabilidade de colisão, da adesão e da estabilidade do aglomerado floco-bolha. Flocos com dimensões reduzidas, baixa resistência mecânica ou com uma neutralização de cargas superficiais insuficiente podem não ser devidamente flotados, mesmo com TAS e TR que favoreçam uma adequada quantidade de bolhas e de tempo de flotação suficiente.

Estudos comparativos entre FAD e sedimentação têm mostrado que a eficiência da FAD depende das condições de coagulação e floculação, sendo influenciada pela presença de matéria orgânica natural, que aumenta a demanda de coagulante e pode dificultar a formação de flocos (Teixeira; Rosa, 2006b). Portanto, os resultados sugerem que a otimização do processo deve priorizar o controle das condições de coagulação e floculação, uma vez que, sob tais condições, a etapa de separação por FAD tende a ser eficiente.

A elucidação dos mecanismos de remoção de CYN foi separada para a fração intracelular e para a fração dissolvida. A toxina intracelular é removida quando os aglomerados floco-bolha, contendo células de *R. raciborskii*, são removidos. A fração dissolvida não é removida efetivamente na FAD e, portanto, é importante a combinação com adsorção em CAP.

A remoção de CYN e de outras substâncias dissolvidas inicia-se no momento da dosagem do CAP na água, permanecendo em contato com a matriz aquosa durante as etapas subsequentes de coagulação, floculação e FAD. Ao longo desse período, a adsorção na superfície sólida do CAP constitui o principal mecanismo de remoção,

caracterizado pela adesão das moléculas dissolvidas à estrutura porosa do CAP. Paralelamente ao processo de adsorção, as partículas de CAP suspensas passam pelas mesmas etapas descritas para as células. Dessa forma, as partículas de CAP carregadas com CYN e outras substâncias dissolvidas são retiradas da matriz de água junto ao lodo flotado.

Um dos principais limitantes para a adsorção de CYN identificado foi o tempo de contato que as etapas de coagulação, floculação e FAD permitiram entre o CAP e a fase líquida. Presume-se que maiores tempos de contato poderiam favorecer uma maior adsorção de CYN dissolvida, uma vez que o processo pode apresentar limitações cinéticas. Valencia-Cárdenas (2016) demonstrou que um CAP com características físico-químicas semelhantes, aplicado na dosagem de 50 mg·L⁻¹, com um tempo de contato de 1 hora, reduziu em aproximadamente 85% uma concentração inicial de CYN dissolvida de cerca de 70 µg·L⁻¹, em uma matriz de água natural. Dessa forma, evidencia-se a influência do tempo de contato e da dosagem de CAP na eficiência de remoção das substâncias dissolvidas.

A Figura 4 apresenta um esquema dos principais mecanismos elucidados neste estudo para remoção de células de *R. raciborskii* e de CYN no processo de coagulação, floculação e FAD combinado com adsorção em CAP. A remoção de células ocorre pela desestabilização de cargas na coagulação, na formação de flocos na floculação e posterior adesão de microbolhas aos flocos, promovendo sua ascensão e formação do lodo flotado, junto à fração intracelular de CYN. Paralelamente, a CYN dissolvida e outras substâncias orgânicas dissolvidas são removidas predominantemente por adsorção, que permanece em contato com a água ao longo de todas as etapas do tratamento. As partículas de CAP carregadas com os compostos adsorvidos são, por sua vez, incorporadas aos flocos e removidas por FAD, integrando o lodo formado na superfície.

Considerações gerais sobre os resultados

Os resultados experimentais e a literatura reforçam que os principais mecanismos atuantes nesse processo são complementares. A FAD (incluindo a coagulação e a floculação) é a etapa determinante para células e material particulado,

enquanto o CAP é determinante para a fração dissolvida de toxinas e matéria orgânica. Em estudos prévios (Teixeira; Rosa, 2006a; 2006b), remoções de clorofila-a (como indicativo de células de *Microcystis aeruginosa*) por coagulação/floculação/FAD atingiram percentuais entre 92 e 98% em matrizes de água com diferentes teores de matéria orgânica, corroborando o padrão observado neste trabalho (remoções de clorofila-a > 95%) e sustentando a interpretação de que TAS e TR, nas faixas avaliadas, atuaram sem influenciar significativamente a remoção de células. Oliveira (2005) também relatou melhor desempenho da FAD em relação à sedimentação sob condições ótimas de coagulação, com remoções médias de clorofila-a de 89%

na FAD. Isso ratifica que a FAD é uma técnica apropriada para a remoção de células de cianobactérias.

Por outro lado, para as cianotoxinas dissolvidas, a literatura indica que a remoção depende de outros processos diferentes do tratamento convencional. Ho *et al.* (2011) demonstraram que dosagens de CAP entre 25 e 50 mg·L⁻¹ conseguiram reduzir uma concentração de CYN de 20 µg·L⁻¹ para valores inferiores a 1 µg·L⁻¹, com um tempo de contato variando entre 30 e 60 minutos, que não foi determinante na eficiência de adsorção; enquanto Valencia-Cárdenas (2016) reportou que, em água natural, a concentração inicial de CYN dissolvida de 69,30 µg·L⁻¹ foi reduzida para 9,53 µg·L⁻¹, com uma dose de CAP de 50

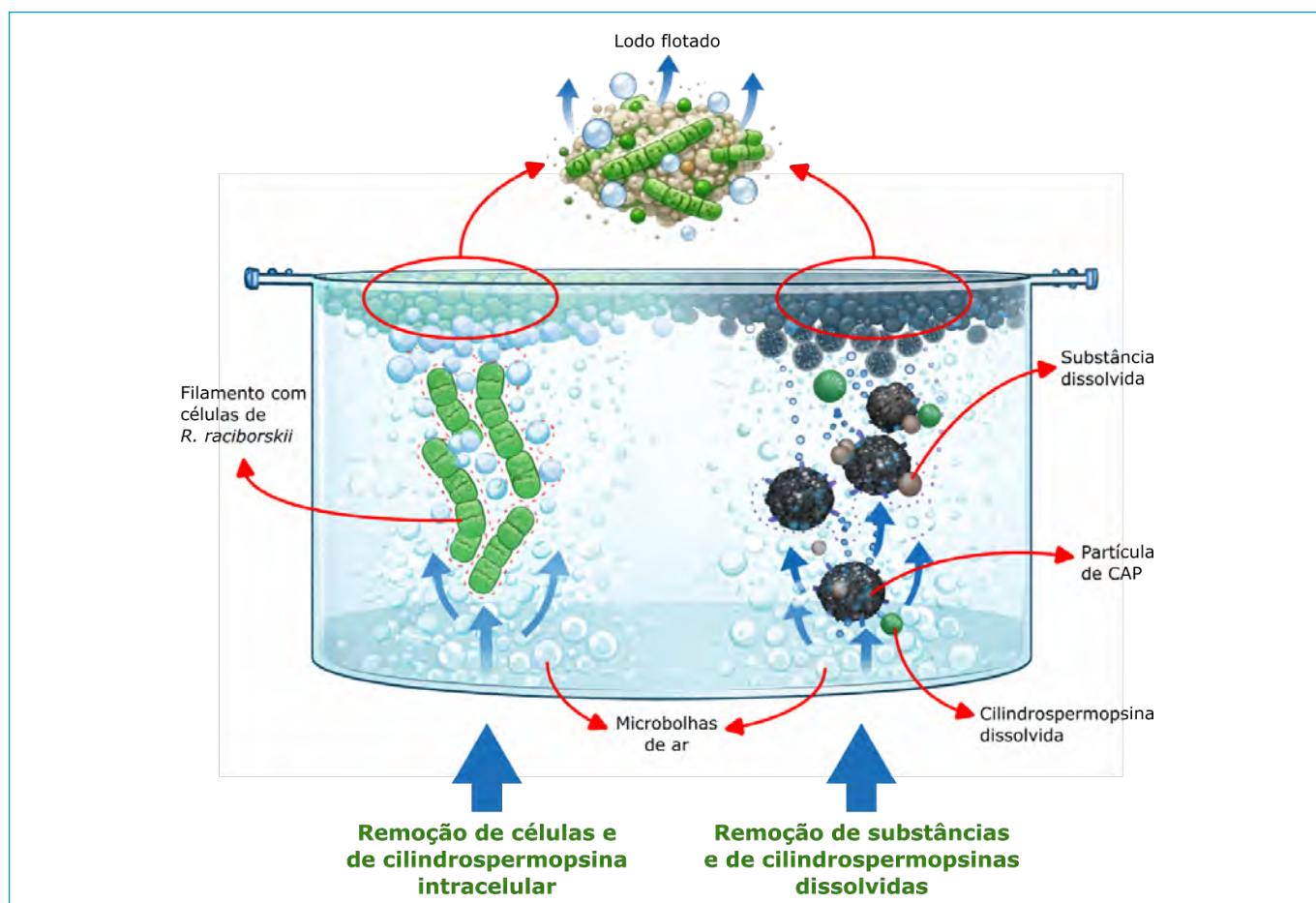


Figura 4 - Representação esquemática dos mecanismos envolvidos na remoção de células de *R. raciborskii* e CYN no processo combinado de flotação por ar dissolvido e adsorção em carvão ativado em pó. Após a dosagem do coagulante, ocorre a desestabilização das cargas superficiais das células e partículas suspensas, favorecendo a formação de flocos durante a floculação. Na etapa de flotação por ar dissolvido, microbolhas de ar aderem aos flocos formados, promovendo sua ascensão e formação do lodo flotado. A CYN intracelular é removida junto às células. Paralelamente, a fração dissolvida de CYN e outras substâncias orgânicas é removida predominantemente por adsorção na superfície do carvão ativado em pó. As partículas de carvão ativado em pó carregadas com compostos adsorvidos são incorporadas aos flocos e removidas por ascensão com as microbolhas, integrando o lodo flotado na superfície

mg·L⁻¹ com 1 hora de tempo de contato. Ambos os estudos evidenciam um efeito da matriz de água e da cinética sobre residuais de CYN.

Os resultados de estudos anteriores são coerentes com os resultados do presente estudo, em que um aumento da dosagem de CAP aumentou a remoção de CYN, mas sem atingir residuais inferiores a 1 µg·L⁻¹. Também foi possível auxiliar na interpretação da relação de compensação existente entre os parâmetros operacionais avaliados. O CAP acrescenta sólidos em suspensão e pode reduzir a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente por FAD, fenômeno também discutido por Rosa (2008). Assim, além de aumentar a dose, a otimização do processo pode requerer um aumento do tempo de contato com o CAP ou a utilização de unidades de tratamento complementares, mantendo TAS e TR que minimizem a perda de eficiência da FAD por sobrecarga de sólidos.

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram que o processo combinado de FAD e adsorção em CAP pode ser aplicado na remoção de células de *R. raciborskii* e de CYN no tratamento de água para consumo humano. Tanto a TAS quanto a TR não influenciaram de forma relevante a eficiência de remoção de clorofila-a, independentemente do coagulante utilizado. Em todas as condições avaliadas, as remoções de clorofila-a permaneceram acima de 95%, o que evidencia a robustez da flotação para a remoção de células.

As remoções de CYN e UV_{254 nm} dependeram da dosagem de CAP e foram pouco sensíveis às variações de TAS e de TR. A maior dosagem de CAP, 158 mg·L⁻¹, proporcionou as melhores eficiências, com remoções de CYN superiores a 85% sob várias condições operacionais. Esses

resultados destacam a importância da integração da adsorção para a remoção da fração extracelular das toxinas, uma vez que a FAD isolada não foi eficiente na remoção da CYN dissolvida.

As remoções de turbidez e de cor aparente foram influenciadas pela TAS, pela TR e pela dosagem de CAP. Maiores TAS e doses de CAP elevaram o teor de sólidos em suspensão e reduziram a eficiência da flotação, quando usados ambos os coagulantes. A TR de 10% ofereceu os melhores resultados, enquanto a TR de 15% não trouxe melhorias.

A análise estatística por ANOVA de três fatores confirmou a dosagem de CAP como o principal fator influente nas remoções de clorofila-a, CYN, turbidez e cor aparente. Esse resultado está de acordo com as observações experimentais e demonstra a relevância do CAP na eficiência do processo combinado.

Apesar de obter remoções elevadas, o residual de CYN na água clarificada permaneceu acima do valor de 1 µg L⁻¹ estabelecido no padrão de potabilidade vigente no Brasil. Para alcançar a conformidade com a legislação, recomenda-se ampliar o tempo de contato em unidades dedicadas à adsorção ou empregar outra técnica avançada complementar, de forma que se atenda ao padrão de qualidade.

Conclui-se que a associação entre FAD e adsorção em CAP, com quitosana ou sulfato de alumínio como coagulantes, é viável para enfrentar episódios de contaminação por cianobactérias e suas toxinas. A otimização operacional é ainda necessária para ajustar dosagens, TAS e TR às condições específicas de qualidade da água bruta, especialmente em cenários de ocorrência de florações no manancial de abastecimento.

REFERÊNCIAS

ABRAXIS. **Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Cylindrospermopsin in Water Samples**. 2014. Disponível em: <http://www.abraxiskits.com/wp-content/uploads/2015/02/Cylindrospermopsin-Insert-R021215.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2015.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20. ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1999.

ASSIS, R. S. **Remoção de *Microcystis aeruginosa* e Microcistinas por flotação por ar dissolvido** – Estudo em escala de bancada utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulantes. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2006.

BARTRAM, Jamie; CARMICHAEL, Wayne W.; CHORUS, Ingrid; JONES, Gary; SKULBERG, Olav M. Introduction. *In*: CHORUS, I.; BARTRAM, J. (eds.). **Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management**. London and New York: E & FN Spon, 1999. p. 12-24.

BOUVY, Marc; FALCÃO, Diogo; MARINHO, Mauro; PAGANO, Marc; MOURA, Ariadne. Occurrence of *Cylindrospermopsis* (Cyanobacteria) in 39 Brazilian tropical reservoirs during the 1998 drought. **Aquatic Microbial Ecology**, v. 23, p. 13-27, 2000.

BOUVY, Marc; MOLICA, Renato; OLIVEIRA, Simone de; MARINHO, Mauro; BEKER, Beatriz. Dynamics of a toxic cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) in a shallow reservoir in the semi-arid region of northeast Brazil. **Aquatic Microbial Ecology**, v. 20, n. 3, p. 285-297, 1999.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, 07 maio 2021.

BUI, Thi Thuy; NAM, Seong-Nam; HAN, Mooyoung. Micro-bubble flotation of freshwater algae: a comparative study of differing shapes and sizes. **Separation Science and Technology**, v. 50, n. 7, p. 1066-1072, 2015.

CRITTENDEN, John C.; TRUSSELL, R. Rhodes; HAND, David W. Gravity Separation. *In*: **MWH's Water Treatment: Principles and Design**. Hoboken, US: Wiley, 2012. p. 641-725.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. Campo Grande: RiMa, 2005. v. 1, 552 p.

DI BERNARDO, Luiz; SABOGAL-PAZ, Lyda Patricia. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: LIDIBE LTDA, 2008. v. 1, 540 p.

EDZWALD, James K.; WALSH, John P.; KAMINSKI, Gary S.; DUNN, Howard J. Flocculation and Air Requirements for Dissolved Air Flotation. **Journal (American Water Works Association)**, v. 84, n. 3, p. 92-100, 1992.

FALCONER, Ian R. Toxic cyanobacterial bloom problems in Australian waters: risks and impacts on human health. **Phycologia**, v. 40, n. 3, p. 228-233, 2001.

FALCONER, Ian R.; HUMPAGE, Andrew R. Cyanobacterial (Blue-Green Algal) Toxins in Water Supplies: Cylindrospermopsins. **Environmental Toxicology**, v. 21, n. 4, 2006, p. 299-304. <https://doi.org/10.1002/tox.20194>

GARCÍA, Indiana. **Removal of Natural Organic Matter to reduce the presence of Trihalomethanes in drinking water**. 2011. Tese (Doutorado) – Royal Institute of Technology, Estocolmo, 2011.

GREGORY, Ross; EDZWALD, James K. Sedimentation and Flotation. *In*: EDZWALD, J. K. (Ed.). **Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2011. p. 91-998.

HAANDE, Sigrid; ROHRLACK, Thomas; BALLOT, Andreas; RØBERG, Kjetil; BECK, Martin; WIEDNER, Claudia. Genetic characterisation of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanobacteria) isolates from Africa and Europe. **Harmful Algae**, v. 7, n. 5, p. 692-701, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.02.010>

HO, Lionel; LAMBLING, Paul; BUSTAMANTE, Heriberto; DUKER, Phil; NEWCOMBE, Gayle. Application of powdered activated carbon for the adsorption of cylindrospermopsin and microcystin toxins from drinking water supplies. **Water Research**, v. 45, n. 9, p. 2954-2964, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.014>

HO, Lionel; SLYMAN, Najwa; KAEDING, Uwe; NEWCOMBE, Gayle. Optimizing PAC and chlorination practices for cylindrospermopsin removal. **Journal - American Water Works Association**, v. 100, n. 11, p. 88-96, 2008. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2008.tb09776.x>

HUMPAGE, A. R.; FALCONER, Ian R. Oral Toxicity of the Cyanobacterial Toxin Cylindrospermopsin in Male Swiss Albino Mice: Determination of No Observed Adverse Effect Level for Deriving a Drinking Water Guideline Value. **Environmental Toxicology**, v. 18, n. 2, 2003, p. 94-103. <https://doi.org/10.1002/tox.10104>

MASHILE, Prudence Phodiso; DIMPE, Mogolodi K.; NOMNGONGO, Philiswa Nosizo. Application of waste tyre-based powdered activated carbon for the adsorptive removal of cylindrospermopsin toxins from environmental matrices: Optimization using response surface methodology and desirability function. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 54, n. 7, p. 1-7, 2019.

NUSCH, Eberhard A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. **Archiv für Hydrobiologie-Beiheft Ergebnisse der Limnologie**, v. 14, p. 14-36, 1980.

OLIVEIRA, Jailma Marinho Bezerra. **Remoção de *Cylindrospermopsis raciborskii* por Meio de Sedimentação e de Flotação**: Avaliação em Escala de Bancada. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2005.

PINTO FILHO, Antonio Carlos Teixeira. **Avaliação do potencial da flotação por ar dissolvido como pós-tratamento para efluentes do processo de lodos ativados, de reatores UASB e de lagoas de alta taxa.** 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 1999, 164 p.

ROSA, Andrey Alexsandro. **Pré-cloração associada à adsorção em carvão ativado em pó e flotação por ar dissolvido na remoção de microcistina presente em três diferentes concentrações em águas provenientes de reservatório eutrofizado.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

ROSADO, Lucas Taraleskof de Moraes. **Utilização do SISAGUA e SNIRH para avaliação da qualidade de água com foco em cianobactérias e cianotoxinas.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Brasília, 2022. 157 p.

TEIXEIRA, Margarida Ribau; ROSA, Maria João. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*. Part I: The key operating conditions. **Separation and Purification Technology**, v. 52, n. 1, p. 84-94, 2006a.

TEIXEIRA, Margarida Ribau; ROSA, Maria João. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*. Part II. The effect of water background organics. **Separation and Purification Technology**, v. 53, p. 126-134, 2006b.

VALENCIA-CÁRDENAS, Daniel. **Avaliação em escala de bancada da remoção de *Cylindrospermopsis raciborskii* e cilindrospermopsinas pelo processo combinado de flotação e adsorção em carvão ativado utilizando quitosana e sulfato de alumínio como coagulantes.** 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2016. 132 p.

Influência da composição de resíduos alimentares de grandes geradores na produção de metano em biodigestor de garagem

Influence of food waste composition from large generators on methane production in a garage-scale biodigester

Fernanda Peixoto Manéo^{1*} , Wilkson Sousa dos Santos¹ , Letícia dos Santos Macedo¹ ,
Adilson Vicente da Silva¹ , Claudia Echevengua Teixeira¹ 

RESUMO

O Brasil gerou, em 2023, cerca de 34 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos – fração orgânica (FORSU), em sua maioria destinados a aterros sanitários. Essa biomassa poderia gerar entre 1 e 3 bilhões de m³ de biogás por meio da digestão anaeróbia, configurando-se como alternativa estratégica para recuperação energética e mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Este estudo avaliou o potencial metanogênico de resíduos alimentares provenientes de grandes geradores urbanos, tratados em biodigestor anaeróbio do tipo garagem, operado em regime de batelada extrasseca. Inicialmente foi realizada a caracterização física e gravimétrica dos resíduos, seguida da preparação de oito misturas com diferentes composições, submetidas a ciclos operacionais com monitoramento da produção e composição do biogás. Os resultados indicam diferenças significativas na composição dos resíduos conforme sua origem, com escolas e restaurantes apresentando maior proporção de restos de alimentos processados, enquanto o supermercado apresentou predominância de frutas, legumes e verduras cruas. Na fase inicial de comissionamento operacional do sistema houve baixa produção de biogás em 2023 (≈ 7 m³/t), seguida de aumento expressivo da produção específica em 2024 (≈ 36 m³/t), indicando a estabilização do processo. O melhor desempenho foi observado no ciclo T2C2, que atingiu até 63% de metano no biogás e apresentou predominância de resíduos alimentares processados e uso de digestato como material estruturante. Os resultados reforçam a importância da caracterização prévia dos resíduos e do adequado comissionamento de sistemas anaeróbios para maximizar a eficiência energética da FORSU.

Palavras-chave: biodigestão; tratamento anaeróbio; fração orgânica de resíduos, biogás.

ABSTRACT

Brazil generated approximately 34 million tons of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) in 2023, most of which was disposed of in landfills. This biomass could generate between 1 and 3 billion m³ of biogas through anaerobic digestion, representing a strategic pathway for energy recovery and greenhouse gas (GHG) mitigation. This study evaluated the methanogenic potential of food waste from large urban generators treated in a garage-type anaerobic digester operated under dry-batch conditions. Initially, a physical and gravimetric characterization of the waste was performed, followed by the preparation of eight mixtures with different compositions, which were subjected to operational cycles with monitoring of biogas production and composition. The results indicated significant differences in waste composition according to their source, with schools and restaurants presenting a higher proportion of processed food residues, while supermarket waste was predominantly composed of raw fruits and vegetables. During the initial operational commissioning phase of the system, biogas production was low in 2023 (≈ 7 m³/t), followed by a substantial increase in specific biogas production in 2024 (≈ 36 m³/t), indicating process stabilization. The best performance was observed in cycle T2C2, which reached methane concentrations of up to 63% in the produced biogas, higher proportion of processed food waste and use of digestate as a structuring material. These results highlight the importance of prior waste characterization and proper commissioning of anaerobic systems to maximize the energy recovery efficiency of the OFMSW.

Keywords: biodigestion; anaerobic treatment; organic fraction of waste; biogas.

¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

***Endereço para correspondência:** Avenida Professor Almeida Prado, 532 – Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Núcleo de Sustentabilidade e Baixo Carbono – Prédio 59, sala 14. CEP: 05508-901, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: fpeixoto@ipt.br

INTRODUÇÃO

O Brasil gerou aproximadamente 75 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) em 2023, dos quais cerca de 45% correspondem à fração orgânica (FORSU), totalizando aproximadamente 34 milhões de toneladas de resíduos com elevado potencial de degradação biológica (Brasil, 2022; Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico, 2024). Apesar da publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), na qual estabelece a destinação apenas de rejeitos aos aterros (BRASIL, 2010); além das diretrizes estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), pelo Plano Nacional de Redução e Reciclagem de Resíduos Orgânicos Urbanos (PLANARO) e por instrumentos estaduais voltados à redução da disposição de resíduos em aterros sanitários, grande parte destes ainda é destinada para esses locais, resultando em emissões significativas de metano, um gás de efeito estufa de alto potencial, além de representar perda de oportunidades de recuperação energética e de nutrientes contidos na biomassa orgânica (Brasil, 2022; 2025; São Paulo, 2020).

Nesse contexto, o tratamento biológico da fração orgânica dos RSU destaca-se como alternativa estratégica para a valorização desses materiais. Entre as principais tecnologias disponíveis, a compostagem promove a estabilização aeróbia da matéria orgânica, enquanto a digestão anaeróbia possibilita a recuperação energética por meio da produção de biogás, além da geração de digestato, que pode ser utilizado como condicionador de solo. A digestão anaeróbia é considerada uma tecnologia consolidada para a valorização energética de resíduos orgânicos e para a integração entre a gestão de resíduos e a geração de energia renovável (Andreazzi *et al.*, 2017; Silva-Martínez *et al.*, 2020).

A digestão anaeróbia da FORSU apresenta potencial de produção de biogás entre 50 e 100 m³ por tonelada de resíduo tratado, com concentrações médias de metano entre 54 e 70 % (Silva; de Lucas Junior, 2022). No contexto brasileiro, esse potencial poderia resultar em uma produção anual estimada entre 1 e 3 bilhões de m³ de biogás, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

A eficiência do processo está diretamente relacionada às características físico-químicas do substrato e às condições

operacionais do sistema. Diferentes composições de resíduos alimentares influenciam o rendimento metanogênico, uma vez que resíduos de frutas e verduras apresentam potencial de produção de metano em torno de 420 L kg⁻¹ de sólidos voláteis, enquanto resíduos alimentares processados alcançam cerca de 530 L kg⁻¹ (Bouallagui *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2014). Alguns experimentos também demonstram que variações na composição do substrato influenciam na produção e na qualidade do biogás (Monteiro *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, sistemas de digestão anaeróbia com alto teor de sólidos (*High Solid Anaerobic Digestion* — HSAD), frequentemente implementados em biodigestores do tipo garagem ou em túneis de metanização operados em batelada, têm se destacado no tratamento da FORSU por permitirem o processamento de resíduos heterogêneos com elevado teor de sólidos (Silva-Martínez *et al.*, 2023). Apesar do avanço tecnológico, sua adoção na América Latina ainda enfrenta barreiras institucionais, regulatórias e econômicas (Bottausci *et al.*, 2022; Silva-Martínez *et al.*, 2020). Além disso, fatores como pré-tratamento do substrato, seleção de inóculo e estabilidade da comunidade microbiana influenciam o desempenho dos reatores (Ventorino *et al.*, 2018).

Nessa perspectiva, a caracterização adequada dos resíduos orgânicos é considerada etapa essencial para o planejamento e o dimensionamento de sistemas de digestão anaeróbia, permitindo avaliar o potencial de produção de biogás e subsidiar estratégias de mitigação de metano (United States Environmental Protection Agency; Global Methane Initiative, 2024).

Diante desse cenário, o presente estudo avaliou o potencial metanogênico de oito misturas de resíduos alimentares tratadas em túneis de metanização de um biodigestor localizado em Bertioga (SP), incluindo a caracterização gravimétrica dos resíduos, o acompanhamento do processo durante a etapa de comissionamento e o monitoramento da composição do biogás ao longo de ciclos operacionais sucessivos. O objetivo foi compreender a influência da composição do substrato no desempenho do processo e contribuir para o fortalecimento da base técnico-científica necessária à expansão da digestão anaeróbia da FORSU no Brasil.

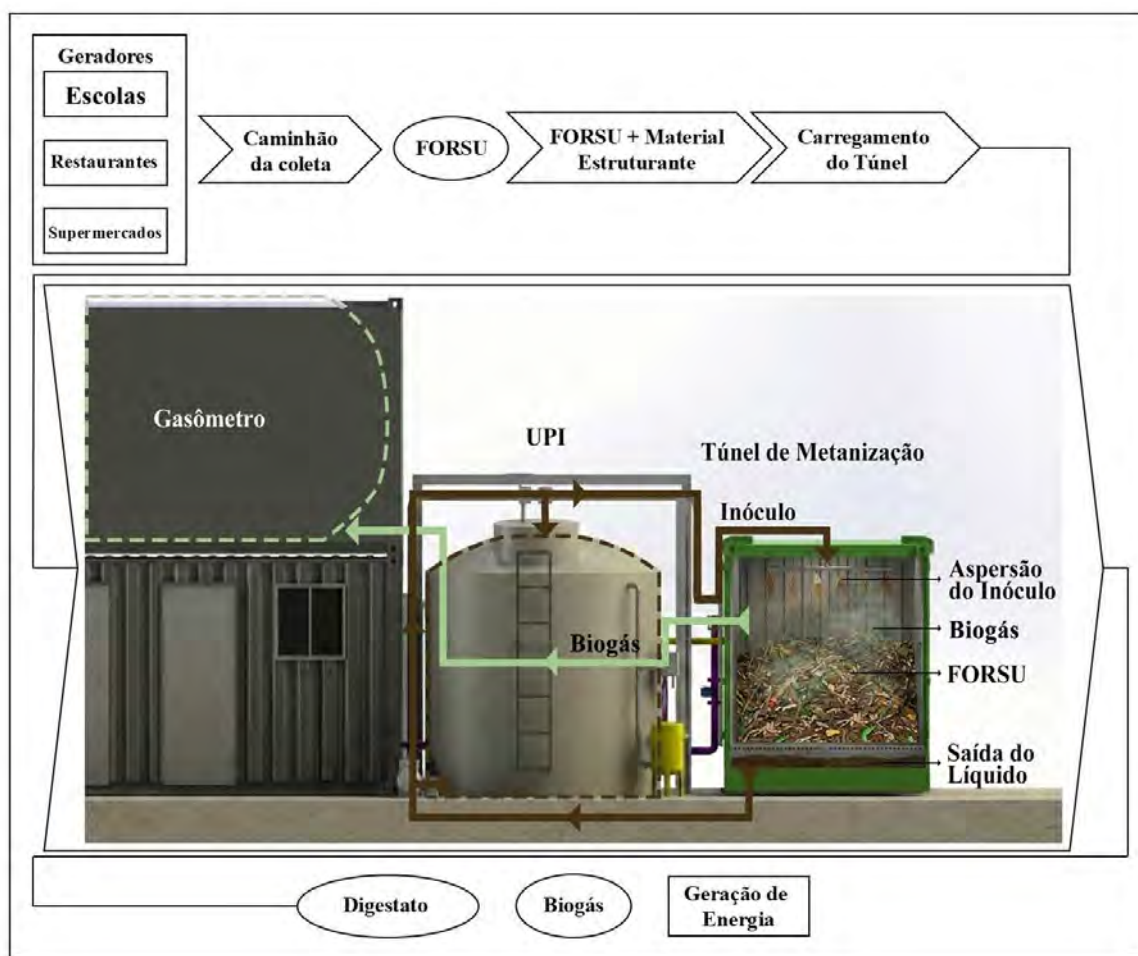
O presente estudo teve como objetivo principal avaliar, em escala piloto, a influência da composição de resíduos alimentares provenientes de grandes geradores, e de estratégias operacionais (uso de material estruturante e recirculação de inóculo) na produção e qualidade do metano gerado em biodigestor do tipo garagem operado em sistema de batelada extrasseca.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado em um biodigestor de tratamento anaeróbio de FORSU localizado em Bertioga (SP), com capacidade de até 60 t/mês, operando em sistema de batelada com quatro túneis de metanização extrassecos, cada um com capacidade aproximada de 15 toneladas. Foram avaliados 8 ciclos operacionais, sendo 3 em 2023 e 5 em 2024.

O sistema conta com uma Unidade de Produção de Inóculo (UPI), responsável por aquecer (37°C), homogeneizar e recircular o percolado, que é aspergido nos túneis para acelerar a atividade microbiana e a produção de metano. A aspersão ocorre na fase de ativação metanogênica, até o biogás atingir 30% de metano, iniciando a fase metanogênica, e quando ocorre a queda do volume e da qualidade do biogás, o processo é encerrado.

Cada ciclo operacional é composto, em geral, das etapas de abastecimento (5 dias), fase aeróbia (2 dias), ativação metanogênica (2 dias) e fase metanogênica (21 dias), intervalos que podem variar conforme operação real da planta. Após o abastecimento, a operação é toda monitorada remotamente por um sistema automatizado. A Figura 1



Fonte: elaborada pelos autores.

FORSU: fração orgânica de resíduos sólidos urbanos; UPI: Unidade de Produção de Inóculo.

Figura 1 – Sistema operacional do biodigestor

apresenta um esquema ilustrativo dos ciclos operacionais no interior dos túneis de metanização.

Durante a fase metanogênica, todo o biogás produzido é medido e direcionado a um gasômetro com capacidade de 25 m³, onde ocorre a mistura do biogás proveniente dos túneis de metanização e da UPI, que produz biogás de maior qualidade e quantidade. Para viabilizar o reaproveitamento energético, a mistura deve conter, pelo menos, 60% de metano.

O material tratado nos túneis é composto de cerca de 70% de restos alimentares e 30% de material estruturante, utilizado para evitar a compactação e melhorar a atuação do inoculante. Inicialmente foi utilizado resíduo de poda triturado como estruturante e, nos ciclos posteriores, passou-se a utilizar o próprio digestato recirculado no processo.

A capacidade estimada de produção de biogás, pelo biodigestor, quando em pleno funcionamento, é de até 4.800 m³/mês, com potencial de geração energética de aproximadamente 5 MWh/mês (Figura 2). O biogás armazenado no gasômetro é convertido em energia elétrica a partir de um gerador, que abastece a própria planta.

Obtenção e caracterização dos materiais de entrada e saída dos túneis

Os materiais de entrada e saída dos túneis de metanização são referentes aos resíduos alimentares (entrada) e ao inóculo, digestato e biogás (saída). Os ensaios e a referência das metodologias, realizados em cada uma das matrizes, estão apresentados na Tabela 1.

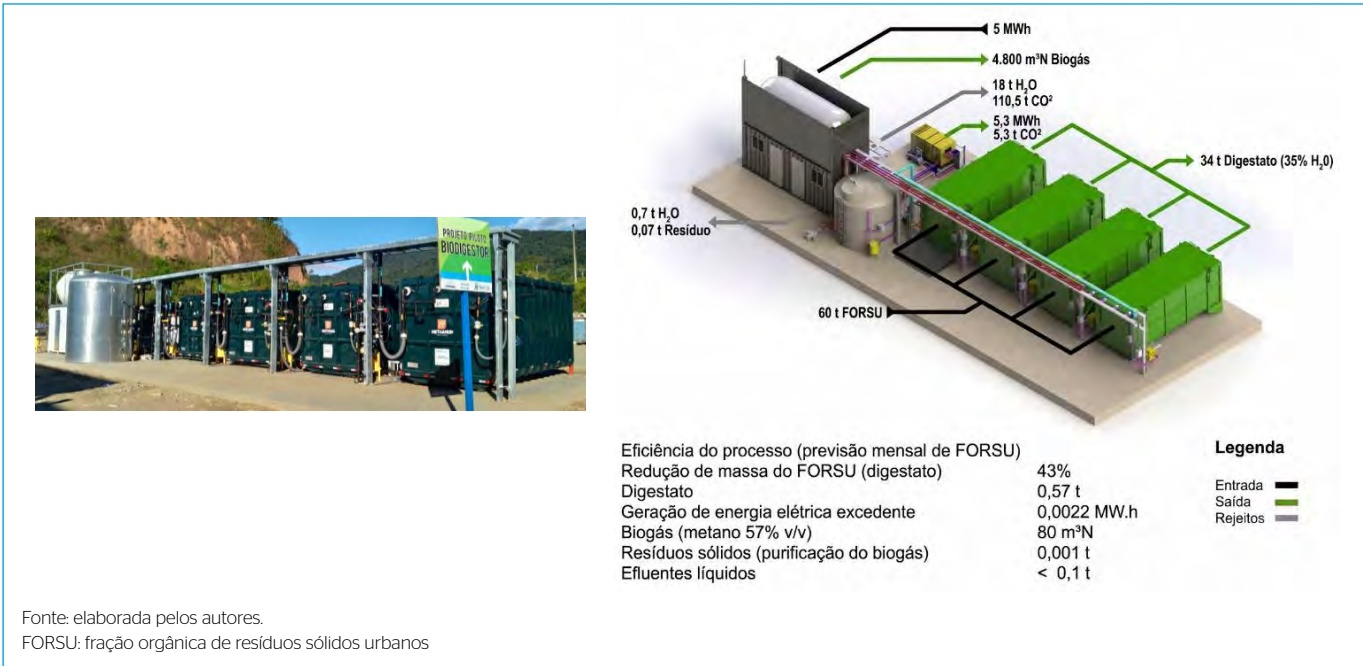


Figura 2 - Planta de biodigestão de FORSU

Tabela 1 - Referências para a realização dos ensaios

Ensaio	Matriz	Metodologia
Determinação da composição física e gravimétrica	Resíduos alimentares	NBR/ABNT 10.007/2004; ASTM D5231-92/2016, Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Compromisso Empresarial para Reciclagem (2018)
Determinação de sólidos totais	Inóculo	Agência Nacional de Energia Elétrica (2020)
pH	Inóculo e digestato	Lima (1997)
Volume do biogás	Biogás	Equipamento de medição: G4 (LAO Indústrias)
Composição do biogás	Biogás	Analizador GA3000

Fonte: elaborada pelos autores.

Os resíduos alimentares foram obtidos já segregado na fonte, por meio de coleta seletiva de orgânicos em grandes geradores, com monitoramento da massa coletada em cada um deles. A coleta foi realizada em 36 escolas municipais, um supermercado, um restaurante e uma rede hoteleira.

Foi realizada determinação da composição física e gravimétrica dos resíduos coletados em cada um dos estabelecimentos — com exceção da rede hoteleira, pois esta foi interrompida — a partir da separação da FORSU por classes pré-determinadas, conforme apresentado na Tabela 2, seguida da pesagem do material segregado, e assim obtida a porcentagem de cada um.

As amostragens de inóculo no ano de 2023 foram realizadas na UPI (em pontos na base, no meio e no topo), considerando-se a média aritmética dos três pontos. Em 2024, as amostras passaram a ser coletadas diretamente das válvulas de entrada de inóculo em cada túnel, a fim de se obter um resultado mais individualizado e representativo.

A determinação de ST foi feita por secagem da amostra em estufa a 105°C até peso constante. O pH foi medido com pHmetro digital previamente calibrado (pH 4 e 7), com leitura após estabilização. Para o digestato, o pH foi determinado após diluição, filtração e medição na fração filtrada.

O volume de biogás foi dimensionado por medidores de diafragma, modelo G4 (LAO), certificados pelo INMETRO, instalados nas saídas dos túneis e da UPI, em

direção ao gasômetro, operando pelo princípio de deslocamento positivo. Ou seja, apenas quando o biogás é encaminhado para reaproveitamento energético. A composição do biogás foi determinada diariamente na UPI e nos túneis durante a ativação e a fase metanogênica, por equipamento GEOTECH GA3000, tecnologia infravermelho não dispersivo, calibrado para mistura padrão de 60% CH₄ e 40% CO₂.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme resultados da determinação da composição física e gravimétrica realizada nos resíduos coletados nos grandes geradores do município de Bertogioga, verificou-se que as escolas e o restaurante têm uma composição similar, com uma média de, respectivamente: 6 e 2% de recicláveis; 16 e 5% de frutas; 2 e 7% de proteína animal; 26 e 45% de vegetais; e 50 e 41% de alimento processado (Figura 3). Esses resultados são similares aos apresentados por Saeteros-Hernández *et al.* (2025), no qual demonstrou que os restos de alimentos provenientes de um restaurante no Equador continham 21 a 24% de recicláveis; 34 a 38% de vegetais; 10 a 15% de frutas; 15 a 20% de proteína animal; e 12 a 16% de proteína vegetal (grãos). Quanto aos resíduos do supermercado, estes apresentaram maiores porcentagens de frutas (56%) e vegetais crus (37%), e menores proporções de resíduos processados (0%) e proteína animal (1%).

A origem do material tratado em cada ciclo foi estimada a partir da pesagem dos resíduos por estabelecimento e do rastreamento de sua entrada nos túneis de metanização (Tabela 3). Com base nesses dados e nos de composição gravimétrica de cada estabelecimento, foi possível determinar a composição dos materiais tratados em cada ciclo de operação (Tabela 4).

Os resíduos alimentares coletados permaneceram armazenados em um dos túneis de metanização até atingirem massa suficiente para o início do ciclo, evitando-se assim a presença de grande volume vazio no interior dos túneis, no qual o biogás permaneceria confinado. Para o primeiro ciclo, o período de armazenamento foi relativamente grande, visto que o início da coleta de orgânicos estava em fase de consolidação. Conforme apresentado

Tabela 2 – Materiais segregados no ensaio de determinação da composição física e gravimétrica

Classes de resíduo	Descrição
Casca de banana	-
Coco	Inteiro ou pedaços de casca
Outras frutas	Diversas
Ovo	Inteiro e/ou casca
Peixe	Espinha e carne
Carne (frango, porco, carne vermelha)	Diversas
Legumes e verduras	Inteiras
Resto de preparação de alimentos	Cascas de legumes e verduras
Resto de alimento processado	Sobras de alimentos de pratos e panelas
Outros orgânicos (especificar)	-

Fonte: elaborada pelos autores.

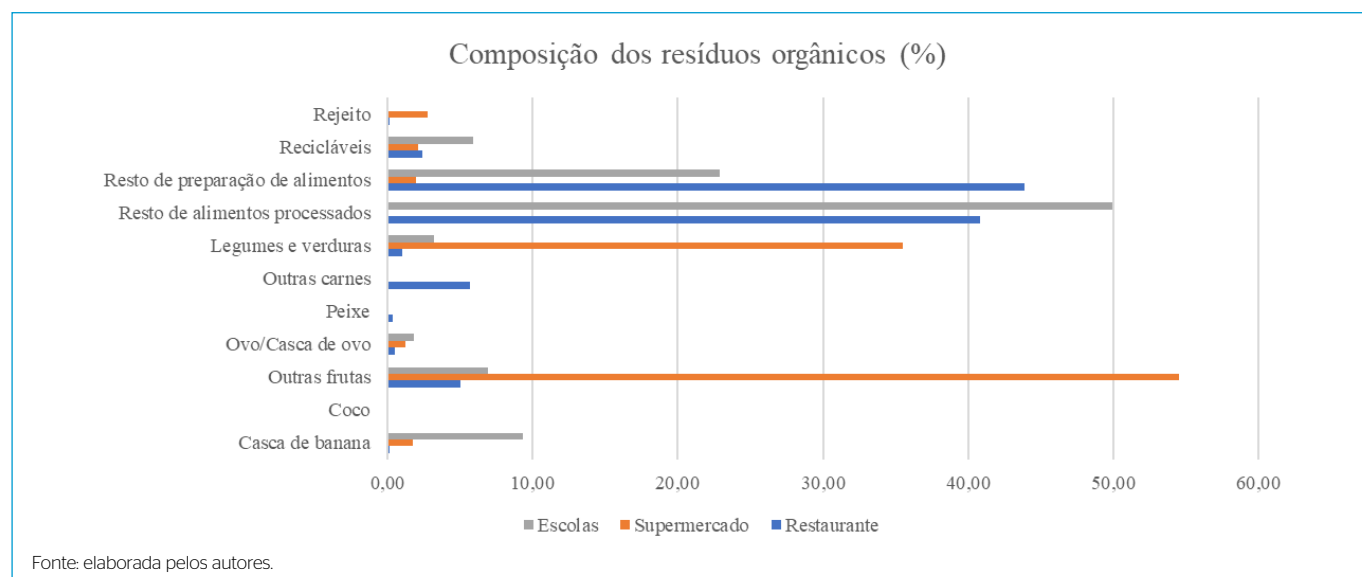


Figura 3 - Composição dos resíduos orgânicos dos grandes geradores

Tabela 3 - Origem da massa de resíduos alimentares tratados em cada um dos ciclos de operação

Túnel/Ciclo	Material estruturante		Resíduos alimentares		Origem dos resíduos alimentares (kg)			
	(kg)	(%)	(kg)	(%)	Escolas	Sesc	Supermercado	Restaurante
T1/C1	3.738	27	9.981	73	5.865	2.666	-	-
T1/C2	2.620	18	12.310	82	4.385	2.975	4.560	390
T1/C3	3.935	41	5.690	59	2.920	1.515	1.256	-
T1/C4	2.250	31	5.120	69	3.587	-	1.532	-
T1/C5	3.167	30	7.390	70	6.071	-	1.225	94
T1/C6	3.680	44	4.600	56	4.600	-	-	-
T2/C1	6.935	49	7.110	51	2.146	2.018	2.946	-
T2/C2	3.120	25	9.240	75	8.191	-	1.049	-

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 4 - Composição dos resíduos alimentares tratados em cada ciclo (kg)

Classes de resíduos	T1C1	T1C2	T1C3	T1C4	T1C5	T1C6	T2C1	T2C2
Casca de banana	586	523	315	384	626	457	269	833
Coco	0	5	1	2	1	0	3	1
Outras frutas	564	3.037	993	1.118	1.134	339	1.903	1.187
Ovo/Casca de ovo	129	163	82	90	136	90	91	175
Peixe	11	13	6	0	0	0	8	0
Outras carnes	192	196	88	0	5	0	117	0
Legumes e verduras	227	1.840	571	678	652	156	1.164	659
Resto de alimentos processados	4.334	3.731	2.181	1.902	3.259	2.439	1.981	4.344
Resto de preparação de alimentos	2.481	2.668	1.415	902	1.541	1.117	1.486	2.010
Recicláveis	0	0	0	0	0	0	0	0
Rejeito	6	135	39	44	35	0	87	30
TOTAL	8.531	12.310	5.690	5.120	7.390	4.600	7.110	9.240

Fonte: elaborada pelos autores.

na Tabela 5, o período de cada fase de cada ciclo de operação, após o abastecimento, variou de 19 a 100 dias, considerando a fase aeróbia, a ativação metanogênica e a fase metanogênica.

Conforme apresentado na Figura 4, que mostra o monitoramento dos ciclos operacionais em ordem cronológica, o biodigestor passou por uma fase de comissionamento em 2023, com melhoria progressiva dos resultados ao longo dos ciclos, especialmente na produção de biogás.

Os ciclos operacionais realizados em 2023, correspondentes aos três primeiros ciclos do túnel 1 e ao primeiro ciclo do túnel 2, apresentaram apenas um dia de biogás com concentração de CH_4 acima de 30%, no ciclo T1C1, que atingiu 54%, com encaminhado de 1 m^3 deste para o gasômetro. Esse pico de CH_4 no T1C1 ocorreu após monitoramento remoto contínuo da temperatura interna do túnel por quase 24 horas, com intervenções na aspersão automatizada de inóculo para corrigir variações térmicas, que oscilaram entre 18°C durante a noite e 100°C nos períodos mais quentes do dia. Essa alta temperatura foi atingida no início do processo de ativação metanogênica, em período com dias de muito sol e altas temperaturas externas ao túnel, que impactaram consideravelmente a temperatura interna deste, devido à permanência em local externo e com incidência de sol direto. Nos ciclos subsequentes, manteve-se o monitoramento da temperatura interna dos túneis, que permaneceu entre 18 e 45°C, controlada por meio de aspersão de inóculo. A temperatura não foi registrada diariamente, apenas a sua variação.

Para o ano de 2024, o cenário se mostrou mais promissor, com um reaproveitamento de 36 m^3 de biogás proveniente dos túneis de metanização e um total de 78 dias de fase metanogênica neste ano, com produção de biogás e concentrações máximas de CH_4 de 63% no T2C2 e 18 m^3 de biogás reaproveitado; 37% no T1C4 e 4 m^3 de biogás reaproveitado; 42% no T1C5 e 45% no T1C6, ambos com 7 m^3 de biogás reaproveitado em cada.

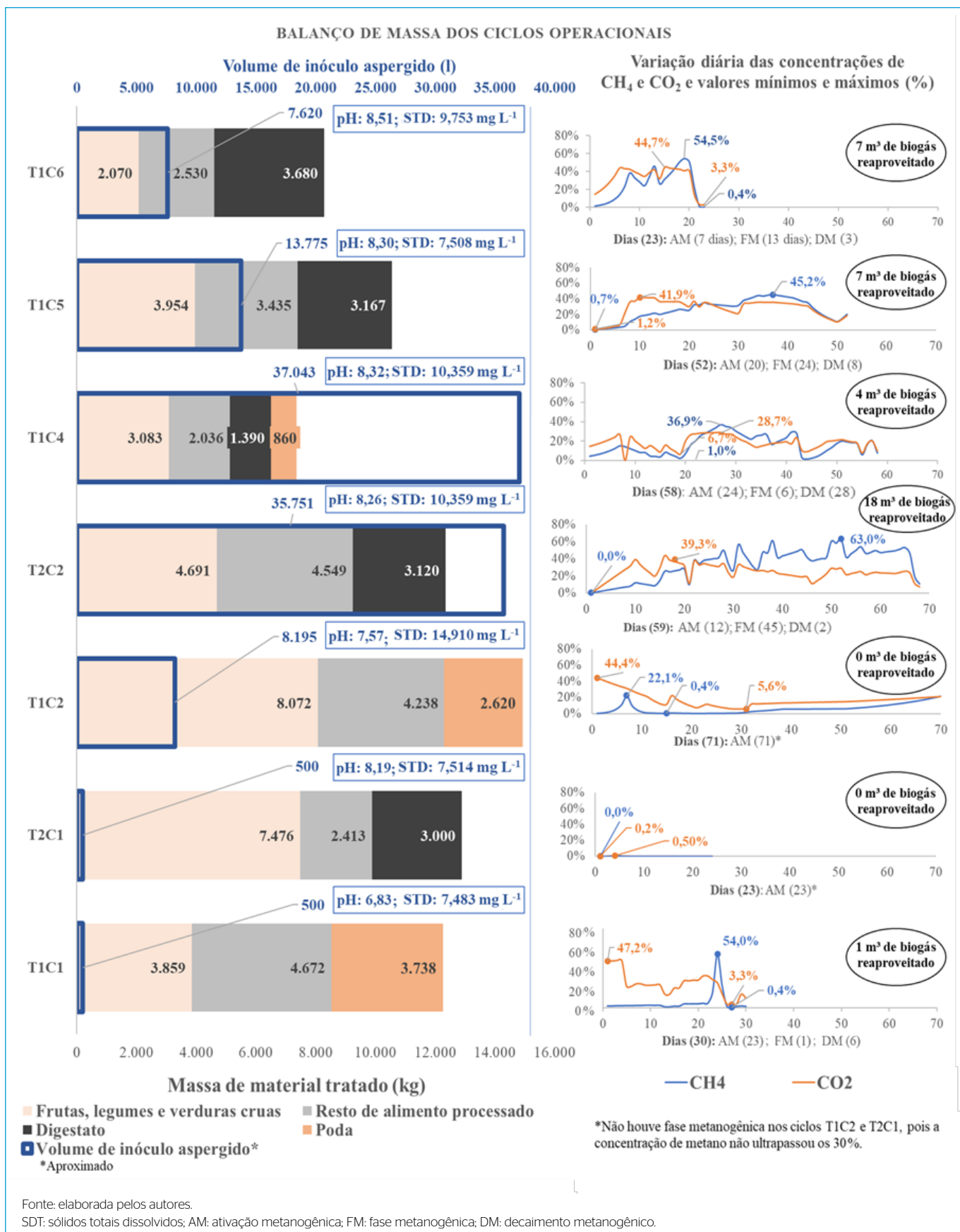
O ciclo com melhor desempenho na produção de biogás, tanto em volume quanto em concentração de CH_4 , foi o T2C2, que tratou cerca de 9 toneladas de resíduos alimentares, valor inferior apenas ao T1C2 (12 toneladas). O material estruturante representou 25% da mistura e foi constituído exclusivamente de digestato do ciclo anterior, o que pode ter favorecido o processo ao aportar maior carga microbiana ativa. O volume de inóculo aspergido também foi significativamente superior aos ciclos anteriores, atingindo aproximadamente 36 mil litros, enquanto nos demais variou entre 500 e 8 mil litros. O inóculo apresentou concentração de ST de 10.739 mg L^{-1} . Estudos indicam que a inserção de inóculo pode melhorar a qualidade do biogás e aumentar o rendimento do processo em cerca de 12% (Di Maria; Segoloni; Pezzolla, 2016).

Para os ciclos posteriores, o que apresentou desempenho inferior foi o T1C4, provavelmente associado à menor massa de material tratada, que foi de 5 toneladas de resíduos alimentares e, além disso, dentre os demais ciclos operados em 2024, foi o único que continha a presença de poda como material estruturante, misturado a uma parte de digestato do ciclo anterior. O volume de

Tabela 5 – Ciclos de tratamento

Túnel	Ciclo/Datas de coleta	Armazenamento antes de iniciar o processo	Quantidade de dias de cada fase			
			Fase aeróbia	Ativação metanogênica	Fase metanogênica	Total
1	1: 22/05 a 31/08/23	101	3	28	01	32
	2: 1º/09 a 06/10/23	36	2	83	0	85
	3: 11/10 a 24/10/23	14	3	27	0	30
	4: 19/02 a 04/03/24	15	2	95	03	100
	5: 04/03 a 12/06/24	16	2	31	23	56
	6: 1º/07 a 16/08/24	47	2	5	12	19
2	1: 1º/9 a 11/10/23	5	4	48	0	52
	2: 03/05 a 09/08/24	24	2	22	44	68

Fonte: elaborada pelos autores.



Fonte: elaborada pelos autores.

SDT: sólidos totais dissolvidos; AM: ativação metanogênica; FM: fase metanogênica; DM: decaimento metanogênico.

*Não houve fase metanogênica nos ciclos T1C2 e T2C1, pois a concentração de metano não ultrapassou os 30%.

inóculo aspergido foi superior aos outros três ciclos do ano de 2024, sendo de 37 mil litros, com uma massa de ST de 10.359 mg L⁻¹.

Os ciclos T1C5 e T1C6 apresentaram produção de biogás semelhante, apesar da diferença na massa tratada, de aproximadamente 7 e 5 toneladas, respectivamente. Em ambos os ciclos, o material estruturante foi constituído integralmente de digestato do ciclo anterior. O volume de inóculo aspergido foi maior no T1C5 (≈ 14 mil L; ST de 7.508 mg L⁻¹) em comparação ao T1C6 (≈ 8 mil L; ST de 9.753 mg L⁻¹). Quanto à composição do substrato, o T1C6 apresentou maior proporção de resíduos alimentares processados em relação aos resíduos crus, ao contrário do T1C5, o que pode ter contribuído para maior qualidade do biogás produzido, mesmo com menor massa tratada e menor volume de inóculo. Esse comportamento está de acordo com estudos que indicam menor potencial metanogênico para frutas e verduras cruas em comparação a resíduos alimentares processados (Bouallagui *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2014).

O pH do inóculo variou entre 6,83 e 8,51, faixa próxima à neutralidade e favorável à atividade de microrganismos metanogênicos. Valores mais baixos de pH podem reduzir significativamente a produção de metano devido à

predominância de microrganismos acidogênicos e à redução da população metanogênica (Latif; Mehta; Batstone, 2017). O pH do digestato apresentou valores semelhantes, variando entre 7,20 e 8,51 (Tabela 6).

Em relação à produção de biogás na UPI, foram registrados 247 m³ em 2023 e 909 m³ em 2024 (Figura 5). Em 2023, o tratamento de 33,64 toneladas de resíduos alimentares resultou na produção total de 248 m³ de biogás, correspondente a cerca de 7 m³/t.

Já em 2024, o tratamento de 26,35 toneladas resultou na produção de 945 m³ de biogás, com média de 36 m³/t, evidenciando melhoria significativa no desempenho do sistema. Embora inferiores aos valores tipicamente reportados para digestão anaeróbia de resíduos alimentares, geralmente entre 50 e 100 m³/t, os valores observados são compatíveis com sistemas em fase inicial de operação, nos quais o processo microbiológico ainda se encontra em fase de adaptação e estabilização (Silva-Martínez *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2014). Esses resultados refletem as condições operacionais iniciais do sistema e a variabilidade na composição dos resíduos alimentares provenientes de diferentes geradores, fatores reconhecidamente determinantes para o desempenho da digestão anaeróbia.

Tabela 6 - pH nas amostras de digestato

Amostras de digestato	T1C1	T2C1	T1C3	T1C4	T2C2	T1C6
pH	7,20	8,19	8,28	8,32	8,26	8,51

Fonte: elaborada pelos autores.

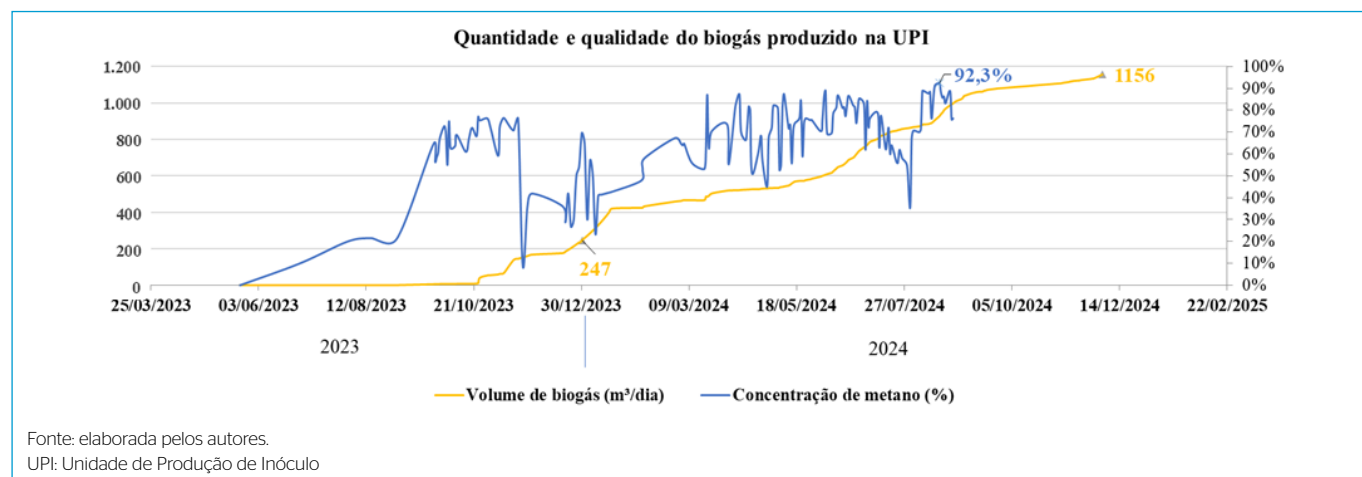


Figura 5 - Volume e composição do biogás produzido na Unidade de Produção de Inóculo

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam diferenças na composição dos resíduos alimentares provenientes dos diferentes grandes geradores avaliados. As escolas e o restaurante apresentaram maior proporção de restos de alimentos processados e de preparação de refeições, enquanto o supermercado apresentou predominância de frutas, verduras e legumes crus e inteiros.

Nos ciclos operacionais, observou-se que a substituição do material estruturante de poda pelo digestato proveniente de ciclos anteriores mostrou-se tecnicamente favorável, contribuindo com o incremento da carga microbiana ativa e a melhoria da qualidade e o aumento do volume de biogás produzido. De forma complementar, maiores volumes de inóculo aspergido estiveram associados a melhores resultados em determinados ciclos, indicando que a recirculação controlada do percolado, após homogeneização e aquecimento à 37°C, desempenha papel relevante na aceleração da atividade metanogênica e na estabilidade do processo.

Em alguns ciclos operacionais analisados, observou-se que os substratos com maior conteúdo de resíduos alimentares processados resultaram em biogás com maior teor de metano, atingindo valores de até 63%, enquanto misturas com predominância de frutas e verduras apresentaram desempenho inferior.

Observou-se ainda que o período inicial de operação correspondeu à fase de comissionamento do sistema, caracterizada por baixa produção de biogás e reduzida concentração de metano. A partir da consolidação das rotinas operacionais em 2024, verificou-se aumento expressivo da produção específica de biogás, indicando a estabilização microbiológica do processo e a melhoria do desempenho operacional do sistema, passando de aproximadamente 7 m³ por tonelada de resíduo tratado em 2023 para 36 m³ por tonelada em 2024, justificando a importância

da estabilização do sistema para o alcance de desempenho satisfatório.

Os resultados reforçam a importância da caracterização prévia dos resíduos, do controle das variáveis operacionais (temperatura, pH e volume de inóculo) e da adequada definição do material estruturante para a maximização da eficiência energética em sistemas de digestão anaeróbia.

Este estudo contribui para ampliar o conhecimento sobre o desempenho de sistemas de digestão anaeróbia da FORSU em condições reais de operação no Brasil. Ademais, demonstra o potencial de valorização energética de resíduos alimentares provenientes de grandes geradores urbanos, reforçando a relevância de políticas públicas voltadas à segregação na fonte e à implementação de tecnologias de tratamento biológico. Nesse contexto, a expansão de sistemas de digestão anaeróbia pode contribuir simultaneamente para a redução da disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários, a mitigação de emissões de metano e o fortalecimento de estratégias de economia circular no setor de gestão de resíduos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – Processo nº 2021/11967-6) como parte das atividades do Projeto CCD Circula (Centro de Ciências para o Desenvolvimento de Soluções para Resíduos Pós-Consumo: Embalagens e Produtos), que também conta com o apoio financeiro das seguintes empresas: Braskem, Grupo Boticário, Natura, Sonoco e Tetra Pak.

Agradecemos também o Núcleo de Sustentabilidade de Baixo Carbono do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Guia de práticas sedimentométricas**. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. 49-52. Brasília-DF: ANEEL, 2020. 118 p.

ANDREAZZI, Marcia Aparecida; MENDES, Adriano Rogério; OLIVEIRA, Karina Volpe de; LIZAMA, Maria de los Angeles Perez. Energy management: a synthesis of scientific publications on

biodigestion for waste management. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, n. 6, p. 964-979, 2017. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1911>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5231-92(2016)**: Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. West Conshohocken, PA: ASTM, 2016.

BOUALLAGUI, Hassib; TOUHAMI, Youssef; BEN CHEIKH, Ridha; HAMDÍ, Moktar. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 3-4, p. 989-995, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.03.007>

BOTTAUSCI, Sara; MIDENCE, Roger; SERRANO-BERNARDO, Francisco; BONOLI, Alessandra. Organic waste management and circular bioeconomy: a literature review comparison between Latin America and the European Union. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1661, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14031661>

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. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - PLANARES**. Brasília, DF: MMA, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Nacional de Redução e Reciclagem de Resíduos Orgânicos Urbanos (PLANARO)**. Brasília, DF: MMA, 2025. 27 p.

DI MARIA, Francesco; SEGOLONI, Enrico; PEZZOLLA, Daniela. Solid anaerobic digestion batch of bio-waste as pre-treatment for improving amendment quality: the effect of inoculum recirculation. **Waste Management**, v. 56, p. 106-112, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.024>

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS/COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo Municipal**: Manual para Gerenciamento Integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2018.

LATIF, Muhammad A.; MEHTA, Chirag M.; BATSTONE, Damien J. Influence of low pH on continuous anaerobic digestion of waste activated sludge. **Water Research**, v. 113, p. 42-49, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.002>

LIMA, Luiz Mário Queiroz. **Lixo - tratamento e biorremediação**. 3. ed. Editora Hemus, 1997. 265 p.

MONTEIRO, Pablo Inocência; MARIANO, André Bellin; PADILHA, Bianca do Santos; MORAES, Yann Domingues de; ZAGUINE, Letícia; MELO, Leonardo de Castro; LOPES, Leonardo Rey Oliveira; MORAES, Marcelo Lacerda de; SPIER, Michele Rigon. Anaerobic digestion of food waste for biogas production in glass bottles. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 21, n. 4, p. 1798-1817, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n4-004>

RANIERI, Luigi; MOSSA, Giorgio; PELLEGRINO, Roberta; DIGIESI, Salvatore. Energy recovery from the organic fraction of municipal solid waste: a real options-based facility assessment. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 368, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10020368>

SAETEROS-HERNÁNDEZ, Angélica; CHALEN-MOREANO, Francisco; ZURITA-GALLEGOS, Ronald; BADILLO-ARÉVALO, Pedro; GRANIZO-VILLACRES, Mayra; CEVALLOS-HERMIDA, Carlos; VITERI-NUÑEZ, Diego. Quantitative and qualitative characterization of food waste for circular economy strategies in the restaurant sector of Riobamba, Ecuador: a case study approach. **Biomass**, v. 5, n. 2, p. 18, 2025. <https://doi.org/10.3390/biomass5020018>

SÃO PAULO (Estado). Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2020.

SILVA, Edmar César Gomes; DE LUCAS JUNIOR, Jorge. Co-digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e dejetos de bovino leiteiro: obtenção e projeção dos resultados em um estudo de caso no município de Penápolis-SP. **Energia na Agricultura**, v. 37, n. 1, p. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2022v37n1p1-8>

SILVA-MARTÍNEZ, Rodolfo Danieel; SANCHES-PEREIRA, Alessandro; ORTIZ, Willington; GÓMEZ GALINDO, Maria Fernanda; COELHO, Suani Teixeira. The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: challenges and opportunities. **Renewable Energy**, v. 156, p. 509-525, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.056>

SILVA-MARTÍNEZ, Rodolfo Daniel; SANCHES-PEREIRA, Alessandro; ORNELAS-FERREIRA, Bernardo; CARNEIRO-PINHEIRO, Breno; COELHO, Suani Teixeira. High solid and wet anaerobic digestion technologies for the treatment of the organic fraction of municipal solid wastes and food wastes: a comparative case study in Brazil. **Bioresource Technology Reports**, v. 21, 101306, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101306>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO. **Manejo dos Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: SINISA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs>. Acesso em: 1º set. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. GLOBAL METHANE INITIATIVE. **Waste characterization handbook: understanding municipal waste streams to develop data-driven methane mitigation strategies**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2024. Disponível em: <https://globalmethane.org/resources/details.aspx?resourceid=5399>. Acesso em: 04 mar. 2026.

VENTORINO, Valeria; ROMANO, Ida; PAGLIANO, Giorgia; ROBERTIELLO, Alessandro; PEPE, Ollimpia. Pre-treatment and

inoculum affect the microbial community structure and enhance the biogas reactor performance in a pilot-scale biodigestion of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 73, p. 69-77, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.005>

ZHANG, Cunsheng; SU, Haijia; BAEYENS, Jan; TAN, Tianwei. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 383-392, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>

Artigo Científico

Monitoramento temporal e espacial de fármacos no esgoto de Curitiba: *insights* para a saúde pública e planejamento urbano

*Temporal and spatial monitoring of pharmaceuticals in
Curitiba's wastewater: insights for public health and urban planning*

Demian da Silveira Barcellos^{1*} , Marines Maria Wilhelm¹ , Allan Michael Junkert² , Guilherme Samways² , Barbara Zanicotti Leite³ , Jakson Alves³ , Gustavo Rafael Collere Possetti³ , Ramiro Gonçalves Etchepare² , Roberto Pontarolo² , Mario Prokopiuk¹ 

RESUMO

A epidemiologia baseada em esgotos (EBE) tem se consolidado como uma abordagem inovadora para monitorar indiretamente padrões de saúde e consumo de medicamentos na população. Este estudo investigou a ocorrência e a variação temporal e espacial de dez fármacos no esgoto bruto de Curitiba (PR), com coletas realizadas de setembro a outubro de 2024 nas entradas das cinco Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e na saída do esgoto do Hospital de Clínicas. As amostras, obtidas por amostradores automáticos em períodos de 4 horas e 24 horas, foram analisadas por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (LC-MS/MS), após extração em fase sólida. Diante da ausência de normalidade e homocedasticidade, aplicaram-se testes estatísticos não paramétricos. Observou-se variação significativa entre tempos e locais de coleta. Diclofenaco apresentou concentrações mais elevadas nas amostragens de 4 horas, indicando maiores concentrações no período da manhã, enquanto Lansoprazol foi mais abundante nas coletas de 24 horas. Espacialmente, atenolol e cetoprofeno se destacaram nas ETEs O3, O5 e no esgoto hospitalar, indicando relação com perfis sociodemográficos e uso intensivo de medicamentos. Cafeína, progesterona e sulfametoxazol mostraram distribuição mais uniforme, refletindo fontes difusas. Os resultados demonstram o potencial da metodologia para apoiar políticas públicas de saúde e planejamento urbano. Assim, a epidemiologia baseada em esgotos configura-se como ferramenta estratégica para a vigilância sanitária e a gestão integrada da saúde coletiva em contextos urbanos. A integração da EBE às plataformas de cidades inteligentes pode ampliar a capacidade de vigilância em tempo quase real, priorização territorial e suporte à decisão em políticas de saúde e saneamento.

Palavras-chave: epidemiologia baseada em esgotos; resíduos farmacêuticos; monitoramento ambiental; saúde pública; planejamento urbano; cidades inteligentes.

ABSTRACT

Wastewater-based epidemiology (WBE) has emerged as an innovative approach for indirectly monitoring population health patterns and pharmaceutical consumption. This study investigated the occurrence and the temporal and spatial variation of ten pharmaceuticals in the raw wastewater of Curitiba (Brazil). Sampling was conducted at the influents of the city's five wastewater treatment plants (WWTPs) and at the effluent of the Hospital de Clínicas, from September to October 2024. Composite samples were collected using automatic samplers over 4-hour and 24-hour periods, and analyzed by liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) after solid-phase extraction. Due to the lack of normality and homoscedasticity, nonparametric statistical tests were applied. Significant variations were observed across sampling times and locations. Diclofenac showed higher concentrations in the 4-hour samples, indicating greater presence during the morning period, while lansoprazole was more abundant in the 24-hour composites. Spatially, atenolol and ketoprofen were more prevalent in WWTPs 3 and 5 and in hospital wastewater, indicating associations with sociodemographic profiles, intensive medication use, and sewer network integrity. Caffeine, progesterone, and sulfamethoxazole exhibited more uniform distributions, reflecting diffuse sources. The results demonstrate the potential of this methodology to support public health and urban planning policies. Accordingly, wastewater-based epidemiology (WBE) emerges as a strategic tool for sanitary surveillance and integrated population health management in urban contexts. Integrating WBE into smart city platforms can enhance near-real-time surveillance, territorial prioritization, and decision support for health and sanitation policies.

Keywords: wastewater-based epidemiology; pharmaceutical residues; environmental monitoring; public health; urban planning; smart cities.

¹Pontifícia Universidade Católica do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

²Universidade Federal do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

³Companhia de Saneamento do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

*Endereço para correspondência: Rua Imaculada Conceição, 1155 - Pontifícia Universidade Católica do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis. Curitiba, PR. CEP: 80215-901. E-mail: demian.barcellos@gmail.com

INTRODUÇÃO

A epidemiologia baseada em esgotos (EBE) tem emergido como uma ferramenta inovadora para monitorar padrões de consumo de medicamentos e de saúde pública em diferentes regiões urbanas (Escolà Casas *et al.*, 2021; Rice *et al.*, 2020). Essa abordagem permite a análise indireta de indicadores populacionais a partir da detecção de metabólitos e fármacos residuais presentes nos sistemas de esgoto e corpos d'água receptores (Erickson *et al.*, 2021). Estudos nessa área têm demonstrado seu potencial para avaliar tendências no uso de medicamentos, identificar picos de consumo associados a doenças prevalentes e orientar a formulação de políticas públicas de saúde e saneamento (Barcellos *et al.*, 2023; Choi *et al.*, 2018; Daughton, 2020).

Fármacos, como anti-inflamatórios, hormônios e antibacterianos, são amplamente utilizados pela população e, após seu consumo, podem ser excretados inalterados ou como metabólitos ativos, chegando ao sistema de esgoto (Barcellos; Procopiuck; Bollmann, 2022). A identificação desses compostos em esgotos oferece *insights* sobre padrões de saúde coletiva, fornecendo dados para a análise de surtos epidemiológicos, do uso abusivo de medicamentos e da distribuição de doenças crônicas em diferentes áreas urbanas (Barcellos *et al.*, 2023; Böger *et al.*, 2021; Castiglioni *et al.*, 2013). Além disso, estudos internacionais têm destacado o potencial da EBE para complementar sistemas tradicionais de vigilância em saúde, especialmente em contextos urbanos complexos (Castiglioni *et al.*, 2013; Erickson *et al.*, 2021; Rice *et al.*, 2020).

Este estudo investiga as diferenças nas concentrações de dez analitos farmacêuticos e hormonais em função do tempo e do local de amostragem. Os analitos selecionados foram escolhidos por sua alta ocorrência em efluentes urbanos e por sua relevância como marcadores de saúde pública e de uso de medicamentos (Barcellos *et al.*, 2020). Esses compostos são amplamente utilizados no tratamento de doenças cardiovasculares, dores e inflamações, distúrbios hormonais e infecções bacterianas, o que os torna indicadores estratégicos para estudos de saúde pública e os tem incluído em esforços de priorização no monitoramento ambiental (Barcellos *et al.*, 2020; Böger *et al.*, 2021).

Os tempos de amostragem, comumente utilizados em epidemiologia baseada nos esgotos, podem capturar variações diárias e temporais no descarte de fármacos e, assim, proporcionar uma amostra mais representativa (Barquilha *et al.*, 2023; Escolà Casas *et al.*, 2021; Ort *et al.*, 2010). Apesar dos avanços metodológicos, ainda são escassos, no Brasil, estudos que avaliem comparativamente o impacto de diferentes janelas temporais de coleta na interpretação estatística dos resultados e na identificação de padrões espaciais intraurbanos (Castiglioni *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2017). Adicionalmente, a maioria das pesquisas concentra-se em tendências temporais agregadas, com exploração limitada da variabilidade espacial entre diferentes macrorregiões de esgotamento em uma mesma cidade.

No contexto contemporâneo de cidades inteligentes, caracterizadas pela integração de infraestrutura urbana, sensores ambientais e sistemas de decisão baseados em dados, a epidemiologia baseada nos esgotos pode desempenhar um papel estratégico como fonte complementar de informação territorial. Ao traduzir dados ambientais complexos em indicadores espaço-temporais acionáveis, a EBE contribui para modelos de governança urbana orientados por evidências, favorecendo a priorização territorial, a vigilância quase em tempo real e a integração entre saúde pública, saneamento e planejamento urbano (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2015; Rice *et al.*, 2020; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021).

A EBE tem se consolidado como ferramenta custo-efetiva para monitorar a saúde populacional e o uso de medicamentos a partir do esgoto, superando vieses de cobertura e de testes clínicos, permitindo inferências em escala urbana. Integrada a plataformas urbanas de decisão e sistemas digitais de monitoramento, a EBE traduz dados de matriz complexa em indicadores acionáveis (por exemplo, intensidade farmacêutica por macrorregião, sensibilidade ao desenho amostral e identificação de *hotspots*), ampliando a vigilância quase em tempo real, a alocação focalizada de recursos e a avaliação de políticas de saúde e saneamento (Barquilha *et al.*, 2023; Belmonte-Lopes *et al.*, 2023; Escolà Casas *et al.*, 2021; Rice *et al.*, 2020). Todavia, permanece uma lacuna quanto à aplicação integrada dessa abordagem em escala municipal no contexto

brasileiro, especialmente na articulação entre a análise estatística robusta, a variabilidade espaço-temporal e as implicações para o planejamento urbano.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar se os locais e os tempos de coleta impactam significativamente as concentrações das dez substâncias farmacêuticas e hormonais monitoradas no esgoto bruto de Curitiba (PR), contribuindo para a compreensão da variabilidade espaço-temporal desses marcadores e para o fortalecimento de estratégias de vigilância sanitária, de planejamento urbano e de sistemas de cidades inteligentes baseados em evidências.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi estruturada para avaliar a presença e a distribuição de resíduos farmacêuticos e hormonais em sistemas de esgoto, com foco na

correlação entre padrões de consumo de medicamentos e dados epidemiológicos. O delineamento do estudo envolveu a seleção de locais de amostragem representativos, o emprego de técnicas analíticas avançadas e a aplicação de ferramentas estatísticas robustas para análise dos resultados.

Foram escolhidos seis pontos estratégicos de coleta, abrangendo regiões urbanas e industriais com diferentes perfis socioeconômicos e demográficos (Barquilha *et al.*, 2023; Belmonte-Lopes *et al.*, 2023): as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) 01, 02, 03, 04 e 05, que coletam todo o esgoto da cidade de Curitiba (Figura 1), e o esgoto do Hospital de Clínicas (HC), localizado na área da ETE 02. Nas ETEs, o esgoto foi coletado na entrada do tratamento e, no HC, na saída da rede coletora do hospital. Essa seleção visou captar padrões de consumo de medicamentos associados a diferentes usos do território, incluindo áreas residenciais, comerciais, hospitalares e industriais.

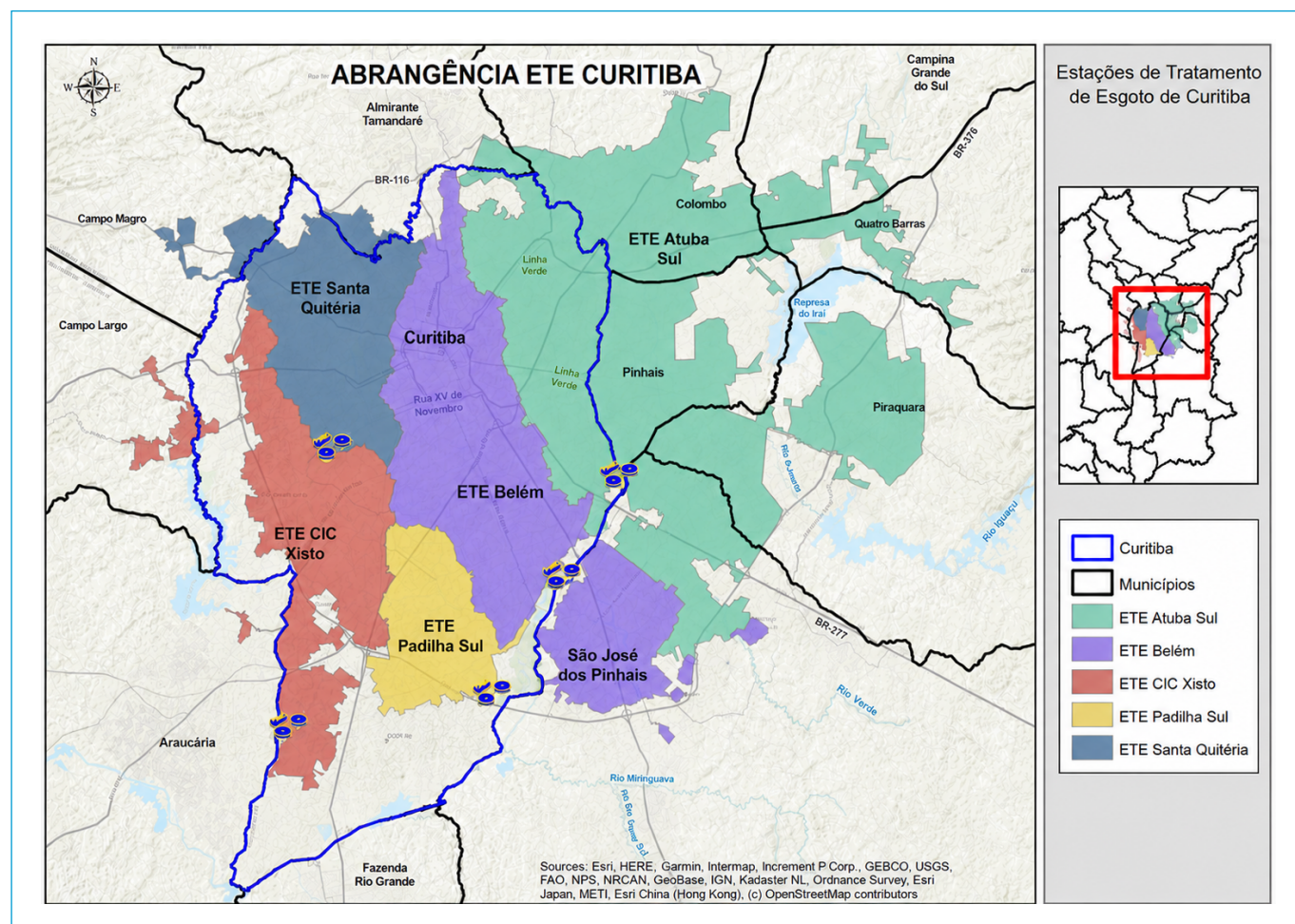


Figura 1 – Macrorregiões de esgotamento e cobertura das Estações de Tratamento de Esgoto em Curitiba

As coletas compostas foram realizadas com amostradores automáticos durante dois períodos distintos (4 horas e 24 horas) para avaliar variações diurnas nas concentrações de fármacos e hormônios e o impacto desses dois períodos típicos de amostragem composta nos resultados. O período de amostragem foi de setembro a outubro de 2024, totalizando 35 amostragens. As amostragens de 4 horas foram realizadas nas terças-feiras pela manhã, das 8 h às 12h, e são proporcionais ao tempo. As amostragens de 24 horas foram realizadas todos os dias da semana, de segunda-feira a domingo, e são proporcionais à vazão. A escolha desses intervalos se baseou em estudos prévios que apontam alterações significativas nos padrões de descarga de esgoto ao longo do dia, associadas aos usos domiciliar e hospitalar (Belmonte-Lopes *et al.*, 2023, Escolà Casas *et al.*, 2021). Essa abordagem permitiu identificar padrões consistentes de consumo e descarte.

Os dez analitos investigados representam diferentes classes terapêuticas: anti-inflamatórios não esteroidais (diclofenaco e cetoprofeno), inibidor de bomba de prótons (lansoprazol), betabloqueador (atenolol), antibiótico sulfonamídico (sulfametoxazol), hormônios naturais e sintéticos (estrone, estradiol, progesterona e etinilestradiol) e estimulante do sistema nervoso central (caféina). As análises foram realizadas por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS), técnica reconhecida por sua alta sensibilidade, seletividade e precisão na detecção de compostos orgânicos em concentrações de traço. O preparo das amostras, baseado em extração em fase sólida (SPE), seguiu o protocolo adaptado de Böger *et al.* (2021), com ajustes para maximizar a recuperação de analitos de diferentes polaridades e propriedades físico-químicas.

As amostras foram homogeneizadas e filtradas em três etapas sucessivas: duas com papéis de filtro de celulose (qualitativo e quantitativo) e uma com filtro de microfibra de vidro (Millipore AP40). Após a filtragem, o pH foi ajustado para 6,5 e as amostras foram submetidas à extração em fase sólida (SPE) com cartuchos poliméricos de largo espectro (Phenomenex Strata-X, 200 mg, 3 mL), acoplados a um manifold de vácuo Waters. Cada cartucho foi condicionado com metanol e água ultrapura antes da

passagem de 500 mL de amostra a 10 mL/min, obtendo-se um fator de concentração de 500 vezes. Após secagem por 2 minutos, os analitos foram eluídos com 4 mL de metanol, evaporados em concentrador a vácuo, a 30°C, até a secagem, e redissolvidos em 1 mL de fase móvel (água/acetona, 50:50 v/v).

As análises foram realizadas em um sistema LCMS-8045 (Shimadzu), operando em modo MRM, com calibração com padrões externos preparados em matriz ajustada e correção por padrões internos, a fim de reduzir os efeitos de matriz e as variações de recuperação. As etapas de extração e cromatografia foram conduzidas no Centro de Estudos em Biofarmácia da Universidade Federal do Paraná (CEB/UFPR) e no Laboratório Multiusuário de Equipamentos e Análises Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (LAMEAA/UTFPR), seguindo rigoroso controle de qualidade analítica, incluindo brancos procedimentais, verificações de calibração, duplicatas e ensaios de recuperação.

Para cada analito, foram determinados o limite de detecção (LD) e o limite de quantificação (LQ) com base na razão sinal/ruído, adotando-se as relações de 3:1 e 10:1, respectivamente, conforme recomendações internacionais (ISO 11843; IUPAC). De modo geral, as concentrações obtidas situaram-se acima dos limites de quantificação estabelecidos, com exceção do lansoprazol, cujos valores permaneceram predominantemente abaixo do LD. Ainda assim, optou-se por manter os valores instrumentais desse composto nas análises exploratórias, a fim de identificar possíveis tendências espaciais e temporais, reconhecendo a incerteza associada às medições próximas ao limite de detecção.

Os dados obtidos foram analisados no R (versão 4.3.2), utilizando os pacotes tidyverse, car, rstatix e ggplot2 para processamento, análise estatística e visualização gráfica. Inicialmente, verificaram-se os pressupostos de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (teste de Levene), ambos violados, o que justificou o uso de métodos não paramétricos. Diferenças globais entre grupos foram avaliadas pelo teste de Kruskal-Wallis e, quando significativo, realizaram-se comparações múltiplas par a par pelo teste de Mann-Whitney (Wilcoxon rank-sum) com

correção de Bonferroni para o controle do erro tipo I. Os gráficos foram elaborados com o ggplot2, empregando temas padronizados (theme_classic()) e escalas ajustadas para realçar as variações espaciais e temporais dos analitos. Essa abordagem assegurou robustez estatística, controle do erro tipo I e clareza visual na interpretação dos resultados.

Para favorecer a reprodutibilidade e a interoperabilidade em iniciativas de cidades inteligentes, os dados foram estruturados com metadados padronizados, permitindo a integração futura a *dashboards* urbanos e a *data lakes* institucionais (e.g., camadas geoespaciais por ETE e zona de contribuição), preservando a confidencialidade e os princípios éticos de uso de dados ambientais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa revelaram diferenças significativas na distribuição espacial (Tabela 1) e temporal

(Tabela 2) de resíduos farmacêuticos e hormonais, destacando a relevância do monitoramento de esgotos como ferramenta para a análise de padrões de consumo de medicamentos e de saúde pública. As análises estatísticas permitiram identificar variações relevantes nos analitos estudados, fornecendo informações importantes sobre a dinâmica desses compostos nos sistemas de esgoto e em ambientes aquáticos.

Embora a maioria das concentrações tenha se situado dentro das faixas de quantificação do método cromatográfico, o composto lansoprazol apresentou valores predominantemente abaixo do limite de detecção. Optou-se por manter essas estimativas instrumentais para fins exploratórios, permitindo observar tendências gerais de variação temporal. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis indicou diferença estatisticamente significativa entre os tempos de coleta ($p < 0,05$) para esse analito, sugerindo padrão

Tabela 1 - Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para local de coleta

Analito	Estatística	Valor p	Significância ($p < 0,05$)
Cafeína	15,47	0,1159	Não significativa
Estrona	-	-	Dados insuficientes
Progesterona	15,33	0,1206	Não significativa
Etinilestradiol	12,57	0,2486	Não significativa
Estradiol	18,10	0,0533	Não significativa
Atenolol	22,54	0,0126	Significativa
Sulfametoxazol	17,56	0,0628	Não significativa
Cetoprofeno	21,34	0,0189	Significativa
Diclofenaco	16,75	0,0800	Não significativa
Lansoprazol	13,44	0,2001	Não significativa

Tabela 2 - Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para tempo de coleta

Analito	Estatística	Valor p	Significância ($p < 0,05$)
Cafeína	4,75	0,0929	Não significativa
Estrona	-	-	Dados insuficientes
Progesterona	1,98	0,3717	Não significativa
Etinilestradiol	2,06	0,3561	Não significativa
Estradiol	4,56	0,1021	Não significativa
Atenolol	2,35	0,3093	Não significativa
Sulfametoxazol	3,35	0,1873	Não significativa
Cetoprofeno	1,22	0,5434	Não significativa
Diclofenaco	18,77	< 0,0001	Significativa
Lansoprazol	7,32	0,0257	Significativa

de variação compatível com o comportamento farmacocinético e com os horários de administração. Esses resultados devem ser interpretados com cautela, considerando a elevada incerteza associada às medições abaixo do LD.

Em relação ao impacto do tempo de coleta nos resultados (Tabela 2), os compostos diclofenaco e lansoprazol apresentaram diferenças significativas entre os tempos de coleta de 4 horas e 24 horas. O diclofenaco apresentou valor p altamente significativo ($p < 0,0001$) no teste de Kruskal-Wallis, indicando variações marcantes entre as amostragens de 4 horas e 24 horas, o que também se observa no gráfico do desvio interquartilico (Figura 2). Essa diferença pode estar associada a padrões de consumo diurno, especialmente no uso do diclofenaco, anti-inflamatório amplamente utilizado no tratamento de dores e inflamações, com maior concentração nos esgotos nas primeiras horas do dia. Esses resultados sugerem que esse anti-inflamatório, frequentemente consumido de forma episódica, 8/8h ou 12/12h, é um composto sensível à estratégia de coleta, já que coletas de 4 horas pela manhã captam melhor os picos de descarte. O lansoprazol, um inibidor de bomba de prótons comumente prescrito para distúrbios gástricos, também apresentou variações

significativas (Figura 3) nos tempos de amostragem ($p = 0,0257$). Ao contrário do diclofenaco, o lansoprazol apresentou concentrações mais elevadas nas amostragens de 24 horas. A administração desse fármaco costuma ser em jejum pela manhã, com a excreção distribuída ao longo do dia. Esses resultados refletem os horários de administração, os perfis de excreção e o tempo de detenção hidráulica na rede coletora.

No que diz respeito à distribuição espacial (Tabela 1), os compostos atenolol e cetoprofeno apresentaram diferenças significativas entre os locais de coleta, com valores de 0,0126 e 0,0189, respectivamente. O atenolol, utilizado no tratamento de hipertensão e doenças cardiovasculares, apresentou concentrações mais elevadas em pontos próximos de áreas predominantemente residenciais e hospitalares, como o HC e a ETE 03 (Figura 4). Esse padrão sugere maior consumo de medicamentos cardiovasculares nessas regiões, possivelmente relacionado à demografia local. No entanto, é importante destacar que essas duas amostras de esgoto são mais concentradas por apresentarem menor infiltração da água da chuva, o que também pode explicar esses resultados. Estudos já destacaram maior integridade da rede coletora da ETE 03, que é

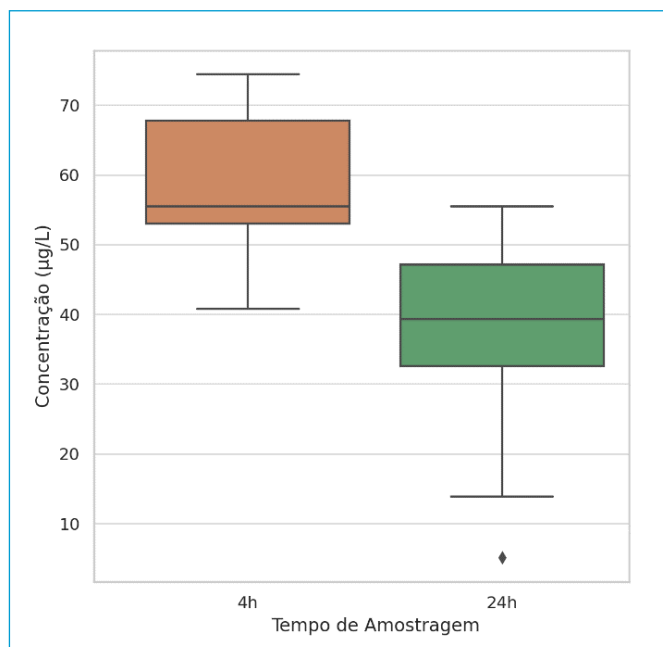


Figura 2 - Desvio interquartilico do diclofenaco por tempo de amostragem

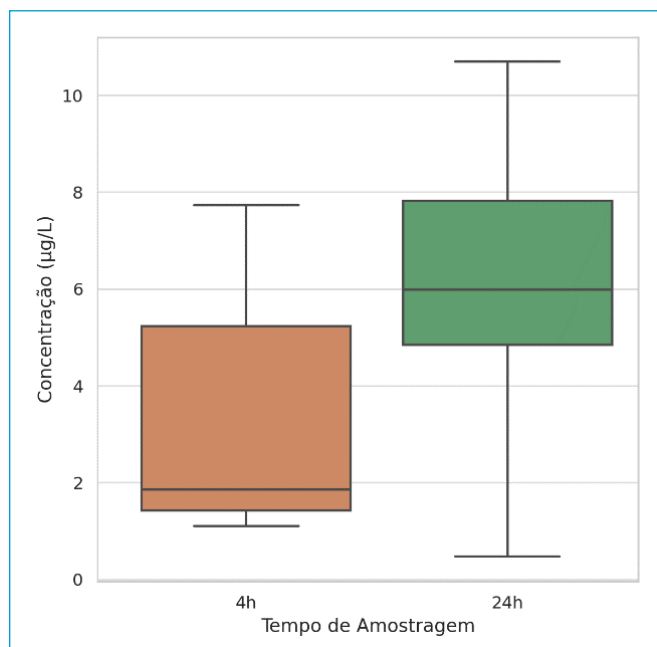


Figura 3 - Desvio interquartilico do lansoprazol por tempo de amostragem

mais recente e apresenta área de contribuição reduzida, o que, conseqüentemente, diminui o tempo de residência do esgoto e a possibilidade de degradação dos analitos dissolvidos (Barquilha *et al.*, 2023). Já o cetoprofeno, um anti-inflamatório de uso comum, apresentou maiores concentrações em áreas atendidas pelas ETEs 03 e 05, locais associados à maior densidade populacional e a atividades comerciais (Figura 5). Além disso, no esgoto do HC, esse analito também apresentou concentrações elevadas. Como é um medicamento para a dor, é esperado seu uso em ambiente hospitalar. Sua predominância na área de contribuição da ETE 03, uma das regiões com maior vulnerabilidade social em saúde de Curitiba (Souza, 2020), pode sugerir uma população contribuinte com trabalho pesado que necessita de mais medicamentos para a dor. Esses achados estão alinhados com estudos prévios que relacionam a presença de fármacos em efluentes a fatores socioeconômicos e padrões locais de uso (Escolà Casas *et al.*, 2021; Rice *et al.*, 2020).

As comparações par a par pelo teste de Mann-Whitney, com ajuste de p para múltiplas comparações, identificaram

diferenças estatisticamente significativas entre os locais, evidenciando padrões espaciais relevantes (Tabelas 3 e 4). O atenolol apresentou diferenças significativas entre as ETEs 04 e 03 ($p = 0,0123$) e entre 04 e 02 ($p = 0,0345$).

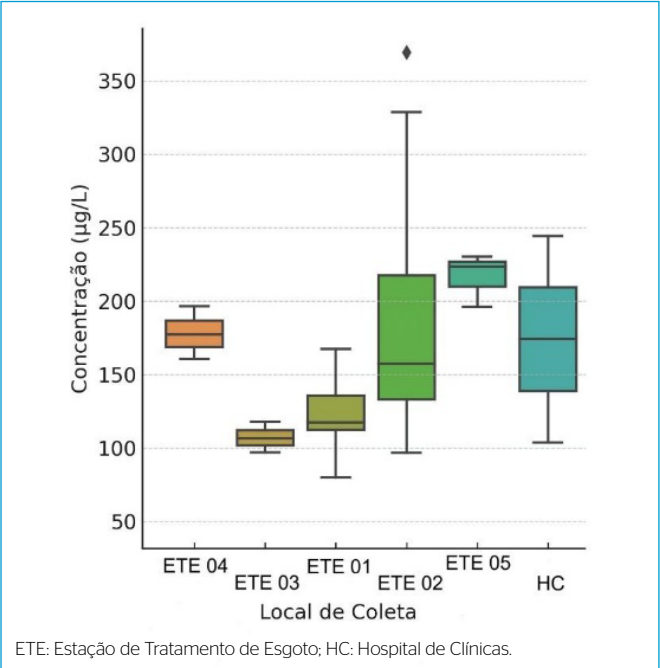


Figura 5 - Desvio interquartilício do cetoprofeno por local de amostragem

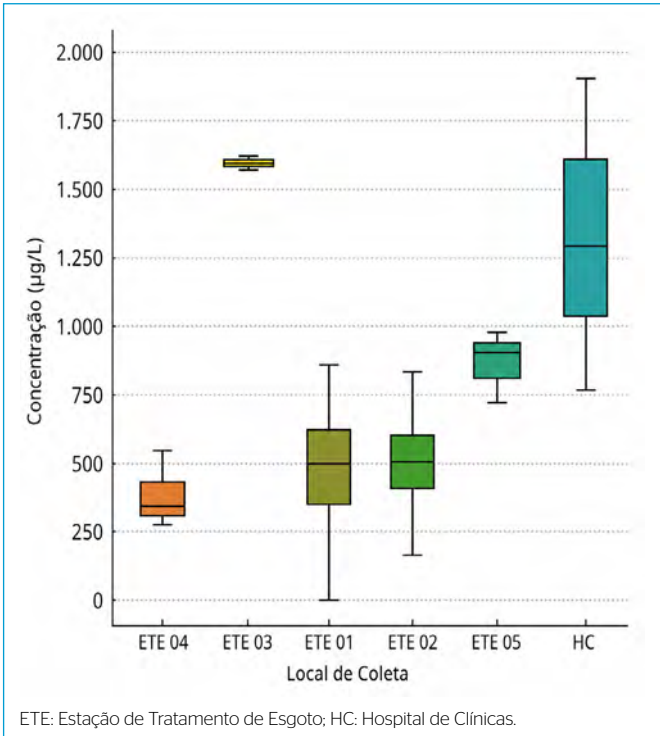


Figura 4 - Desvio interquartilício do atenolol por local de amostragem

Tabela 3 - Comparações par a par entre locais (Mann-Whitney, ajuste de Bonferroni) para atenolol

Comparação entre os locais de coleta	Valor p (ajustado)	Significância ($p < 0,05$)
ETE 04 vs. ETE 03	0,0123	Significativa
ETE 04 vs. ETE 01	0,1567	Não significativa
ETE 04 vs. ETE 02	0,0345	Significativa
ETE 04 vs. ETE 05	0,0789	Não significativa
ETE 04 vs. HC	0,1023	Não significativa
ETE 03 vs. ETE 01	0,0452	Significativa
ETE 03 vs. ETE 02	0,1783	Não significativa
ETE 03 vs. ETE 05	0,0671	Não significativa
ETE 03 vs. HC	0,2345	Não significativa
ETE 01 vs. ETE 02	0,0912	Não significativa
ETE 01 vs. ETE 05	0,1564	Não significativa
ETE 01 vs. HC	0,1983	Não significativa
ETE 02 vs. ETE 05	0,0678	Não significativa
ETE 02 vs. HC	0,0984	Não significativa
ETE 05 vs. HC	0,2345	Não significativa

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto; HC: Hospital de Clínicas.

Tabela 4 – Comparações par a par entre locais (Mann-Whitney com Bonferroni) para o cetoprofeno

Comparação entre os locais de coleta	Valor p (ajustado)	Significância (p < 0,05)
ETE 04 vs. ETE 03	0,0456	Significativa
ETE 04 vs. ETE 01	0,1789	Não significativa
ETE 04 vs. ETE 02	0,0674	Não significativa
ETE 04 vs. ETE 05	0,1345	Não significativa
ETE 04 vs. HC	0,1562	Não significativa
ETE 03 vs. ETE 01	0,0567	Não significativa
ETE 03 vs. ETE 02	0,1893	Não significativa
ETE 03 vs. ETE 05	0,1432	Não significativa
ETE 03 vs. HC	0,1765	Não significativa
ETE 01 vs. ETE 02	0,1567	Não significativa
ETE 01 vs. ETE 05	0,1321	Não significativa
ETE 01 vs. HC	0,1654	Não significativa
ETE 02 vs. ETE 05	0,1123	Não significativa
ETE 02 vs. HC	0,1435	Não significativa
ETE 05 vs. HC	0,1786	Não significativa

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto; HC: Hospital de Clínicas.

Também foram observadas diferenças entre as ETEs 03 e 01 ($p = 0,0452$). Esses resultados sugerem que o consumo de atenolol está relacionado ao perfil demográfico das regiões, possivelmente refletindo maior prevalência de doenças cardiovasculares ou acesso diferenciado aos serviços de saúde. Por outro lado, o cetoprofeno apresentou diferença significativa apenas entre 04 e 03 ($p = 0,0456$), sugerindo um padrão de uso mais localizado, possivelmente relacionado ao tratamento de inflamações e dores. As áreas de contribuição das ETEs 03 e 04 correspondem às regiões com maior vulnerabilidade social em saúde de Curitiba (Souza, 2020), o que pode explicar as diferenças significativas observadas nos resíduos de fármacos do esgoto dessas áreas entre si e em relação às demais regiões.

As demais comparações entre locais não foram significativas, indicando uma distribuição espacial mais homogênea. Esses achados ressaltam a importância de considerar as características sociodemográficas e o acesso aos serviços de saúde ao interpretar os resultados, destacando o potencial da epidemiologia baseada nos esgotos como ferramenta para o monitoramento de padrões de saúde pública e para a formulação de políticas urbanas específicas.

A incorporação desses resultados em plataformas urbanas de decisão (*dashboards* georreferenciados) possibilita alertas operacionais, priorização territorial e suporte à decisão por distrito sanitário, alinhando-se às diretrizes de Saúde Digital e de Gestão Integrada da Água — eixo central de iniciativas de cidades inteligentes (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2015; World Health Organization, 2020). Quando traduzidos em indicadores, os padrões espaciais e temporais observados permitem acionar respostas intersetoriais (saúde-saneamento-planejamento) e avaliar o impacto de intervenções territoriais e de campanhas de uso racional de medicamentos (Sims; Kasprzyk-Hordern, 2020).

A ausência de diferenças significativas em relação a outros compostos, como cafeína, estrona, progesterona e sulfametoxazol, sugere que esses analitos podem estar mais amplamente distribuídos entre os locais e os tempos analisados, refletindo padrões difusos de consumo e descarte. Essa homogeneidade também pode indicar fontes contínuas de introdução no sistema, como despejos domésticos generalizados, o que dificulta a identificação de picos ou de fontes específicas. Estudos anteriores já destacaram essa tendência em compostos como a cafeína, amplamente consumidos e persistentes no ambiente (Barcellos; Procopiuck; Bollmann, 2022).

Outro ponto relevante é que os resultados obtidos reforçam a aplicabilidade da metodologia estatística adotada, que combinou testes não paramétricos para lidar com a falta de normalidade e heterogeneidade das variâncias. O uso do teste de Kruskal-Wallis, seguido de comparações par a par pelo teste de Mann-Whitney com correção de Bonferroni, mostrou-se eficaz para identificar padrões espaciais e temporais, reduzindo a probabilidade de falsos positivos (controle do erro familiar). Essa abordagem alinha-se a pesquisas anteriores que empregaram métodos semelhantes para análises de marcadores em epidemiologia baseada nos esgotos (Belmonte-Lopes *et al.*, 2023).

Deve-se ressaltar que, no caso específico do lansoprazol, as concentrações observadas situaram-se majoritariamente abaixo do limite de detecção, o que confere caráter exploratório à interpretação estatística. Assim, o resultado significativo obtido pelo teste de Kruskal-Wallis deve ser

entendido como indicativo de tendência, e não como evidência conclusiva de diferença entre os grupos. Para os demais compostos, os resultados refletem concentrações quantificáveis e consistentes com o desempenho analítico esperado.

Conforme sintetizado na Figura 6, os dados empíricos obtidos neste estudo — incluindo variações temporais significativas para diclofenaco ($p < 0,0001$) e lansoprazol ($p = 0,0257$), bem como diferenças espaciais para atenolol e cetoprofeno ($p < 0,05$) — evidenciam heterogeneidade intraurbana na distribuição de resíduos farmacêuticos. Esses resultados corroboram evidências de que a epidemiologia baseada nos esgotos pode revelar padrões espaciais e temporais associados a dinâmicas populacionais e de consumo (Choi *et al.*, 2018; Ort *et al.*, 2014; Sims; Kasprzyk-Hordern, 2020).

A sensibilidade observada entre os regimes de amostragem (4 h $\times$ 24 h) reforça a influência do desenho amostral na captura de picos de descarga (Castiglioni *et al.*, 2013; Ort *et al.*, 2010). A partir desses achados, é possível identificar diferenças territoriais na intensidade farmacêutica entre as macrorregiões — potencialmente relacionadas a padrões locais de demanda assistencial —, maior capacidade das amostragens de 4 horas para detectar eventos agudos e áreas prioritárias para intervenções territoriais. Tais evidências oferecem subsídios técnicos para ações integradas entre saúde pública, saneamento e planejamento urbano, alinhando-se a abordagens contemporâneas de governança baseada em evidências e de integração

intersectorial (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2015; United Nations Human Settlements Programme, 2022; World Health Organization, 2021).

CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa demonstraram o potencial do uso de resíduos farmacêuticos e hormonais como indicadores para monitorar padrões de consumo de medicamentos e de doenças, bem como apoiar estratégias de saúde pública. A análise espacial revelou diferenças significativas na distribuição dos compostos atenolol e cetoprofeno entre os locais de coleta, sugerindo associações com o perfil demográfico e com o uso específico de medicamentos em determinadas regiões. A análise temporal evidenciou variações marcantes de diclofenaco e lansoprazol, compatíveis com padrões diários de consumo e eliminação, moduladas pelo tempo de detenção hidráulica na rede coletora e pela janela de coleta das amostras compostas.

Esses achados reforçam o potencial da epidemiologia baseada nos esgotos como uma ferramenta complementar para políticas públicas, permitindo identificar áreas com maior demanda por medicamentos e possíveis necessidades de intervenções em saúde. Além disso, a metodologia empregada demonstrou ser robusta e apropriada para a avaliação de padrões espaciais e temporais, destacando a importância de estratégias analíticas adequadas para lidar com dados ambientais complexos.

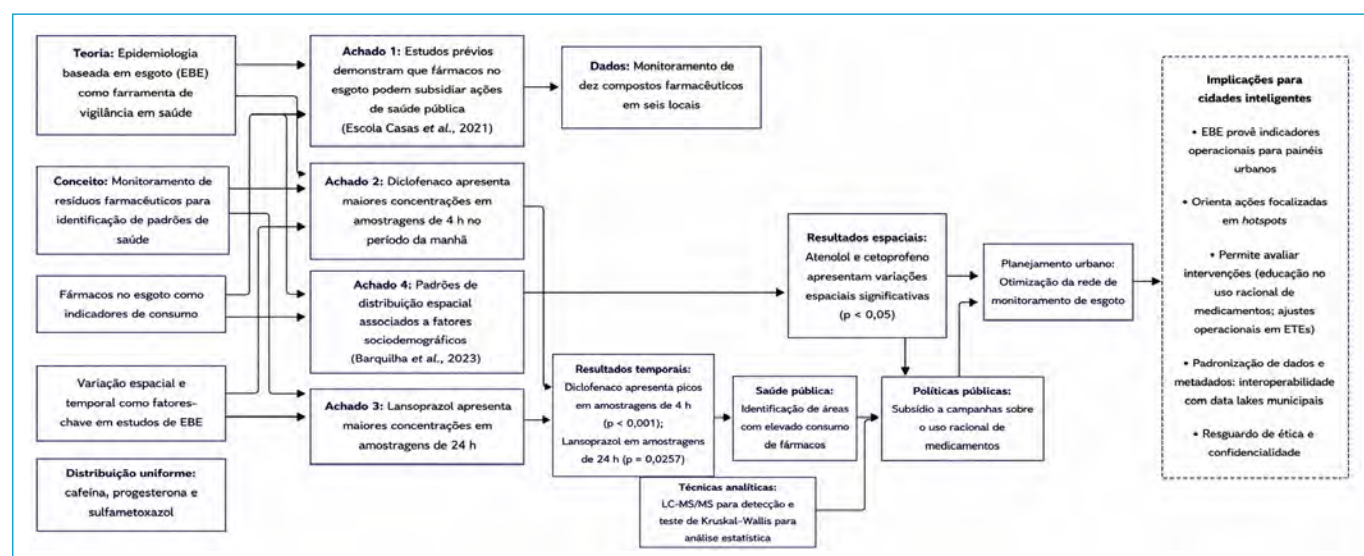


Figura 6 – Integração EBE-Cidades Inteligentes: fundamentos, achados empíricos e implicações práticas

Recomenda-se a integração da EBE aos ecossistemas de dados de cidades inteligentes, com *pipelines* automatizados (coleta → análise → visualização) e painéis geográficos de suporte à decisão, permitindo o monitoramento contínuo, a priorização territorial e a avaliação de políticas de saúde e saneamento. Tal integração favorece uma governança baseada em evidências, com indicadores rastreáveis e métricas de desempenho replicáveis em outras cidades.

Recomenda-se ampliar este estudo para incluir mais pontos de coleta e períodos de monitoramento, permitindo a análise de variações sazonais e a correlação com indicadores epidemiológicos específicos. Investigações futuras também devem avaliar o impacto de fatores climáticos e a eficiência dos sistemas de tratamento de efluentes na remoção desses compostos. Por fim, sugere-se a integração desses resultados em programas de vigilância epidemiológica e de planejamento urbano, fortalecendo a gestão integrada de recursos hídricos e da saúde pública.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), em parceria com a Fundação Araucária, como fomentadores do Programa de Apoio Institucional à Fixação de Jovens Doutores. Agradecemos também os recursos do CNPq, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (INCT ETEs Sustentáveis), por meio de auxílios destinados à criação da Rede Monitoramento Covid Esgotos no Brasil, a qual viabilizou o estabelecimento de pesquisas em EBE em Curitiba. Os autores igualmente agradecem ao Laboratório Multiusuário de Equipamentos e Análises Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (LAMEAA/UTFPR) o acesso à sua infraestrutura avançada e o suporte técnico que possibilitou a realização das análises.

REFERÊNCIAS

BARCELLOS, Demian S.; BARQUILHA, Carlos E. R.; OLIVEIRA, Pâmela E.; PROKOPIUK, Mario; ETCHEPARE, Ramiro G. How has the COVID-19 pandemic impacted wastewater-based epidemiology? **Science of the Total Environment**, 892, 164561, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164561>

BARCELLOS, Demian da Silveira; HELWIG, Karin; GERVASONI, Ronald; TEEDON, Paul; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere; BOLLMANN, Harry Alberto. Priority pharmaceutical micropollutants and feasible management initiatives to control water pollution from the perspective of stakeholders in metropolis of southern Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 6, p. 955-967, 2020. <https://doi.org/10.1002/ieam.4301>

BARCELLOS, Demian da Silveira; PROKOPIUK, Mario; BOLLMANN, Harry Alberto. Management of pharmaceutical micropollutants discharged in urban waters: 30 years of systematic review looking at opportunities for developing countries. **Science of the Total Environment**, v. 809, p. 151128, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151128>

BARQUILHA, Carlos Eduardo Rodrigues; BARCELLOS, Demian da Silveira; BELMONTE-LOPES, Ricardo; HOYOS, Nestor Leonel Muñoz; RAZZOLINI, Emanuel Luís; GRISOLIA, Maria Eduarda; OLIVEIRA, Pâmela Eduarda de; MARTINS, William; ALVES, Jakson;

LEITE, Bárbara Zanicotti; COSTA, Fernanda Janaína Oliveira Gomes da; MOTA FILHO, César Rossas; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere; VICENTE, Vânia Aparecida; ETCHEPARE, Ramiro Gonçalves. Monitoramento epidemiológico espaçotemporal de SARS-CoV-2 no esgoto de Curitiba-PR. **Cadernos Técnicos de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 3, p. 115-123, 2023.

BELMONTE-LOPES, Ricardo; BARQUILHA, Carlos Eduardo Rodrigues; KOZAK, Caroline; BARCELLOS, Demian da Silveira; LEITE, Bárbara Zanicotti; COSTA, Fernanda Janaína Oliveira Gomes da; MARTINS, William Lucas; OLIVEIRA, Pâmela Eduarda; PEREIRA, Edy Hans Roger Araújo; MOTA FILHO, Cesar Rossas; SOUZA, Emanuel Maltempi de; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere; VICENTE, Vânia Aparecida; ETCHEPARE, Ramiro Gonçalves. 20-Month monitoring of SARS-CoV-2 in wastewater of Curitiba, in Southern Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**. 2023.

BÖGER, Beatriz; SUREK, Monica; VILHENA, Raquel de O.; FACHI, Mariana M.; JUNKERT, Allan M.; SANTOS, Josiane M. M. F.; DOMINGOS, Eric L.; COBRE, Alexandre de F.; MOMADE, Danilo R.; PONTAROLO, Roberto. Occurrence of antibiotics and antibiotic resistant bacteria in subtropical urban rivers in Brazil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 402, p. 123448, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123448>

CASTIGLIONI, Sara; BIJLSMA, Lubertus; COVACI, Adrian; EMKE, Erik; HERNÁNDEZ, Félix; REID, Malcolm; ORT, Christoph; THOMAS, Kevin V.; VAN NUIJS, Alexander L. N.; DE VOOGT, Pim; ZUCCATO, Ettore. Evaluation of uncertainties associated with the determination of community drug use through the measurement of sewage drug biomarkers. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 3, p. 1452-1460, 2013. <https://doi.org/10.1021/es302722f>

CHOI, Phil Min; TSCHARKE, Ben J.; DONNER, Erica; O'BRIEN, Jake W.; GRANT, Sharon C.; KASERZON, Sarit L.; MACKIE, Rachel; O'MALLEY, Elissa; CROSBIE, Nicholas D.; THOMAS, Kevin V.; MUELLER, Jochen F. Wastewater-based epidemiology biomarkers: Past, present and future. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 105, p. 453-469, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.06.004>

DAUGHTON, Christian G. Wastewater surveillance for population-wide Covid-19: The present and future. **Science of the Total Environment**, v. 736, 139631, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139631>

ERICKSON, Timothy B.; ENDO, Noriko; DUVALLET, Claire; GHAEI, Newsha; HESS, Kaitlyn; ALM, Eric J.; MATUS, Mariana; CHAI, Peter R. "Waste Not, Want Not" – Leveraging Sewer Systems and Wastewater-Based Epidemiology for Drug Use Trends and Pharmaceutical Monitoring. **Journal of Medical Toxicology**, v. 17, n. 4, p. 397-410, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13181-021-00853-4>

ESCOLÀ CASAS, Mònica; SCHRÖTER, Nicole S.; ZAMMIT, Ian; CASTAÑO-TRIAS, Marc; RODRÍGUEZ-MOAZ, Sara; GAGO-FERRERO, Pablo; COROMINAS, Lluís. Showcasing the potential of wastewater-based epidemiology to track pharmaceuticals consumption in cities: Comparison against prescription data collected at fine spatial resolution. **Environmental International**, v. 150, p. 106404, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106404>

GAO, Jianfa; BANKS, Andrew; LI, Jiaying; JIANG, Guangming; LAI, Foon Yin; MUELLER, Jochen F.; THAI, Phong K. Evaluation of in-sewer transformation of selected illicit drugs and pharmaceutical biomarkers. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 1172-1181, 2017.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD principles on water governance**. Paris: OECD Publishing, 2015.

ORT, Christoph; LAWRENCE, Michael Glen; REUNGOAT, Julien; MUELLER, Jochen Friedrich. Sampling for PPCPs in wastewater systems: Comparison of different sampling modes and optimization strategies. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 16, p. 6289-6296, 2010.

ORT, Christoph; VAN NUIJS, Alexander L. N.; BERSET, Jean-Daniel; BIJLSMA, Lubertus; CASTIGLIONI, Sara; COVACI, Adrian; DE VOOGT, Pim; EMKE, Erik; FATTA-KASSINOS, Despo; GRIFFITHS, Paul; HERNÁNDEZ, Félix; GONZÁLEZ-MARIÑO, Iria; GRABIC, Roman; KASPRZYK-HORDERN, Barbara; MASTROIANNI, Nicola; MEIERJOHANN, Axel; NEFAU, Thomas; ÖSTMAN, Marcus; PICO, Yolanda; RACAMONDE, Ines; REID, Malcolm; SLOBODNIK, Jaroslav; TERZIC, Senka; THOMAIDIS, Nikolaos; THOMAS, Kevin V. Spatial differences and temporal changes in illicit drug use in Europe quantified by wastewater analysis. **Addiction**, v. 109, n. 8, p. 1338-1352, 2014. <https://doi.org/10.1111/add.12570>

RICE, Jack; KANNAN, Andrew M.; CASTRIGNANÒ, Erika; JAGADEESAN, Kishore; KASPRZYK-HORDERN, Barbara. Wastewater-based epidemiology combined with local prescription analysis as a tool for temporal monitoring of drugs trends: a UK perspective. **Science of the Total Environment**, v. 735, p. 139433, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139433>

SIMS, Natalie; KASPRZYK-HORDERN, Barbara. Future perspectives of wastewater-based epidemiology: monitoring infectious disease spread and resistance to the community level. **Environment International**, v. 139, 105689, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105689>

SOUZA, Marcelo Nogueira de. O Índice de Vulnerabilidade das Unidades Municipais de Saúde como estratégia de enfrentamento da COVID-19 na periferia de Curitiba. **Observatório das Metrópoles**, 2020.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME. **World cities report 2022: envisioning the future of cities**. Nairobi: UN-Habitat, 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global strategy on digital health 2020-2025**. Geneva: WHO, 2021.

Artigo Científico

Jovens escritores: resíduos eletrônicos e consciência ambiental na forma de livros artesanais

Young writers: electronic waste and environmental awareness through handmade books

Vanessa Souza Álvares de Mello^{1*} , **Rejane de Barros Araújo¹** , **Eduardo Garcia Nunes Rosa¹** ,
Jéssica Costa da Silva dos Santos¹ , **Luan Eiichi Takahashi Hirota¹** 

RESUMO

O presente trabalho apresenta os resultados do projeto de extensão "Jovens Escritores", desenvolvido pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), com o objetivo de capacitar estudantes do ensino médio integrado na produção de livros artesanais voltados à sustentabilidade e ao reaproveitamento de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). A iniciativa interdisciplinar buscou promover consciência ambiental, criatividade e valorização da literatura como instrumento de transformação social, envolvendo também uma escola bilíngue parceira para estimular a reflexão crítica e o engajamento juvenil. A metodologia, de caráter qualitativo, exploratório e aplicado, baseou-se em três etapas: planejamento, execução e compartilhamento/realimentação, realizadas ao longo de 8 meses. As atividades incluíram a seleção e a capacitação de discentes dos cursos técnicos, a elaboração de materiais didáticos, oficinas educativas e palestras em escolas públicas e privadas, a produção de livros bilíngues e o acompanhamento contínuo das ações. Participaram 23 estudantes do IFPA, orientados por docentes e tutores do Grupo de Estudos em Robótica Aplicada e Educacional (GERAE), impactando cerca de 210 alunos da rede básica. Os resultados evidenciam engajamento expressivo, desenvolvimento de habilidades socioemocionais (liderança, empatia e comunicação) e o protagonismo juvenil na disseminação de práticas sustentáveis, culminando na Noite de Autógrafos, evento de socialização das produções. Conclui-se que o projeto fortaleceu a cultura de reaproveitamento de materiais e a educação ambiental criativa, configurando-se como uma experiência educacional transformadora e replicável em diferentes contextos educacionais.

Palavras-chave: economia circular; aprendizagem criativa; reutilização; sustentabilidade; bilinguismo.

ABSTRACT

This paper presents the results of the extension project "Young Writers", developed at the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), which aimed to train high school students in the production of handmade books focused on sustainability and the reuse of electronic waste (E-waste). The interdisciplinary initiative sought to promote environmental awareness, creativity, and the appreciation of literature as an instrument of social transformation. A bilingual partner school was also involved to encourage critical thinking and youth engagement. The methodology, characterized as qualitative, exploratory, and applied, was structured in three stages—planning, execution, and sharing/feedback—carried out over eight months. Activities included the selection and training of technical course students, the development of didactic materials, educational workshops and lectures in public and private schools, the production of bilingual books, and continuous monitoring of actions. A total of 23 students from IFPA participated, under the guidance of teachers and tutors from the Grupo de Estudos em Robótica Aplicada e Educacional (GERAE), impacting approximately 210 students from the basic education network. The results show significant engagement, the development of socio-emotional skills (leadership, empathy, and communication), and youth protagonism in promoting sustainable practices, culminating in the "Book Signing Night", an event to showcase the students' creations. It is concluded that the project strengthened the culture of material reuse and creative environmental education, standing out as a transformative and replicable educational experience that can be applied to different educational contexts.

Keywords: circular economy; creative learning; reuse; sustainability; bilingualism.

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - Belém (PA), Brasil.

*Endereço para correspondência: Conj. Dom Fernando, 56 - Travessa Humaitá, 1975, CEP: 66093-080, Belém, PA, Brasil. E-mail: vanessa.mello@ifpa.edu.br

INTRODUÇÃO

A literatura é uma poderosa ferramenta educacional para promover reflexão, criatividade e transformação social. Associada à sustentabilidade, atua na conscientização e no engajamento juvenil. Para Vygotsky (2000), o desenvolvimento psicológico ocorre via interação social e mediação cultural, reforçando a importância de envolver jovens em experiências expressivas e significativas de aprendizagem.

A evolução tecnológica e o consumo massivo geram um grande desafio: o aumento exponencial dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Em 2022, a geração global atingiu 62 milhões de toneladas, com projeção de 82 milhões até 2030. O Brasil produziu 2,4 milhões de toneladas (4% do total global), sendo o quinto maior produtor mundial (Baldé *et al.*, 2024; Dias *et al.*, 2022). Localmente, a gestão de REEE na Região Metropolitana de Belém enfrenta gargalos estruturais. Oliveira (2023) aponta uma demanda reprimida por descarte, evidenciada pelo recolhimento de 11 toneladas de resíduos em poucos meses após a instalação de um ecoponto na capital. Logo, práticas educativas sobre o ciclo de vida e o reaproveitamento criativo de eletrônicos são essenciais à conscientização ambiental.

Projetos de extensão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 4 e 12) são fundamentais. A extensão transpõe o conhecimento acadêmico para ações transformadoras em prol da sustentabilidade humana (Lima, 2025). A inserção estudantil em iniciativas sobre resíduos sólidos impulsiona o desenvolvimento local (Haydu *et al.*, 2024) e cumpre o ODS 4 ao inovar o ensino básico (Lenzi; Gomes, 2023; Vieira; Menses; Duarte, 2025). Simultaneamente, a Aprendizagem Criativa e a cultura *maker* promovem autonomia, colocando o aluno no centro da construção do conhecimento via experimentação (Gottschalck; Bassani, 2023; Pontes *et al.*, 2025). Integrar a educação *maker* aos ODS mobiliza a resolução de problemas reais (Ferreira; Garcia, 2024), consolidando os princípios criativos de Resnick (2020). Na prática, o uso de REEE em sala de aula funciona como um recurso pedagógico para a robótica sustentável, o qual auxilia diretamente na diminuição do impacto ambiental e incentiva o amadurecimento da responsabilidade ecológica dos

estudantes por meio de soluções tangíveis (Galvão *et al.*, 2020). Paralelamente, o bilinguismo e a abordagem CLIL atuam como uma fusão inovadora que integra o aprendizado de conceitos técnicos ao desenvolvimento linguístico, proporcionando uma experiência educacional holística e conectada às demandas globais da sociedade contemporânea (Coyle; Hood; Marsh, 2010), potencializando assim o impacto formativo.

Iniciativas recentes comprovam o potencial de projetos extensionistas sustentáveis. Santana Neta (2022) obteve resultados expressivos na reciclagem de lixo eletrônico no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). No Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Lima *et al.* (2019) uniram aspectos lúdicos e socioambientais transformando resíduos em recursos pedagógicos no projeto “De Lixo a Bicho”. Já Nascimento (2021) evidenciou que vivências imersivas em trilhas ecológicas despertam rápida sensibilidade para a conservação. Tais práticas confirmam que a aproximação lúdica à problemática ambiental gera engajamento nas escolas.

Apesar dos avanços, há escassez de registros que integrem educação ambiental, aprendizagem criativa, produção literária e bilinguismo, faltando metodologias reprodutíveis que evidenciem impactos cognitivos e socioambientais. Diante disso, este artigo objetivou descrever e analisar o projeto de extensão “Jovens Escritores”, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) – Campus Belém, em parceria com uma escola bilíngue. Buscou-se discutir seus resultados, evidenciando seu potencial como prática inovadora, interdisciplinar e replicável de educação ambiental, sustentabilidade e protagonismo juvenil.

METODOLOGIA

Tipo de pesquisa e abordagem

O presente estudo enquadra-se como uma pesquisa qualitativa, exploratória e aplicada, desenvolvida no contexto da educação ambiental e da aprendizagem criativa. A abordagem qualitativa foi escolhida por possibilitar uma compreensão ampla e interpretativa do fenômeno educativo analisado, centrando-se nas percepções, atitudes

e interações dos participantes ao longo do processo formativo. De acordo com Gil (2010), esse tipo de pesquisa busca compreender o significado das experiências humanas, permitindo ao pesquisador interpretar os fenômenos em seu ambiente natural.

A pesquisa caracteriza-se metodologicamente como um Estudo de Caso (Yin, 2015), pois investiga um fenômeno contemporâneo — a integração entre resíduos eletrônicos, literatura e bilinguismo — inserido em seu contexto real de sala de aula. Além disso, a condução das atividades apresenta contornos de Pesquisa-Ação (Thiollent, 2011), uma vez que ocorreu uma intervenção prática dos pesquisadores e tutores na realidade escolar, visando resolver um problema coletivo (o descarte inadequado de REEE) por meio da ação educativa continuada.

O caráter exploratório justifica-se pela necessidade de investigar uma temática ainda pouco sistematizada no campo educacional: o uso dos resíduos eletrônicos como ferramenta de sensibilização ambiental e expressão literária. Diferentemente de abordagens tradicionais que tratam o lixo eletrônico apenas sob a ótica técnica ou ambiental, este trabalho o reconhece como um recurso pedagógico capaz de integrar dimensões cognitivas, artísticas e sociais da aprendizagem. A pesquisa também se caracteriza como aplicada, por buscar resultados concretos que possam gerar impacto social e replicabilidade.

A metodologia adotada baseia-se nos princípios da Aprendizagem Criativa, cujos pilares (imaginar, criar, brincar e compartilhar) sustentam a concepção de que o conhecimento é construído por meio da experimentação e da colaboração. Dessa forma, o projeto “Jovens Escritores” propôs-se a transformar a sala de aula em um espaço de produção autoral e reflexão crítica, no qual os estudantes assumem papel ativo como agentes de mudança social e ambiental. Essa abordagem metodológica favoreceu a integração entre ciência, arte, tecnologia e linguagem, ampliando o alcance da educação ambiental e tornando o processo de aprendizagem mais significativo.

Contexto da pesquisa

O projeto foi desenvolvido no IFPA – Campus Belém, no âmbito das ações de extensão integradas às práticas

de ensino e de responsabilidade socioambiental da instituição. O IFPA, enquanto instituição pública de educação tecnológica, mantém compromisso com a formação integral de seus estudantes, estimulando iniciativas que conectam o aprendizado teórico à vivência social. Dentro desse propósito, o projeto Jovens Escritores surgiu como uma proposta interdisciplinar, unindo professores, tutores e alunos em torno da temática da sustentabilidade e do reaproveitamento de REEE.

Participaram da execução 23 estudantes do ensino médio técnico integrado, distribuídos entre os cursos de Eletrônica, Saneamento, Design de Interiores, Desenvolvimento de Sistemas e Edificações. Esses alunos foram selecionados por meio de uma amostragem não probabilística de caráter intencional (Gil, 2010), pautada em critérios de disponibilidade, interesse e desempenho acadêmico, priorizando-se o engajamento em ações de protagonismo estudantil e criatividade. Os participantes receberam acompanhamento direto de duas docentes coordenadoras e dez tutores vinculados ao Grupo de Estudos em Robótica Aplicada e Educacional (GERAE), responsável pela orientação técnica, pedagógica e pelo suporte logístico das atividades.

O projeto contou também com a parceria de uma escola bilíngue de Belém, cuja colaboração possibilitou a integração de elementos da língua inglesa no processo de ensino e aprendizagem. Essa parceria contribuiu para a ampliação do repertório comunicativo e cultural dos estudantes, ao mesmo tempo em que reforçou a dimensão global das discussões ambientais e o desenvolvimento de produções autorais bilíngues.

As ações foram realizadas em um período de 8 meses, abrangendo oficinas, palestras e eventos de socialização. As atividades ocorreram tanto no IFPA quanto em três escolas das redes pública e privada, onde foram promovidas oficinas sobre sustentabilidade, economia circular e reaproveitamento de materiais eletrônicos. Estima-se que cerca de 210 estudantes da educação básica tenham sido impactados diretamente pelas atividades de extensão.

Além do impacto educacional, o projeto fortaleceu o diálogo entre ensino, pesquisa e extensão, reafirmando o papel do IFPA como agente de transformação social e

difusão do conhecimento científico. O ambiente institucional, marcado pela diversidade de cursos e pela ênfase na formação tecnológica, proporcionou as condições ideais para o desenvolvimento de uma experiência colaborativa, criativa e ambientalmente comprometida, capaz de integrar diferentes áreas do saber e promover práticas sustentáveis dentro e fora da escola.

Etapas metodológicas

A metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto foi estruturada em três etapas principais, que ocorreram de forma contínua e integrada ao longo de 8 meses: planejamento, execução e compartilhamento/realimentação. Essa divisão estrutural alinha-se aos ciclos metodológicos propostos para a pesquisa-ação (Thiollent, 2011), que pressupõem a articulação entre o diagnóstico da realidade, a intervenção prática e a posterior avaliação coletiva dos resultados.

Planejamento

A etapa de planejamento consistiu na definição dos objetivos específicos, do cronograma e das estratégias pedagógicas que orientariam o desenvolvimento do projeto, uma fase que, segundo Gil (2010), é indispensável para garantir a viabilidade e o rigor das ações em campo. Foram realizadas reuniões presenciais e virtuais entre as docentes coordenadoras, tutores do GERA E e representantes da escola bilíngue parceira. Esses encontros tiveram como propósito alinhar o conteúdo temático das oficinas, estabelecer os critérios de seleção dos alunos e determinar os recursos materiais e humanos necessários.

Durante essa fase, elaboraram-se os roteiros das capacitações e as diretrizes metodológicas que norteariam a abordagem das oficinas. Também foram confeccionados materiais didáticos sobre sustentabilidade, economia circular e reutilização de resíduos eletrônicos, de modo a garantir a coerência entre os princípios da educação ambiental e as práticas criativas previstas no projeto. O planejamento incluiu ainda a definição de indicadores qualitativos para a avaliação das aprendizagens e o registro das atividades em diário de campo.

Execução

A execução compreendeu o conjunto de atividades práticas e formativas realizadas com os estudantes do ensino médio técnico e com os participantes das escolas parceiras. Esta fase fundamentou-se na aplicação prática dos “4 Ps” da Aprendizagem Criativa (Projetos, Paixão, Pares e Pensar brincando) propostos por Resnick (2020), materializando o conhecimento por meio da experimentação direta. Nessa etapa, foram conduzidas oficinas temáticas sobre educação ambiental, produção artesanal de livros e escrita autoral bilíngue, articulando conteúdos técnicos e expressivos. As atividades buscaram estimular a criatividade, o senso crítico e o trabalho colaborativo, aproximando os alunos dos princípios da sustentabilidade e do reaproveitamento de materiais.

Os estudantes do IFPA participaram ativamente na produção de livros artesanais confeccionados com materiais recicláveis e elementos retirados de REEE, transformando o “fazer” em uma estratégia pedagógica para o fomento da educação *maker* (Ferreira; Garcia, 2024). Além disso, elaboraram textos literários em português e inglês abordando temas socioambientais, sob orientação das docentes e dos tutores. Durante as oficinas externas, realizadas em escolas públicas e privadas de Belém, os estudantes atuaram como multiplicadores, apresentando o projeto e mediando atividades.

Ao longo desta fase, as ações foram acompanhadas por meio de registros fotográficos e anotações em diário de campo, permitindo a coleta de evidências qualitativas sobre o engajamento e a evolução dos participantes.

Compartilhamento/realimentação

A última etapa consistiu na socialização dos resultados e na reflexão coletiva sobre as aprendizagens obtidas. Foram promovidos encontros de avaliação com os participantes para discutir os desafios, as melhorias e os impactos percebidos durante o projeto. O ponto culminante dessa fase foi a realização da Noite de Autógrafos, evento aberto à comunidade escolar, no qual os livros produzidos pelos estudantes foram apresentados e lançados publicamente.

Essa etapa teve papel fundamental no fortalecimento do protagonismo juvenil e na consolidação das competências

desenvolvidas ao longo do processo, como liderança, empatia, responsabilidade e comunicação. A troca de experiências e a exposição pública das produções literárias possibilitaram a valorização do esforço coletivo e a ampliação da consciência ambiental entre os envolvidos. O compartilhamento das experiências também gerou subsídios para futuras edições do projeto, consolidando a metodologia como uma prática replicável e sustentável em contextos educacionais diversos.

Materiais e instrumentos

As atividades desenvolvidas no projeto demandaram o uso de materiais diversificados, selecionados de acordo com os objetivos pedagógicos e ambientais da proposta. A escolha dos insumos buscou conciliar aspectos de viabilidade técnica, sustentabilidade e estímulo à criatividade dos participantes, priorizando o reaproveitamento de recursos disponíveis e de baixo custo.

Entre os materiais utilizados, destacaram-se os resíduos eletrônicos obtidos por meio de doações e coletas realizadas pelos próprios estudantes. Esses resíduos incluíam placas de circuito impresso, cabos, fios, conectores, teclas de computador, peças de ventiladores e outros componentes inservíveis provenientes de equipamentos eletroeletrônicos descartados. Esses elementos foram incorporados às produções artesanais, especialmente na confecção das capas e das ilustrações dos livros, simbolizando o reaproveitamento criativo e a ressignificação de materiais que, em outras circunstâncias, seriam descartados.

Para a montagem dos livros artesanais, foram utilizados materiais recicláveis e itens de encadernação, como papel reciclado, folhas de ofício reaproveitadas, papel-cartão, tintas, pincéis, colas, tesouras, grampeadores e linhas coloridas. Esses materiais foram combinados com partes de resíduos eletrônicos de maneira estética e simbólica, valorizando o conceito de sustentabilidade e o potencial artístico do reaproveitamento.

Além dos materiais físicos, foram empregados instrumentos de apoio pedagógico e tecnológico, incluindo computadores, projetores multimídia e câmeras digitais para registro fotográfico e audiovisual das etapas do projeto. As imagens e vídeos produzidos serviram tanto

para fins de documentação quanto para a divulgação das ações realizadas em eventos acadêmicos e nas redes sociais institucionais.

Durante as oficinas, foram utilizados roteiros didáticos e fichas de acompanhamento. Os roteiros foram elaborados com base nas diretrizes metodológicas da escola bilíngue parceira, contendo o passo a passo de como estruturar as histórias, confeccionar os livros e aplicar os termos em língua inglesa. Já as fichas consistiram em listas de controle de frequência empregadas para aferir a assiduidade e a participação ativa dos alunos. A seleção e o uso desses materiais foram orientados pelos princípios da Educação Ambiental Crítica. De acordo com Layrargues (2018), essa vertente propõe a superação de visões puramente tecnicistas, estimulando o questionamento do modelo consumista, a emancipação social e a reflexão sobre as causas estruturais da degradação ecológica, desconstruindo a lógica do descarte desenfreado.

Procedimentos de coleta e análise de dados

A coleta de dados foi realizada de forma contínua durante o desenvolvimento do projeto, acompanhando cada uma das etapas metodológicas descritas anteriormente. O objetivo dessa etapa foi documentar o processo formativo, as interações entre os participantes e as práticas pedagógicas empregadas, permitindo uma análise consistente dos impactos educacional e ambiental da iniciativa.

Os principais procedimentos utilizados para a coleta das informações foram a observação participante, o registro em diário de campo, o registro fotográfico e a análise documental dos materiais produzidos. A observação participante ocorreu de maneira sistemática ao longo das oficinas e dos encontros, permitindo o acompanhamento direto das atividades e a identificação de comportamentos, atitudes e níveis de engajamento dos estudantes. Essa técnica possibilitou compreender o processo de aprendizagem em seu contexto natural, considerando as relações interpessoais e o ambiente escolar como elementos centrais da análise.

Os diários de campo foram utilizados por docentes e tutores para registrar percepções, situações relevantes, dificuldades encontradas e avanços observados em cada

fase. Esses registros forneceram informações descritivas que contribuíram para compreender o percurso pedagógico e a evolução dos participantes. O registro fotográfico e audiovisual foi empregado para documentar as etapas de montagem dos livros, as oficinas e os eventos públicos, funcionando como apoio visual para a análise qualitativa.

A análise dos dados seguiu uma abordagem qualitativa e interpretativa, fundamentada nos pressupostos de Minayo (2007) e estruturada na triangulação das informações coletadas. Essa técnica permitiu cruzar diferentes fontes, como observações de campo, registros escritos e os materiais produzidos pelos alunos, de modo a garantir maior consistência e confiabilidade na interpretação dos resultados e na verificação do impacto formativo no alunado. As informações foram organizadas em categorias temáticas relacionadas aos objetivos do projeto, como engajamento, criatividade, consciência ambiental e integração interdisciplinar (sustentabilidade e língua inglesa). A partir dessas categorias, tornou-se possível identificar padrões de aprendizagem e significados nas experiências relatadas, preservando a singularidade das vivências dos participantes e as mudanças de postura observadas em relação ao descarte de resíduos.

Por envolver a interação com estudantes e a coleta de percepções sobre o processo educativo, todas as etapas de coleta e análise de dados foram conduzidas de forma ética e transparente, em conformidade com os preceitos da Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde (Brasil, 2016). A participação dos discentes e das instituições parceiras ocorreu mediante autorização e consentimento, garantindo o caráter voluntário e o respeito à autonomia dos envolvidos. Além disso, assegurou-se a privacidade das informações, a proteção das identidades e a integridade dos dados, os quais foram utilizados estritamente para fins de análise acadêmica e científica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A execução evidenciou consistentes resultados pedagógicos e socioambientais. O engajamento, a criatividade e a corresponsabilidade dos participantes permearam as atividades, confirmando a aderência da proposta às expectativas estudantis. A produção autoral aliada à

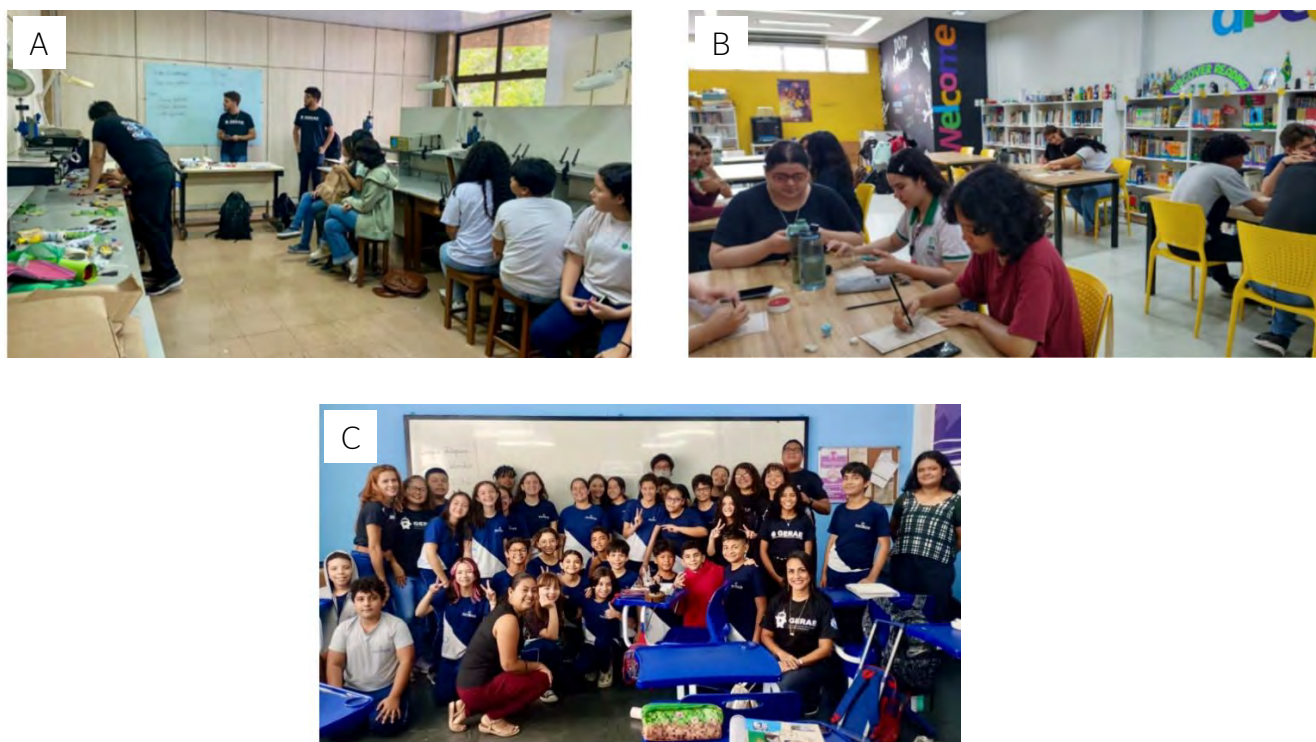
temática ambiental favoreceu a participação ativa, corroborando Santana Neta (2022), que observou alta adesão em projetos de reciclagem eletrônica, e alinhando-se a Resnick (2020) sobre a eficácia de projetos movidos por paixão e colaboração.

O ciclo de capacitação, como demonstrado na Figura 1A, foi decisivo para a apropriação dos referenciais de sustentabilidade, escrita e prototipagem. Nas oficinas do GERAEE, a progressiva autonomia dos alunos na organização do trabalho confirmou a perspectiva de Pontes *et al.* (2025) sobre a cultura *maker* como motor de autonomia. Semelhante à experiência de Lima *et al.* (2019), com o projeto “De Lixo a Bicho”, o uso de resíduos despertou uma postura investigativa. Paralelamente, a escola bilíngue ampliou o repertório em inglês voltado à área ambiental, aumentando a confiança comunicativa discente.

Na elaboração dos livros (Figura 1B), a interdisciplinaridade ficou evidente. Os alunos articularam conceitos de química, física e biologia para problematizar o descarte de REEE, integrando-os a narrativas originais. O fazer artístico uniu reflexão teórica e um produto concreto. Essa aplicação de metodologias criativas é essencial ao pensamento crítico, conforme Gottschalck e Bassani (2023). A arte atuou como vetor para a Educação Ambiental Crítica (Layrargues, 2018), permitindo transcender o descarte e ressignificar o lixo tecnológico como instrumento de expressão.

A difusão do projeto nas três escolas externas (Figura 1C) sensibilizou novos estudantes e permitiu aos bolsistas atuarem como multiplicadores. Questionários pós-intervenção indicaram melhora na compreensão de economia circular e disposição para o reaproveitamento. Tais resultados validam Nascimento (2021) sobre o potencial das vivências práticas na rápida sensibilização ambiental. A atuação mediadora dos discentes exemplifica a inserção social necessária ao desenvolvimento sustentável local (Haydu *et al.*, 2024), respondendo à demanda reprimida por gestão de resíduos em Belém (Oliveira, 2023).

A Noite de Autógrafos (Figura 2) consolidou vínculos, fortaleceu a autoestima acadêmica e legitimou o esforço coletivo perante a comunidade. A visibilidade do evento sinaliza a viabilidade de replicação do projeto em outros



Fonte: autores (2024).

Figura 1 - Etapas de execução do projeto “Jovens Escritores”. (A) Alunos em oficina de capacitação sobre prototipagem com resíduos; (B) produção autoral dos livros artesanais bilingües; (C) atuação como multiplicadores nas escolas parceiras



Fonte: autores (2024).

Figura 2 - Momento da Noite de Autógrafos com a participação dos alunos, dos familiares e da imprensa

contextos. Esse momento culminante materializou a mobilização ativa dos estudantes para a resolução de problemas reais, como defendido por Ferreira e Garcia (2024).

Os registros em diário de campo e os relatos dos tutores evidenciaram avanços em competências socioemocionais (liderança, comunicação, empatia) durante a resolução colaborativa de problemas. Esses avanços formativos desenvolveram uma postura crítica diante de desafios

ambientais, refletindo a cultura participativa descrita por Jenkins, Ito e Boyd (2021), na qual o engajamento e a colaboração preparam os jovens para a cidadania ativa.

Em síntese, a articulação entre educação ambiental, literatura e reaproveitamento de REEE qualificou a aprendizagem. Os indícios atestam a formação de atitudes sustentáveis prescindindo de infraestrutura complexa, confirmando a alta transferibilidade da proposta. Conforme demonstrado por Vieira, Meneses e Duarte (2025) e Lenzi e Gomes (2023), evidencia-se que a extensão atua diretamente no cumprimento dos ODS, transformando a escola em polo irradiador de inovação e cidadania.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o projeto de extensão “Jovens Escritores” confirmam sua relevância como uma experiência educacional transformadora, capaz de integrar de maneira efetiva a educação ambiental, a expressão literária, o bilinguismo e a prática inovadora de reutilização de resíduos eletrônicos. A proposta demonstrou a viabilidade

e o impacto positivo da articulação entre sustentabilidade e processos pedagógico-criativos no ambiente escolar de Belém, promovendo o protagonismo estudantil e contribuindo para a formação de cidadãos críticos, criativos e socialmente engajados.

A trajetória do projeto, desde a fase de capacitação inicial até a culminância na Noite de Autógrafos, revelou o desenvolvimento de competências técnicas e habilidades socioemocionais essenciais à formação integral dos estudantes. Observou-se que a autonomia na condução das oficinas, o pensamento crítico refletido nas narrativas literárias, a empatia nas interações com as escolas parceiras e a colaboração constante entre os participantes são evidências do potencial formativo da iniciativa. A produção dos livros bilíngues e a disseminação de conhecimento nas oficinas e palestras resultaram em impacto social perceptível, ampliando a conscientização ambiental entre os participantes diretos e a comunidade escolar envolvida.

Diante dos resultados alcançados, o projeto “Jovens Escritores” se apresenta como um modelo promissor de extensão e de educação inovadora, integradora e sustentável. Para o aprimoramento e a continuidade da iniciativa,

recomenda-se: (a) ampliar o alcance do projeto, envolvendo um número maior de escolas públicas e privadas de Belém e de outros municípios; (b) aprofundar a abordagem bilíngue, incentivando a produção textual em língua inglesa e o uso de contextos comunicativos autênticos; (c) ampliar a integração interdisciplinar, incorporando temas como design gráfico, educação financeira e empreendedorismo sustentável; (d) fortalecer parcerias institucionais voltadas à coleta, ao tratamento e à reutilização de resíduos eletrônicos; e (e) implantar um sistema de acompanhamento longitudinal que permita avaliar o impacto da experiência na trajetória acadêmica e profissional dos participantes.

As evidências reunidas ao longo do processo confirmam o potencial do projeto como referência replicável de educação ambiental criativa, demonstrando que a combinação entre ciência, arte, tecnologia e expressão literária é capaz de gerar aprendizagens significativas e duradouras. O projeto “Jovens Escritores” reafirma, assim, o papel da juventude como agente transformador e evidencia o poder da criatividade como instrumento de sustentabilidade e mudança social.

REFERÊNCIAS

- BALDÉ, Cornelis P.; KUEHR, Ruediger; YAMAMOTO, Tales; MCDONALD, Rosie; D'ANGELO, Elena; ALTHAF, Shahana; BEL, Garam; DEUBZER, Otmar; FERNANDEZ-CUBILLO, Elena; FORTI, Vanessa; GRAY, Vanessa; HERAT, Sunil; HONDA, Shunichi; IATTONI, Giulia; KHETRIWAL, Deepali S.; LUDA DI CORTEMIGLIA, Vittoria; LOBUNTSOVA, Yuliya; NNOROM, Innocent; PRALAT, Noémie; WAGNER, Michelle. **The Global E-waste Monitor 2024**. 2. ed. Geneva: ITU; Bonn: UNITAR, 2024. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>. Acesso em: 12 fev. 2026.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Conselho Nacional de Saúde. Resolução nº 510, de 07 de abril de 2016. Dispõe sobre as normas aplicáveis a pesquisas em Ciências Humanas e Sociais [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 98, p. 44-46, 24 maio 2016.
- COYLE, Do; HOOD, Philip; MARSH, David. **CLIL: Content and Language Integrated Learning**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- DIAS, Pablo; PALOMERO, João; CENCI, Marcelo Pilotto; SCARAZZATO, Tatiana; BERNARDES, Andréa Moura. Electronic waste in Brazil: generation, collection, recycling and the covid pandemic. **Cleaner Waste Systems**, v. 3, 100022, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100022>
- FERREIRA, André Lozano; GARCIA, Tatiana de Souza Mendes. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: fomento à educação maker e à aprendizagem criativa. *Revista Invenções Pedagógicas*, [S. l.], n. 1, 2024. Disponível em: <https://revista.isesp.edu.br/index.php/inpe/article/view/14>. Acesso em: 25 fev. 2026.
- GALVÃO, Angel Pena; REINOSO, Luiz Fernando; SOUZA JUNIOR, João Lucio de; SOUSA JUNIOR, Edinelson Luis; NETO, Manoel Sarmanho; TAVARES, Eduardo José Caldeira. Robótica sustentável: uma visão de sustentabilidade dos estudantes do Ensino Fundamental na Amazônia em atividades de robótica educacional. *In: As Ciências Humanas como Protagonistas no Mundo Atual*. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020. cap. 13, p. 155-162.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOTTSCHALCK, Diana Raquel Schneider; BASSANI, Patrícia Brandalise Scherer. Aprendizagem criativa: uma revisão bibliográfica. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 6, p. 5695-5710, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n6-131>

HAYDU, Verônica Bender; FREITAS, Maria Clara; MELO, Camila Muchon de; SANTOS, Daniela de Sousa; UEDA, Giovana Oguido; CELLI, Livia; OGATA, Mayara Yukari. Inserção social de estudantes universitários na promoção da educação ambiental: uma contribuição ao desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 6, p. e3335, 2024. <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i6.3335>

JENKINS, Henry; ITO, Mizuko; BOYD, Danah. **Participatory culture in a networked era: a conversation on youth, learning, commerce, and politics**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2021.

LAYRARGUES, Philippe Pomier. Subserviência ao capital: educação ambiental sob o signo do antiecológico. **Pesquisa em Educação Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 28-47, 2018. <https://doi.org/10.18675/2177-580X.vol13.n1.p28-47>

LENZI, Livia Aparecida Ferreira; GOMES, Marcos Aurélio. Objetivos de desenvolvimento sustentável e extensão universitária: ações desenvolvidas no curso de biblioteconomia da UFAL. **Revista Eletrônica Extensão em Debate**, v. 12, n. 15, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.28998/rexd.v12i14>

LIMA, Cristian Serafim Martins; SCHUMANN, André da Silva; LIMAS, Carlos Ranieri; ROSA, Gabriela Pieritz; STEFANELLO, Arthur Eberhardt; JESUS, Camila Pereira de; MARIANO, Jade Hellen; COELHO, Lucas Gabriel; GAIVÃO, Melina Chiba; DOLZAN, Maressa; KREMER, Laura Pioli; PEIXE, Rita Inês Petrykowski. Projeto "de lixo a bicho": extensão voltada à educação, inovação e à sustentabilidade. *In: SEMINÁRIO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA DA REGIÃO SUL (SEURS)*, 37., 2019, [S. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2019.

LIMA, Rafael Gustavo de. **O incentivo à sustentabilidade humana por meio da extensão universitária**. 2025. Tese (Doutorado em Administração) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.

MINAYO, Maria Cecília Souza (org.). **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 26. ed. Petrópolis: Vozes, 2007.

NASCIMENTO, José Welliton Silva. Educação ambiental para sustentabilidade: o caso do projeto de extensão "Eco trilha em defesa do rio Uruçuí Preto". **Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 383-408, 2021. <https://doi.org/10.14295/ambeduc.v26i1.11085>

OLIVEIRA, Moises Santiago de. **Educação ambiental como instrumento de política pública: uma análise da gestão do lixo eletrônico na cidade de Belém-PA**. 2023. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local na Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

PONTES, Rosemary Corrêa; QUADROS, Solange Cassel Lopes de; SANTOS, Robson Barroso dos; ALMEIDA, Dalva de; SOUZA, Kátia Fabiane Delmadi de. Aprendizagem criativa e cultura maker: a construção do conhecimento por meio da experimentação. **Anais Eventos**, [S. l.], 2025. <https://doi.org/10.56238/CONEDUCA-065>

RESNICK, Mitchel. **Lifelong kindergarten: cultivating creativity through projects, passion, peers, and play**. Cambridge: MIT Press, 2020.

SANTANA NETA, Maria Luiza de. **Reciclagem para o lixo eletrônico na microrregião de Angicos**. 2022. Relatório (Prática Profissional) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Lajes, 2022.

THIOLLENT, Michel. **Metodologia da pesquisa-ação**. 18. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

VIEIRA, Antonia Maíra Emelly Cabral da Silva; MENESES, Thalita Juliana de Freitas; DUARTE, Wladimir Geovanne dos Santos. Alfabetização e extensão universitária: contribuições do PraLEE para atendimento do objetivo de desenvolvimento sustentável 4 (ODS 4) da agenda 2030. **Revista Extendere**, v. 11, n. 1, p. 11-23, 2025. <https://doi.org/10.59776/2318-2350.2025.7656>

YOGOTSKY, Lev S. **A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores**. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Razões para não utilizar indicadores de perdas de água expressos em percentual

Reasons for not using water loss indicators expressed as a percentage

Marcelo Dalcil Depexe^{1*} 

RESUMO

Este trabalho avalia o indicador de perdas expresso em percentual e discute aspectos relativos à sua formulação, evidenciando os problemas de utilizá-lo para a gestão, a tomada de decisão, as comparações e a definição de metas. Avaliam-se algumas situações apontadas pela literatura e realiza-se uma análise dos indicadores do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS), demonstrando que o uso do percentual não é adequado para comparação entre municípios, prestadores e para analisar a evolução de um mesmo local, uma vez que o consumo e as ações realizadas variam ao longo do tempo, provocando variações em diferentes magnitudes no indicador. Os indicadores do SNIS têm um problema adicional, pois não desconta o volume exportado do denominador da fórmula. Assim, o referencial não é o Volume Distribuído no sistema. Essa condição provoca uma redução artificial no resultado, que não reflete a realidade da eficiência operacional em campo, nos municípios que exportam água tratada. Portanto, a recomendação é que se evite utilizar indicadores em percentual, priorizando o uso de indicadores como o INO50 – Índice Bruto de Perdas Lineares (m³/km/dia) e o INO51 – Índice de Perdas por Ligação (litros/lig/dia). Além disso, para análise mais aprofundada e tomada de decisão assertiva, os indicadores de perdas totais não são suficientes, sendo recomendável a adoção de indicadores separados para perda real e aparente.

Palavras-chave: indicadores; percentual; SNIS; perdas de água.

ABSTRACT

This paper evaluates the water loss indicator expressed as a percentage and discusses aspects related to its formulation, highlighting the problems of using it for management, decision-making, comparisons, and goal setting. Several situations pointed out in the literature are evaluated, and an analysis of the National Sanitation Information System (SNIS) indicators is carried out, demonstrating that the use of the percentage is not suitable for comparison between municipalities, service providers, or for analyzing the evolution of the same location, since consumption and actions taken vary over time, causing variations of different magnitudes in the indicator. The SNIS indicators have an additional problem because they do not deduct the exported volume from the formula's denominator. Thus, the reference is not the volume distributed in the system. This condition causes an artificial reduction in the result, which does not reflect the reality of operational efficiency in the field in municipalities that export treated water. Therefore, the recommendation is to avoid using percentage indicators, prioritizing the use of indicators such as m³/km/day and liters/connection/day. Furthermore, for more in-depth analysis and assertive decision-making, total loss indicators are not sufficient, and the adoption of separate indicators for real and apparent loss is recommended.

Keywords: indicators; percentage; SNIS; water losses.

INTRODUÇÃO

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) constitui-se na principal base pública de dados de saneamento básico do Brasil. Suas informações e relatórios são amplamente utilizadas para o planejamento estratégico do setor. Diversas instituições utilizam esses dados para estudos, análises e comparações entre municípios e prestadores de serviço. Como exemplo, é possível

citar os estudos e os *rankings* elaborados pelo Instituto Trata Brasil e pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). Além disso, os indicadores do SNIS são utilizados para acompanhar o desempenho e as metas de contratos pelos municípios e pelas agências reguladoras.

A questão da eficiência operacional é um dos aspectos mais relevantes em todas as análises do setor. Nesse

¹Companhia de Saneamento do Paraná – Curitiba (PR), Brasil.

Endereço para correspondência: Rua Pedro de Toledo, 217, Prado Velho, Curitiba, PR. CEP: 80215-280. e-mail: mdepexe@sanepar.com.br

sentido, o SNIS disponibiliza quatro indicadores de perdas de água:

- IN013 – Índice de Perdas no Faturamento (%);
- IN049 – Índice de Perdas na Distribuição (%);
- IN050 – Índice Bruto de Perdas Lineares ($\text{m}^3/\text{km}/\text{dia}$);
- IN051 – Índice de Perdas por Ligação (litros/lig/dia).

De acordo com Farley e Trow (2003), por muitos anos o índice de perdas em percentual era o único indicador analisado. Muitos não especialistas, incluindo políticos e a mídia, acreditam erroneamente que esta é a medida de performance de perdas mais significativa. Assim, a definição de metas é realizada em nível nacional em termos percentuais, discriminando concessionárias com baixo consumo (baixo volume de entrada) e pressão operacional superior à média (devido à topografia). Entretanto, esses indicadores são inadequados para comparar diferentes locais, com características distintas.

O indicador em percentual sofre alteração quando o consumo se altera, mesmo que a perda permaneça constante. Tal situação não deveria acontecer com um indicador que avalia a eficiência, uma vez que o resultado varia em função de fatos alheios à eficiência operacional. Da mesma forma, um mesmo volume de perdas reais pode gerar diferentes perdas em percentual, no caso de consumo diferente. Isso ocorre porque o denominador também varia em função do consumo, distorcendo o resultado do indicador de perda em percentual (Lambert, 2017).

De acordo com Giustolisi *et al.* (2024), o indicador de perdas em percentual apresenta resultados falhos quando aplicado a direcionar investimentos, priorizar operações, definir metas ou comparar o desempenho de diferentes concessionárias em perdas de água. A fraqueza do indicador em percentual é decorrente de sua formulação não linear em relação ao volume de perdas de água, uma vez que aparece não apenas no numerador, mas também no denominador como um componente da entrada de água. O indicador em percentual também depende do volume de consumo autorizado, que é componente do volume no denominador. Assim, o índice de perdas aumenta se esse volume diminuir (e vice-versa), mesmo que o volume de

vazamento permaneça inalterado. Tais fragilidades estruturais na formulação matemática causam sua não escalabilidade e inadequação quando aplicada para avaliar ou comparar sistemas hídricos em qualquer escala.

Segundo Alegre *et al.* (2016), deve-se evitar o uso de variáveis no denominador de indicadores que possam variar substancialmente de um ano para outro, especialmente se não estiverem sob o controle da concessionária. Conforme Thompson e Mountfort (2021), o uso de percentuais em termos de estabelecimento de metas regulatórias também não é recomendado. Embora a porcentagem do volume de entrada seja uma métrica fácil de entender e pode ser útil para as pessoas entenderem a proporção relativa de perdas, não é uma métrica útil para medir o desempenho em termos reais ao longo do tempo.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o indicador de perdas expresso em percentual e discutir aspectos relativos à sua formulação, evidenciando os problemas de utilizá-lo para a gestão, a tomada de decisão, as comparações e a definição de metas.

METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho é a revisão bibliográfica, com o objetivo de identificar situações nas quais o indicador de perdas expresso em percentual não é adequado. São elaborados alguns exemplos numéricos a fim de ilustrar tais situações.

A seguir, realiza-se o levantamento de dados para todos os municípios brasileiros, com registros no ano de referência 2022, na consulta Série Histórica do SNIS. Após análise inicial dos dados, foi necessário realizar um tratamento e a seleção de dados, para excluir dados incoerentes. Foram retirados da análise os municípios com Índice de Macromedicação inferior a 50%, com o objetivo de garantir maior confiabilidade dos volumes.

O foco da análise é o indicador IN049, conforme a Figura 1.

A informação AG010 – Volume de água consumido é definida como o volume anual de água consumido por todos os usuários, micromedido ou estimado para as ligações desprovidas de hidrômetro ou com hidrômetro parado, acrescido do volume de água tratada exportado

(AG019). Portanto, na equação IN049, o Volume Exportado está descontado no numerador, que representa o volume de perdas na distribuição. Já o denominador representa o Volume de Entrada do Sistema (produzido + importado) sem descontar o exportado, o que causa redução artificial no resultado para os municípios exportadores de água. A Figura 2 apresenta a relação entre esses volumes.

Por se tratar de um indicador de perdas na distribuição, seria mais coerente que o denominador representasse justamente o volume de perdas na distribuição, de modo a comparar o volume de perdas com o total que foi disponibilizado na rede. Os volumes exportados para outros municípios não poderiam afetar o resultado do indicador.

Assim, com o objetivo de obter resultados mais justos, é realizado o cálculo do indicador considerando o volume de água disponibilizado para a rede de distribuição do sistema no denominador, de modo a evidenciar o impacto que a fórmula atual do SNIS provoca no resultado. A fórmula utilizada para o indicador recalculado é descrita na Equação 1.

$$\text{Indicador calculado} = \frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG006 + AG018 - AG024 - \text{AG019}} \quad (1)$$

IN049 - Índice de perdas na distribuição	
Forma de cálculo	Informações envolvidas
$\frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG006 + AG018 - AG024} \times 100$	AG006: Volume de água produzido AG010: Volume de água consumido AG018: Volume de água tratada importado AG024: Volume de serviço

Figura 1 – Fórmula do indicador SNIS IN49



Figura 2 – Decomposição do volume de água

A análise preliminar dos dados do SNIS identificou 526 municípios com Volume de Água Tratada Exportado (AG019) maior que zero em 2022. Assim, quase 10% dos municípios brasileiros apresentam distorção no indicador em percentual. Entretanto, a existência de vários casos com valores incoerentes levou à aplicação de um filtro no Índice de Macromedição para considerar somente locais com mais de 50%, restando 3.285 municípios, dos quais 340 exportam água tratada para outro município.

Por fim, realiza-se uma comparação, para os municípios que exportam água, do indicador IN049 publicado com o indicador recalculado, a fim de avaliar o quanto a exportação provoca um efeito redutor no índice. Calcula-se a proporção do Volume Exportado (AG019) em relação ao volume de entrada do sistema, ou seja, a soma do Volume Produzido (AG006) com o Volume de Água Tratada Importado (AG018). Também é realizada a comparação com o IN051 – Índice de Perdas por Ligação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises identificaram que o indicador de perdas expresso em percentual apresenta os problemas elencados a seguir.

a) O resultado é impactado por variações no consumo

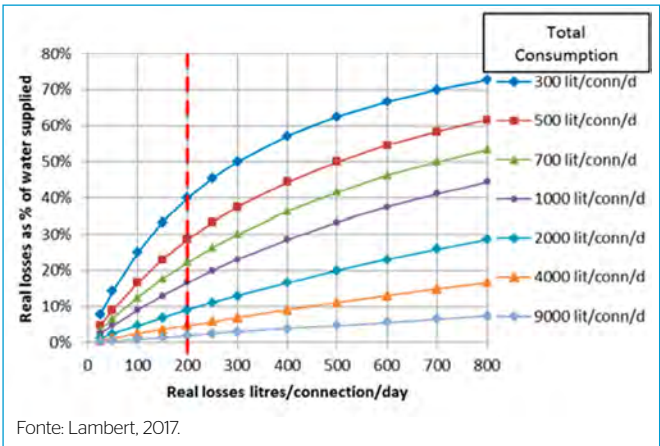
Uma vez que a produção no denominador varia em função de variações no consumo, mesmo que a perda se mantenha constante, pode-se acreditar erroneamente que a eficiência está melhorando em situações nas quais o consumo é que está aumentando. Da mesma forma, comparar um sistema com elevado consumo *per capita* com outro de menor consumo não é adequado. Neste sentido, a Figura 2 fornece uma explicação visual da razão pela qual o percentual do volume de entrada do sistema não funciona para comparações técnicas de perdas reais (vazamentos na infraestrutura).

As perdas reais calculadas como percentual do volume distribuído no sistema (eixo Y) variam com as perdas reais em litros/lig/dia (eixo X) e o consumo total em litros/lig/dia (linhas curvas). A Figura 3 apresenta um exemplo com perdas reais de 200 litros/lig/dia, isso poderia representar um percentual de perdas reais de qualquer valor

entre 5% para uma área metropolitana com consumo de 4000 litros/lig/dia e 40% para uma área de baixo consumo (300 litros/lig/dia). Portanto, esse indicador não pode ser considerado uma base justa para comparação de desempenho (Lambert, 2017).

A Tabela 1 apresenta outro exemplo que demonstra o impacto no indicador, com dois cenários para ilustrar variações no consumo.

O IN049 se altera, mesmo sem alteração no volume de perdas. De fato, uma variação no consumo não poderia gerar alterações na eficiência operacional da rede de distribuição, como se observa no IN051, que se manteve constante.



Fonte: Lambert, 2017.

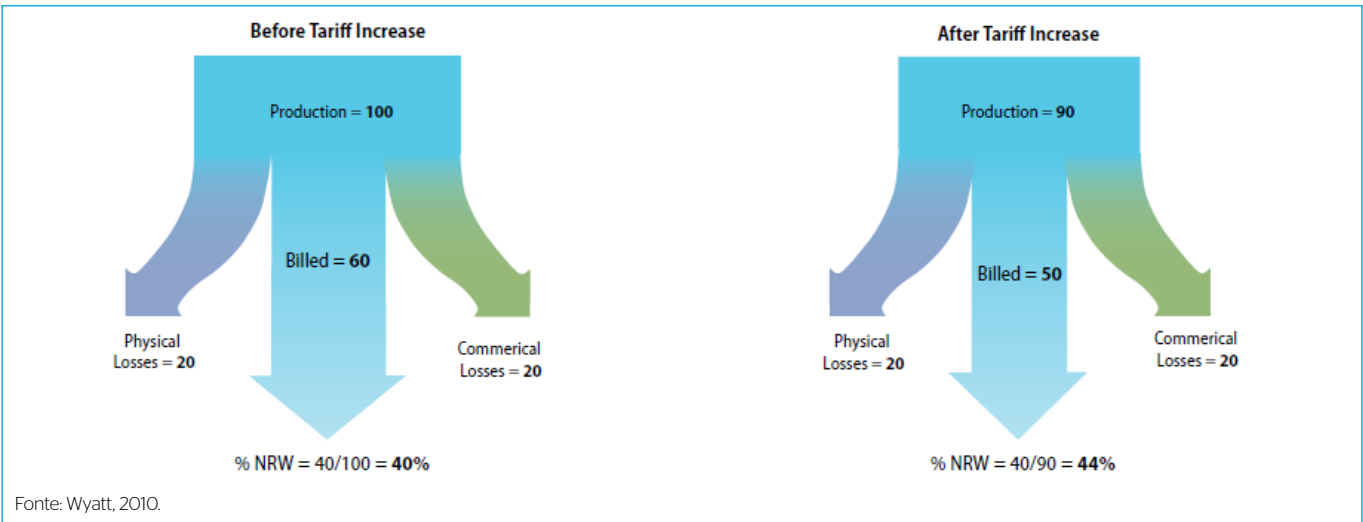
Figura 3 - Como diferenças no consumo influenciam a perda real como percentual do volume fornecido

Wyatt (2010) também aborda a influência do consumo sobre o indicador, com um exemplo que demonstra o quanto o indicador em percentual pode levar a conclusões errôneas. Se um sistema tem 40% de perda e sofre uma redução de consumo por uma razão qualquer, como um aumento da tarifa, mantendo-se o mesmo volume de perdas, o indicador é impactado. A Figura 4 apresenta um esquema para visualizar o que ocorre. Ao se reduzir o consumo, a produção também apresenta a mesma queda em termos de volume. Entretanto, o indicador de perdas aumenta para 44%, pois agora o referencial é a produção menor.

A mesma situação acontece com variações de consumo provocadas por condições climáticas. Em regiões com estações do ano bem definidas, é normal o comportamento

Tabela 1 - Impacto da variação do consumo no índice de perdas

Item	Cenário base	Cenário de redução do consumo	Cenário de aumento do consumo
Número de ligações	5.500	5.500	5.500
Produção	1.000.000	900.000	1.100.000
Volume consumido nas ligações	800.000	700.000	900.000
Volume de perdas na distribuição	200.000	200.000	200.000
Consumo m³/mês/lig	12,1	10,6	13,6
IN049 (%)	20	22,2	18,2
IN051 (litros/lig/dia)	100	100	100



Fonte: Wyatt, 2010.

Figura 4 - Variação do indicador em percentual em função de uma redução do consumo

sazonal do consumo. Assim, o uso de um indicador inadequado pode levar o gestor à falsa conclusão de que a perda aumenta no inverno. O fato é que o indicador expresso em percentual da produção aumenta no inverno, porque o consumo diminui, redução essa acompanhada pela produção.

Em um relatório elaborado para a Embaixada Britânica no Brasil, sobre oportunidades de água não faturada e estrutura regulatória no Reino Unido, os autores afirmam que o uso de percentuais em termos de estabelecimento de metas regulatórias não é recomendado. Embora a porcentagem do volume de entrada seja uma métrica fácil de entender e pode ser útil para as pessoas compreenderem

a proporção relativa de perdas ou água não faturada, não é uma métrica útil para medir o desempenho em termos reais ao longo do tempo (Thompson; Mountfort, 2021).

Os autores apresentam três exemplos nos quais o nível de perdas permaneceu o mesmo que a posição inicial ou foi reduzido, ilustrado na Figura 5. No exemplo superior, o nível de perdas foi reduzido onde a demanda permaneceu constante, mostrando uma melhoria de desempenho em termos percentuais. No segundo exemplo, o nível de demanda foi reduzido e as perdas permaneceram constantes, mas a perda percentual aumentou. No terceiro exemplo, a demanda e as perdas foram reduzidas, mas o percentual permanece constante e não reflete a melhoria.

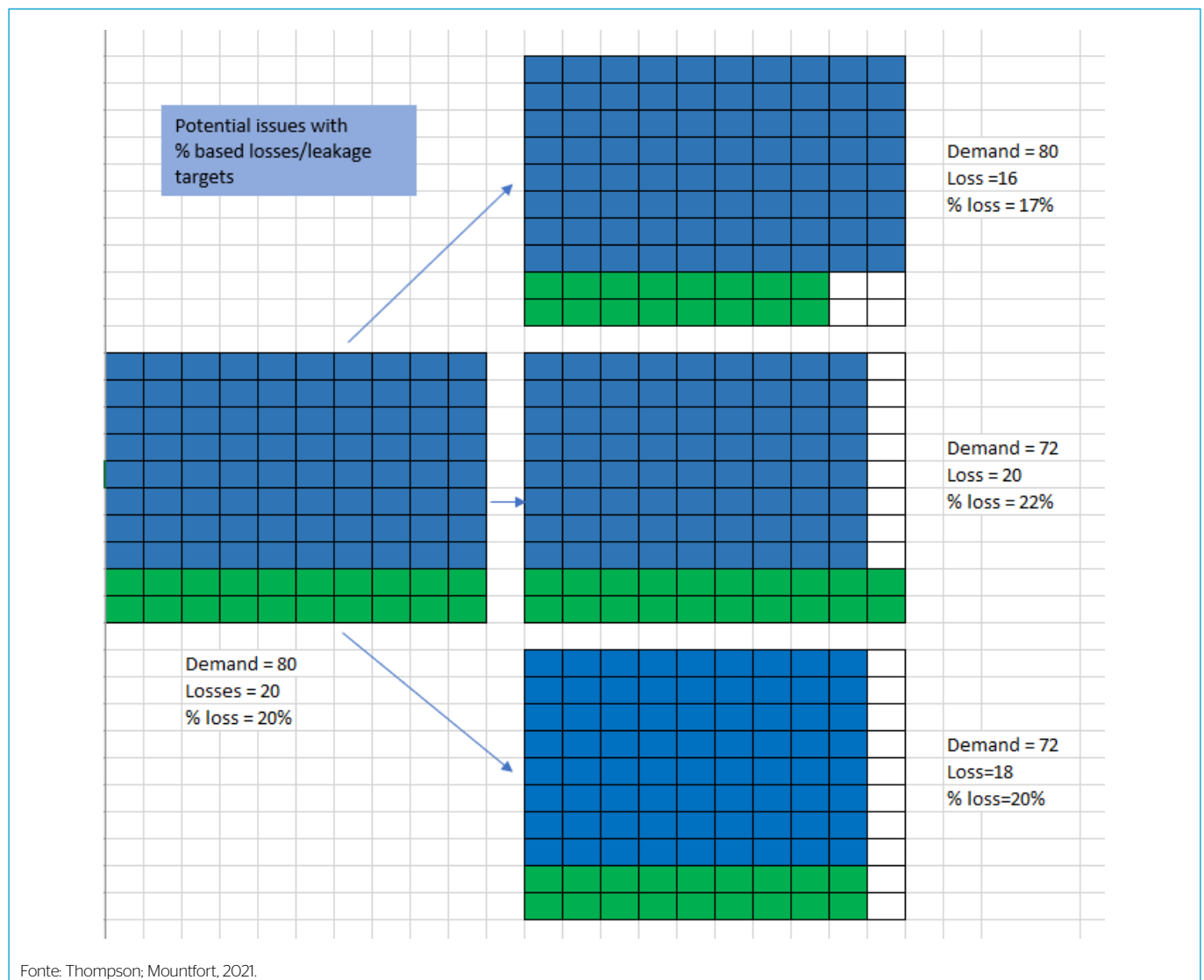


Figura 5 - Armadilhas potenciais de usar porcentagens como métricas de desempenho

Fica evidente que o indicador em percentual pode apresentar resultados distorcidos quando há variações no consumo e mesmo quando há redução de perdas. Inclusive, o indicador pode responder de forma diferente, mesmo quando há ações para redução das perdas, conforme detalhado a seguir.

b) O resultado varia de forma diferente de acordo com o tipo de ação realizada

A variação no indicador em percentual ocorre em proporções diferentes de acordo com a parcela da perda que apresenta alteração. Isso acontece porque ao se reduzir a perda real, ocorre redução na produção, diminuindo o numerador e o denominador ao mesmo tempo, o que gera menor impacto no indicador. No caso de redução da perda aparente, apenas o numerador é impactado, provocando maior queda no indicador para uma mesma redução em m³.

Para ilustrar essa situação, consideremos um exemplo de um setor de 500 ligações, com volume disponibilizado anual de 100 mil m³ e volume micromedido de 60 mil m³. Assim, o volume de perdas é 40 mil m³ ou 40%. A Tabela 2 apresenta duas hipóteses de ações de redução.

A ação realizada é diferente, mas o impacto em termos de volume perdido é o mesmo (20 mil m³). Entretanto, na hipótese de redução de submedição do parque de hidrômetros, o índice de fato cai pela metade. Por outro lado, quando se reduz o volume de vazamentos, há redução na produção, alterando o numerador e o denominador.

Tabela 2 - Resultados diferentes para redução na perda aparente e na perda real

Item	Hipótese 1	Hipótese 2
Ação	Redução de perda aparente (submedição)	Redução de perda real (vazamentos)
Resultado	Redução de 20 mil m ³ na submedição, gerando aumento de 20 mil no volume micromedido (passa a medir a água que já era consumida, mas não era contabilizada pelos hidrômetros)	Redução de 20 mil m ³ em vazamentos, gerando redução de 20 mil no volume produzido (menor necessidade de produção, pela redução do número de vazamentos existentes)
Índice de Perdas na Distribuição	$IPD = \frac{100.000 - 80.000}{100.000} = 20\%$	$IPD = \frac{80.000 - 60.000}{80.000} = 25\%$

IPD: Índice de Perdas na Distribuição.

O volume de perdas cai pela metade, mas o resultado do indicador não acompanha a redução, uma vez que o referencial (produção) se alterou.

c) O indicador em percentual afeta a percepção da proporção de perda real e aparente

Como consequência do exposto, uma variação da perda real provoca variação no volume produzido, que é o denominador da equação. Portanto, ao se analisar parcelas da perda, decomposta na forma de perda real e perda aparente, o indicador em percentual distorce o resultado. Para ilustrar essa situação, consideremos um exemplo no qual ocorrem dois cenários a partir de uma base, sendo um de redução da perda real e outro de aumento, conforme a Tabela 3.

Observa-se que uma redução na perda real gera um aumento da perda aparente expressa em percentual, de 7,4 para 8,1%. Entretanto, o volume de perdas aparentes não se alterou, assim como o indicador em litros por ligação por dia. O denominador da equação é que reduziu, acompanhando a redução da produção.

Da mesma forma, um aumento da perda real gera a percepção equivocada de que a perda aparente reduziu, passando de 7,4 para 6,8%. Entretanto, o volume anual e

Tabela 3 - Influência da variação da perda real na percepção da perda aparente

Item	Cenário base	Cenário de redução da perda real	Cenário de aumento da perda real
Número de ligações	5.500	5.500	5.500
Produção	1.200.000	1.100.000	1.300.000
Volume micromedido	800.000	800.000	800.000
Volume de perdas na distribuição	400.000	300.000	500.000
IDM	90%	90%	90%
Volume perda aparente	88.889	88.889	88.889
Volume perda real	311.111	211.111	411.111
Perda aparente (%)	7,4	8,1	6,8
Perda real (%)	25,9	19,2	31,6
Total INO49 (%)	33,3	27,3	38,5
Perda aparente (litro/lig/dia)	44	44	44
Perda real (litro/lig/dia)	155	105	205
Total INO51 (litros/lig/dia)	199	149	249

IDM: Índice de Desempenho da Medição.

o índice em litros por ligação por dia permanecem constantes nos três cenários.

Por outro lado, uma variação da perda aparente afeta somente os índices de perdas aparentes, não interferindo na perda real, que se mantém constante em todos os cenários, conforme se observa na Tabela 4.

Isso ocorre porque a variação da perda aparente não altera a produção, que é o denominador da equação. Assim, o indicador de perdas expresso em percentual da produção também afeta a percepção da perda aparente, quando ocorrer uma variação na perda real.

d) A problemática do Volume de Entrada no denominador

Há casos em que o indicador é calculado pela razão entre a perda e o volume distribuído. Entretanto, há indicadores que dividem o volume de perdas pelo volume de entrada do sistema, ou seja, não consideram o volume distribuído, pois o volume exportado não aparece no denominador. O IN049 (Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento, 2023) é um exemplo onde isso ocorre, gerando distorções no índice do município exportador.

Tabela 4 - Influência da variação da perda real na percepção da perda aparente

Item	Cenário base	Cenário de redução da perda aparente	Cenário de aumento da perda aparente
Número de ligações	5.500	5.500	5.500
Produção	1.200.000	1.200.000	1.200.000
Volume micromedido	800.000	817.778	782.222
Volume de perdas na distribuição	400.000	382.222	417.778
IDM	90%	92%	88%
Volume perda aparente	88.889	71.111	106.667
Volume perda real	311.111	311.111	311.111
Perda aparente (%)	7,4	5,9	8,9
Perda real (%)	25,9	25,9	25,9
Total IN049 (%)	33,3	31,9	34,9
Perda aparente (litro/lig/dia)	44	35	53
Perda real (litro/lig/dia)	155	155	155
Total IN051 (litros/lig/dia)	199	190	208

IDM: Índice de Desempenho da Medição.

Para cálculo do Índice de Perdas na Distribuição, o correto seria que o denominador descontasse o volume exportado, para que o referencial de comparação seja o volume efetivamente destinado para o município. No caso de não descontar o volume exportado, o índice fica extremamente favorável para municípios que exportam água para outros. Essa situação é muito comum em regiões metropolitanas nas quais os municípios geralmente fazem parte de um sistema de abastecimento maior.

Entretanto, a água exportada não está disponível para o município produtor, uma vez que é produzida para outro local. Mesmo que exista uma relação comercial de compra e venda de água entre os municípios, e por hipótese esta relação seja interrompida, a produção não permanecerá a mesma, sendo reduzida imediatamente, em função da redução da sua demanda. Nesta situação, o índice de perdas aumentaria abruptamente, mas sem relação nenhuma com a perda na rede de distribuição.

A Tabela 5 apresenta um exemplo fictício para demonstrar didaticamente o quanto a fórmula atual do IN049 é inadequada. Considerando dois municípios idênticos em número de ligações e consumo (11 m³/mês por ligação), para que demais fatores não influenciem no resultado, variando apenas a capacidade de produção. Assim, o Município A produz água para seu próprio abastecimento e exporta água para o Município B, que tem capacidade de produção equivalente à metade da sua necessidade.

Observa-se que tanto o volume disponibilizado na rede de distribuição quanto o volume consumido são idênticos, mas resultado do indicador IN049 indica que

Tabela 5 - Cenário 1: o Município A fornece água para o Município B

Item	Município A	Município B
Número de ligações	100.000	100.000
Produção	30.000.000	10.000.000
Volume importado	0	10.000.000
Volume exportado	10.000.000	0
Volume disponibilizado na rede	20.000.000	20.000.000
Volume consumido nas ligações	13.200.000	13.200.000
IN049 (%)	22,7	34
IN051 (litros/lig/dia)	186,30	186,30

o Município A tem índice de perdas em percentual bem menor, embora o volume perdido seja o mesmo. No indicador IN051 essa distorção não ocorre, uma vez que o referencial no denominador não varia em função da relação importação × exportação.

No caso de uma ampliação da capacidade de produção do Município B, que passa a ser autossuficiente, o Município A se vê obrigado a reduzir a produção, uma vez que não existe mais a demanda de água por parte do Município B. Absolutamente nada acontece no sistema de distribuição de ambos, entretanto o indicador IN049 do Município A aumenta, conforme a Tabela 6.

Não faz sentido um indicador de perdas aumentar por consequência do aumento de capacidade de produção de outro município. O fato é que o município que exporta tem sua perda reduzida artificialmente, por uma falha da fórmula do IN049. Já o município autossuficiente ou que importa não tem problemas em nenhum cenário, pois seu denominador está correto, equivalente ao volume distribuído.

Outra situação que demonstra o quão inadequado é considerar somente o volume produzido + importado no denominador ocorre em situações nas quais um município

que pertença a um sistema integrado de abastecimento está localizado entre um município que exporta e outro que importa. Considerando que os volumes importados e exportados para esse município sejam iguais, transferindo água apenas entre os municípios vizinhos, o indicador será reduzido quanto maior for o volume transferido, como se observa na Tabela 7.

De acordo com esses resultados, a forma mais rápida de reduzir perdas seria trocar água com municípios vizinhos, um abastecendo o outro na mesma proporção. Evidentemente, a redução no índice é artificial e não reflete a situação da rede de distribuição.

A Tabela 8 apresenta uma comparação entre o IN049 calculado pelo SNIS, ano referência 2022, com o indicador recalculado a partir dos atributos, considerando no denominador apenas o volume distribuído no município. Os dados estão ordenados pela proporção entre o Volume Exportado e a soma do Produzido e Importado, para os 20 maiores exportadores.

Observa-se uma relação direta entre a representatividade do volume exportado no volume de entrada (produzido + importado) com a redução artificial gerada no indicador, pelo fato de não descontar o volume exportado do denominador. Na prática, é como se todo o volume exportado fosse descontado da perda, reduzindo significativamente o índice.

Nos casos mais extremos, de Marizópolis (PB) e Pinhais (PR), que exportam mais de 80% da sua produção, o indicador recalculado fica muito superior ao IN049. Não é razoável afirmar que tais locais têm perda na ordem de 7%, comparável aos melhores sistemas em nível mundial. Quando a exportação ocorre em proporções tão elevadas, não se pode considerar que esse volume está à disposição do município, que geralmente faz parte de um sistema integrado de

Tabela 6 - Cenário 2: o Município B aumenta sua produção e deixa de importar do Município A, que reduz sua produção

Item	Município A	Município B
Número de ligações	100.000	100.000
Produção	20.000.000	20.000.000
Volume importado	0	0
Volume exportado	0	0
Volume consumido nas ligações	13.200.000	13.200.000
IN049 (%)	34	34
IN051 (litros/lig/dia)	186,30	186,30

Tabela 7 - Comparação de um município que passa a transferir água entre municípios vizinhos, com Importado igual ao Exportado

Item	Sistema independente	Sistema integrado, transferindo 1 mi m³	Sistema integrado, transferindo 2 mi m³	Sistema integrado, transferindo 4 mi m³	Sistema integrado, transferindo 8 mi m³
Número de ligações	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Produção	20.000.000	20.000.000	20.000.000	20.000.000	20.000.000
Volume importado	0	1.000.000	2.000.000	4.000.000	8.000.000
Volume exportado	0	1.000.000	2.000.000	4.000.000	8.000.000
Volume consumido nas ligações	13.200.000	13.200.000	13.200.000	13.200.000	13.200.000
IN049 (%)	34	32,4	30,9	28,3	24,3

abastecimento, em que o sistema de distribuição ultrapassa os limites municipais. Grandes transferências ocorrem via adutoras entre reservatórios, sem entrar na rede de distribuição. Dessa forma, transferir mais ou menos água entre municípios não interfere no volume perdido do município, nem em sua eficiência operacional em termos de qualidade da rede de distribuição ou eficiência da micromedicação, mas o indicador gera resultados diferentes.

Para os 14 primeiros municípios da Tabela 8, o índice de perdas na distribuição é pelo menos o dobro do que o IN049 indica. Esses baixos valores não são representativos da eficiência da rede de distribuição. Assim, não há base de comparação justa do desempenho de municípios exportadores com os demais. Nesse sentido, O Índice de Perdas por Ligação IN051 é mais representativo da eficiência operacional. No caso dos dois municípios citados, o IN051 é elevado (552 e 438 litros/lig/dia, respectivamente), valores condizentes com o indicador recalculado, típicos de locais com perda elevada.

Por essas razões, o uso do índice de perdas em percentual é cada vez menos utilizado pelas companhias de saneamento em todo o mundo. Outros indicadores que têm denominador composto de variáveis físicas do sistema são preferíveis, como o nº de ligações ou extensão de rede de água. Dessa forma, a análise do indicador não sofre influência de fatores externos à perda, possibilitando a avaliação de evolução do sistema e a comparação com outros locais.

Evidentemente, cada indicador tem suas limitações, sendo recomendável o uso de um conjunto de indicadores para a completa análise da eficiência de um sistema de abastecimento. Outros fatores como a densidade de ligações, o tempo médio de abastecimento e a pressão média do sistema exercem influência sobre as perdas e podem ser considerados nos indicadores de desempenho. Para questões mais operacionais e de planejamento de investimentos, é recomendável o uso de indicadores específicos para perdas reais e aparentes, incluindo indicadores relacionados a nível econômico de perdas (Liemberger, 2002).

Tabela 8 – Comparação do IN049 com indicador recalculado

Município	Estado	exp/(prod+imp)	IN049 - Índice de perdas na distribuição	Indicador recalculado	Diferença	IN051 - Índice de perdas por ligação
Marizópolis	PB	88%	6,85	60,98	-54,13	552,74
Pinhais	PR	85%	7,79	51,17	-43,38	438,41
Caibi	SC	69%	12,95	41,68	-28,73	255,03
Ipira	SC	64%	11,25	34,87	-23,62	173,6
Jiquiriçá	BA	61%	16,15	41,56	-25,41	173,28
Ponto Novo	BA	59%	17,51	42,54	-25,03	197,06
Caldeirão Grande	BA	59%	17,56	42,65	-25,09	200,73
Filadélfia	BA	57%	18,01	42,01	-24,00	186,68
Cariacica	ES	56%	25,03	57,13	-32,10	736,52
Floresta Azul	BA	54%	11,21	25,44	-14,23	80,91
Lajedo do Tabocal	BA	52%	11,13	23,34	-12,21	68,17
Marechal Floriano	ES	52%	11,04	22,80	-11,76	117,38
São Félix	BA	50%	19,08	38,35	-19,27	167,56
Horizonte	CE	47%	17,66	37,30	-19,64	139,26
Governador Mangabeira	BA	46%	20,6	38,44	-17,84	150,05
Aporá	BA	44%	17,66	32,04	-14,38	115,46
Acajutiba	BA	44%	17,64	32,00	-14,36	110,57
Cristópolis	BA	43%	15,14	26,61	-11,47	99,61
Conceição do Jacuípe	BA	41%	11,79	20,08	-8,29	70,14
Balneário Piçarras	SC	40%	21,03	34,89	-13,86	213,01

Do ponto de vista regulatório, o uso do indicador de perdas expresso em percentual para definição de metas de contrato também não é recomendado, tendo em vista as diversas situações apresentadas. Nesse sentido, considera-se assertiva a orientação da Norma de Referência nº 15/2025 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que dispõe sobre diretrizes para a gestão de redução progressiva e controle de perdas nos subsistemas de distribuição de água potável (Brasil, 2025), que estabelece, no art. 5º, o uso do índice de perdas de água na distribuição por ligação, conforme definição do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA).

CONCLUSÕES

Calcular perdas de água por meio de indicadores expressos em percentual pode ser pouco efetivo, uma vez que a variação da perda não é a única causa de mudanças do resultado. Alterações no consumo, que podem ocorrer em função de atualização do preço da tarifa ou mesmo de forma natural, devido a fatores climáticos que acompanham as estações do ano, geram oscilações no indicador. O indicador em percentual também reage de forma diferente ao se realizar uma ação para redução da perda real ou da perda aparente, mesmo que em termos de volume o impacto seja o mesmo. Isso reduz a confiabilidade e a precisão dos indicadores em percentual, uma vez que afeta diretamente a percepção da perda real e aparente.

Os indicadores do SNIS têm um problema adicional, pois o denominador da fórmula é o Produzido + Importado — uma comparação mais correta deveria considerar o Volume Distribuído no sistema (Produzido + Importado

– Exportado). Essa condição provoca uma redução artificial no resultado, que não reflete a realidade da eficiência operacional em campo, nos municípios que exportam água. Esse fato impacta não apenas o IN049, que é amplamente utilizado, mas também o IN013 – Índice de Perdas no Faturamento, o IN028 – Índice de Faturamento de Água e o IN052 – Índice de Consumo de Água, que apresentam o mesmo problema relacionado ao volume exportado e não podem ser utilizados para comparações, *rankings*, análise e tomada de decisão.

Portanto, indicadores de perdas expressos em percentual são inadequados para comparação entre municípios e/ou prestadores de serviços de saneamento. Também não são apropriados para analisar a evolução de um mesmo local, uma vez que o consumo e as ações realizadas variam ao longo do tempo, provocando oscilações em diferentes magnitudes no resultado do indicador.

Para fins de análise e comparação entre municípios, recomenda-se o uso dos indicadores que relacionam o volume de perdas com dados físicos do sistema de distribuição, como o IN050 – Índice Bruto de Perdas Lineares ($\text{m}^3/\text{km}/\text{dia}$) e o IN051 – Índice de Perdas por Ligação (litros/lig/dia). Além disso, para análise mais aprofundada e tomada de decisão assertiva, os indicadores de perdas totais não são suficientes, sendo recomendável a adoção de indicadores separados para perda real e aparente. Por fim, considerando os aspectos regulatórios, recomenda-se que as metas de contrato não utilizem o indicador de perdas expresso em percentual. Para essa finalidade, o ideal é o uso do índice em litros por ligação por dia, de forma alinhada à NR 15 da ANA.

REFERÊNCIAS

ALEGRE, Helena; BAPTISTA, Jaime M.; CABRERA JR, Enrique; CUBILLO, Francisco; DUARTE, Patricia; HIRNER, Wolfram; MERKEL, Wolf; PARENA, Renato. **Performance Indicators for Water Supply Services**. Third Edition. Manual of Best Practice. IWA Publishing, Volume 15, 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Resolução ANA nº 275, de 18 de dezembro de 2025. Aprova a

Norma de Referência nº 15/2025 que dispõe sobre diretrizes para a gestão de redução progressiva e controle de perdas nos subsistemas de distribuição de água potável. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, p. 156, 19 dez. 2025.

FARLEY, Malcolm; TROW, Stuart. **Losses in water distribution networks** – A practitioner's guide to assessment, monitoring and control. IWA Publishing, 2003. 282 p.

GIUSTOLISI, Orazio; CILIBERTI, Francesco Gino; MAZZOLANI, Gianfrdi; LAFORGIA, Domnico. Effectiveness of water loss performance indicators for asset management. **Digital Water**, v. 2, n. 1, p. 1-31, 2024. <https://doi.org/10.1080/28375807.2024.2406746>

LAMBERT, Allan. Water losses: it's time to ditch the percentages. **Water and Wastewater International Journal**, 2017.

LIEMBERGER, Roland. Do you know how misleading the use of wrong performance indicators can be? *In: IWA MANAGING LEAKAGE CONFERENCE. Proceedings* [...]. Cyprus, 2002, 17p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgotos – Visão Geral

ano de referência 2022. **SNIS**, 2023. Disponível em: <https://capacidades.gov.br/capaciteca/diagnostico-tematico-servicos-de-agua-e-esgoto-visao-geral-ano-de-referencia-2022>. Acesso em: 10 out. 2025.

THOMPSON, Fiona; MOUNTFORT, Glen. **Relatório final de estudo de escopo sobre oportunidades de água não faturada e estrutura regulatória no Reino Unido**. Water Research Center Limited (WRc), 2021. 97 p.

WYATT, Alan S. **Non-revenue water**: financial model for optimal management in developing countries. RTI Press publication No. MR-0018-1006. Research Triangle Park, NC: RTI International. 2010. 71 p.

Artigo Científico

Os desafios do saneamento na Rocinha, a maior favela do Rio de Janeiro

The challenges of sanitation in Rocinha, the largest favela in Rio de Janeiro

Larissa Rocha Abadias^{1*} , Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira¹ 

RESUMO

O saneamento básico em favelas constitui uma das expressões mais evidentes da desigualdade urbana no Brasil, especialmente em territórios marcados por ocupações irregulares, alta densidade populacional e urbanização desordenada. A Rocinha, localizada na Zona Sul do município do Rio de Janeiro, com área aproximada de 1,44 km², população estimada em 72 mil habitantes e densidade superior a 50.000 hab./km², exemplifica de forma emblemática essa realidade. O estudo analisou as condições de saneamento básico na comunidade, considerando os componentes de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais, à luz das políticas públicas vigentes. A metodologia adotada consistiu na aplicação da matriz SWOT – também conhecida como FOFA (Força, Oportunidade, Fraqueza e Ameaça) –, adaptada ao contexto de assentamentos informais, com base em dados secundários, observações de campo e informações sistematizadas a partir de estudos técnicos e institucionais. Os resultados evidenciaram fragilidades estruturais significativas, como redes mistas de esgoto e drenagem, perdas elevadas no sistema de abastecimento de água, baixa frequência na coleta de resíduos sólidos e elevada vulnerabilidade a eventos hidrometeorológicos extremos. Por outro lado, identificaram-se forte mobilização comunitária, potencial para parcerias institucionais e oportunidades decorrentes do Novo Marco Legal do Saneamento. Concluiu-se que a superação dos desafios identificados demanda políticas públicas integradas, investimentos contínuos em infraestrutura e fortalecimento da participação social, de modo a promover melhorias efetivas na qualidade de vida e no desenvolvimento urbano sustentável em territórios vulneráveis.

Palavras-chave: saneamento básico; comunidades; infraestrutura sanitária; urbanização precária.

ABSTRACT

Basic sanitation in informal settlements is one of the most evident expressions of urban inequality in Brazil, particularly in territories characterized by irregular occupation, high population density, and unplanned urbanization. The Rocinha *favela*, located in the South Zone of the city of Rio de Janeiro, with an approximate area of 1.44 km², an estimated population of 72,000 inhabitants, and density exceeding 50,000 inhabitants/km², emblematically exemplifies this reality. This study analyzed the conditions of basic sanitation in the community, considering the components of water supply, sanitary sewage, solid waste management, and urban stormwater drainage, in light of the current public policies. The adopted methodology consisted of applying the Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (SWOT) matrix, adapted to the context of informal settlements, based on secondary data, field observations, and information systematized from technical and institutional studies. The results revealed significant structural weaknesses, such as combined sewage and drainage networks, high losses in the water supply system, low frequency of solid waste collection, and high vulnerability to extreme hydrometeorological events. On the other hand, strong community mobilization, a potential for institutional partnerships, and opportunities arising from the New Legal Framework for Sanitation were identified. It is concluded that overcoming the identified challenges requires integrated public policies, continuous investments in infrastructure, and the strengthening of social participation, in order to promote effective improvements in quality of life and sustainable urban development in vulnerable territories.

Keywords: basic sanitation; communities; sanitation infrastructure; precarious urbanization.

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

***Endereço para correspondência:** Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Edifício Cardeal Leme, Sala 301. Rio de Janeiro, RJ. CEP: 22451-900. e-mail: larissa_abadias@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

O saneamento básico constitui um dos pilares fundamentais para a promoção da saúde pública, da qualidade de vida e do desenvolvimento urbano sustentável (ONU-Habitat, 2016). Entretanto, em contextos de urbanização informal, como favelas e assentamentos precários, o acesso aos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem urbana permanece limitado e desigual, refletindo profundas disparidades socioespaciais no Brasil (Caldeira, 2000; Gregori, 2005).

O processo de favelização está associado à urbanização acelerada, ao êxodo rural e à concentração de oportunidades econômicas nos grandes centros urbanos, sem o correspondente planejamento habitacional e urbano (Santos, 1982). Como consequência, consolidaram-se ocupações em áreas ambientalmente frágeis, como encostas e margens de corpos d'água, onde a implantação de infraestrutura urbana convencional apresenta maiores restrições técnicas e econômicas (Ferreira, 2007). Esses territórios caracterizam-se por elevada densidade populacional, precariedade construtiva e déficit histórico de serviços públicos essenciais.

A insuficiência de saneamento básico em favelas configura um fator estruturante de vulnerabilidade socioambiental. Redes de esgoto incompletas ou informais, intermitência no abastecimento de água, baixa frequência da coleta de resíduos sólidos e deficiência dos sistemas de drenagem contribuem para a proliferação de doenças de veiculação hídrica, a contaminação ambiental e o aumento dos riscos associados a eventos hidrometeorológicos extremos (ONU-Habitat, 2016).

Nesse contexto, a Rocinha, localizada na Zona Sul do município do Rio de Janeiro, destaca-se como um caso emblemático. Considerada uma das favelas mais densamente povoadas do país, apresenta ocupação consolidada em área de encosta, morfologia urbana complexa e forte integração funcional à cidade formal. Apesar de sua localização estratégica, próxima a bairros de alto padrão, a comunidade enfrenta desafios persistentes relacionados à urbanização precária e à provisão de serviços de saneamento, evidenciando desigualdades no acesso a

direitos urbanos básicos (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022; Souza, 2018).

A relevância do tema insere-se também no âmbito dos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) da Agenda 2030, em especial o ODS 6, que visa assegurar o acesso universal à água e ao saneamento (Organização das Nações Unidas, 2015). Em nível nacional, a Lei nº 14.026/2020, que institui o Novo Marco Legal do Saneamento, reforça a necessidade de universalização dos serviços, eficiência operacional e fortalecimento da regulação, criando oportunidades e desafios para a implementação de soluções em territórios de urbanização informal (Brasil, 2020).

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar os desafios e as potencialidades do saneamento básico na Rocinha, utilizando a metodologia SWOT adaptada à realidade de assentamentos informais (Chiavenato; Sapiro, 2009; Silveira, 2001). Buscou-se identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas aos principais componentes do saneamento, de modo a subsidiar estratégias mais eficazes, inclusivas e sustentáveis, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e para a promoção da justiça socioambiental em territórios urbanos vulneráveis.

METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida na Rocinha, localizada na Zona Sul do município do Rio de Janeiro, estado do Rio de Janeiro, Brasil (Figura 1). A comunidade encontra-se inserida entre os bairros de São Conrado e Gávea, ocupando predominantemente áreas de encosta e apresentando forte integração à malha urbana formal da cidade.

A Rocinha tem área aproximada de 1,44 km², caracterizando-se por elevada intensidade de uso e ocupação do solo, com predominância do uso residencial associado a expressiva presença de comércio local e prestação de serviços. Do ponto de vista socioeconômico, observa-se elevada heterogeneidade, marcada sobretudo por atividades informais e pequenos estabelecimentos comerciais, que

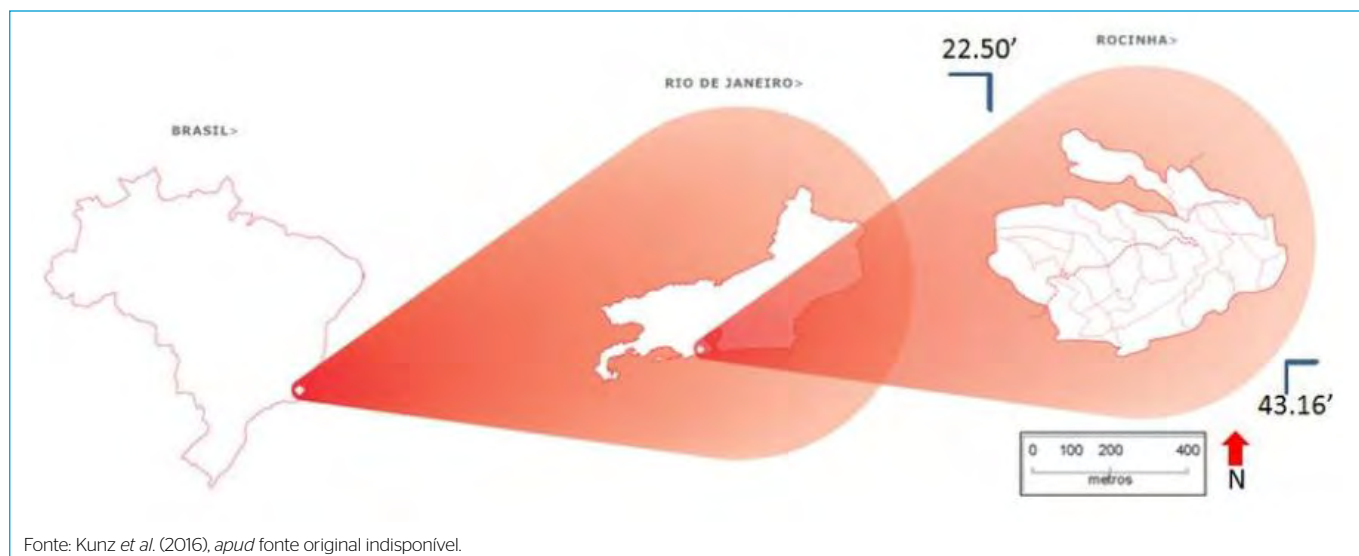


Figura 1 – Localização da Rocinha no Brasil, no município do Rio de Janeiro, e delimitação da área de estudo

desempenham papel central na dinâmica econômica da comunidade (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022). A ocupação do território ocorre de maneira densa e contínua, com expressiva verticalização das edificações, decorrente tanto das limitações físicas impostas pela topografia quanto da escassez de áreas disponíveis para expansão horizontal.

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a população da Rocinha é estimada em aproximadamente 72 mil habitantes, resultando em densidade populacional superior a 50 mil habitantes por quilômetro quadrado, o que posiciona a comunidade entre as áreas urbanas mais densamente povoadas do país. O padrão habitacional é composto majoritariamente de moradias em alvenaria, muitas delas construídas de forma progressiva e por meio da autoconstrução, frequentemente com múltiplos pavimentos e elevada densidade domiciliar.

Persistem na comunidade diversos problemas relacionados à infraestrutura urbana e sanitária, tais como desigualdades na oferta de saneamento básico, drenagem urbana e acessibilidade, sobretudo nas áreas localizadas em cotas mais elevadas e de ocupação mais recente. Esses fatores contribuem para a exposição da população a riscos ambientais e geotécnicos, especialmente em áreas de encosta.

A formação da Rocinha remonta à década de 1920, quando a área pertencia à Companhia Castro Guião, de origem portuguesa. Após o leilão e posterior abandono

do terreno pela empresa, o local passou a ser progressivamente ocupado (Lopes, 2018). A partir da década de 1950, a intensificação do fluxo migratório, especialmente oriundo da Região Nordeste, impulsionou o crescimento acelerado da comunidade (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Centro de Pesquisas e Articulação de Conhecimentos Rocinha, 2025).

Apesar de sua relevância territorial e de sua inserção estratégica no contexto urbano do Rio de Janeiro, a comunidade ainda enfrenta desafios significativos relacionados à infraestrutura urbana, à mobilidade, à ocupação de áreas ambientalmente sensíveis e ao acesso a políticas públicas, o que reforça a pertinência da Rocinha como objeto de estudo em pesquisas de naturezas urbana, social e ambiental.

No que se refere ao saneamento básico, a comunidade da Rocinha apresenta um quadro de cobertura parcial e heterogênea, característica recorrente de assentamentos urbanos informais no município do Rio de Janeiro. Dados do IBGE (2022) indicam que 72% dos domicílios estão conectados à rede geral de esgotamento sanitário, enquanto 28% ainda não dispõem desse serviço básico. As áreas com menor cobertura concentram-se, sobretudo, nas porções mais elevadas e de difícil acesso da comunidade, como Macega, Roupa Suja, Terreirão e Cachopa, além de trechos do vale principal, entre a Rua 1 e o Largo do Boiadeiro (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022; Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2023).

Desde a concessão dos serviços de saneamento no estado do Rio de Janeiro, a implantação, operação e manutenção dos sistemas formais de esgotamento sanitário passaram a ser de responsabilidade da concessionária Águas do Rio, sucedendo a atuação da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro – CEDAE (Águas do Rio, 2022). Apesar desse novo arranjo institucional, observa-se a coexistência de soluções formais e informais, incluindo ligações irregulares, sistemas simplificados e a gestão individual ou comunitária das instalações sanitárias, o que compromete a eficiência operacional do sistema e agrava os impactos ambientais e sanitários (Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2023).

Predominam redes mistas e informais, com interligações inadequadas entre esgotamento sanitário e drenagem pluvial. Essa configuração favorece extravasamentos frequentes, especialmente durante eventos de precipitação intensa, resultando em transbordamentos não planejados de esgoto combinado (*unforeseen Combined Sewer Overflows – uCSOs*), ampliando os riscos à saúde pública e à qualidade ambiental (Oliveira *et al.*, 2024). A presença significativa de resíduos sólidos intensifica esse cenário, ao obstruir redes, bocas de lobo, valas e canais, reduzindo a capacidade de escoamento e ampliando a ocorrência de alagamentos (Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2023).

No tocante ao abastecimento de água, embora 99% dos domicílios estejam formalmente ligados à rede, persistem dificuldades estruturais relevantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022). As elevadas cotas topográficas dificultam o fornecimento regular nas áreas mais altas da comunidade, enquanto a ausência de estruturas públicas adequadas de reservação, associada a vazamentos, perdas físicas e ligações clandestinas, resulta em elevada taxa de perdas e intermitência no abastecimento, comprometendo o acesso contínuo à água potável (Souza, 2018). Em alguns setores próximos à floresta e à Estrada da Gávea, ainda são utilizadas fontes alternativas, como poços e nascentes, evidenciando a fragilidade do sistema.

A gestão de resíduos sólidos constitui outro desafio crítico. A Rocinha gera mais de 140 toneladas de resíduos por dia, volume que supera a capacidade operacional do

sistema de coleta da Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB). As limitações impostas pela morfologia do território — caracterizado por encostas íngremes, vielas estreitas e escadarias — dificultam o acesso de equipamentos de coleta. Como alternativa, foram implantados pontos de acúmulo de resíduos ao longo da Estrada da Gávea, os quais, em períodos de chuvas intensas, tornam-se focos de obstrução de bueiros e talvegues, potencializando riscos sanitários e ambientais, inclusive para os bairros do entorno, como São Conrado e Gávea (Companhia Municipal de Limpeza Urbana, 2024).

A ocupação progressiva e desordenada do território, associada às limitações geomorfológicas e à precariedade histórica da infraestrutura urbana, compromete a implantação de redes convencionais de serviços públicos. Edificações adensadas e sobrepostas, ventilação limitada e elevada umidade no interior das habitações contribuem para condições ambientais desfavoráveis e maior incidência de doenças, reforçando a necessidade de intervenções integradas e de políticas públicas adaptadas às especificidades de assentamentos informais (Souza, 2018), conforme ilustrado na Figura 2.

MÉTODO

Para a pesquisa, utilizou-se a metodologia SWOT, ferramenta de diagnóstico do planejamento estratégico que identifica forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, orientando melhorias internas e externas (Ahmed; Zairi; Almarri, 2006; Silveira, 2001). A análise considera elementos que impactam os objetivos da organização em consonância com sua missão, visão e valores, conforme ilustrado na Figura 3 (Chiavenato; Sapiro, 2009).

Forças e fraquezas correspondem, respectivamente, às competências e às limitações internas, enquanto oportunidades e ameaças referem-se a fatores externos favoráveis ou restritivos (Ahmed; Zairi; Almarri, 2006). A aplicação da matriz SWOT é orientada pelos “4 Comos”, que direcionam o aproveitamento de oportunidades, a mitigação de ameaças e a superação de fragilidades (Duarte, 2006). Neste estudo, a matriz foi adaptada à realidade da Rocinha para a análise do saneamento básico nos componentes de águas pluviais, esgotamento sanitário, abastecimento

de água e resíduos sólidos, considerando as dimensões sociais, culturais e econômicas.

No contexto da comunidade, os *stakeholders* incluem moradores, organizações comunitárias, poder público, organizações não governamentais (ONGs) e empresas, ampliando o conceito tradicional de clientes e fornecedores. As diretrizes da SWOT (os 4 “Comos”) foram ajustadas para orientar ações que promovam a universalização do saneamento básico e a melhoria da qualidade de vida. Essa abordagem combina análise estratégica e compreensão do contexto urbano, contribuindo para soluções efetivas e adequadas à realidade da comunidade.

Os dados utilizados na aplicação da matriz SWOT foram obtidos a partir de análise documental, revisão bibliográfica e levantamento de dados secundários provenientes de órgãos oficiais, relatórios técnicos e estudos acadêmicos recentes, além de observações de campo realizadas no período de 2023 a 2024. As informações sistematizadas nos quadros de resultados refletem a consolidação dessas fontes, complementadas por registros de reuniões

comunitárias, diálogos com lideranças locais e participação em atividades de extensão universitária desenvolvidas na comunidade. Esse conjunto de dados permitiu identificar padrões recorrentes, desafios estruturais e potencialidades locais, assegurando consistência analítica e robustez metodológica à aplicação da matriz.

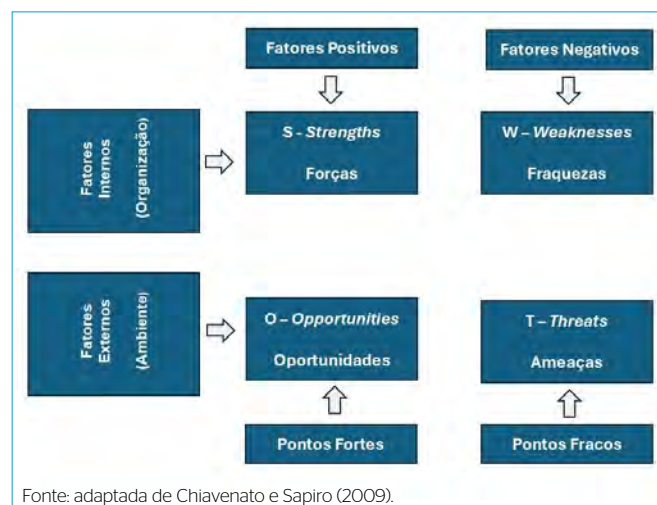
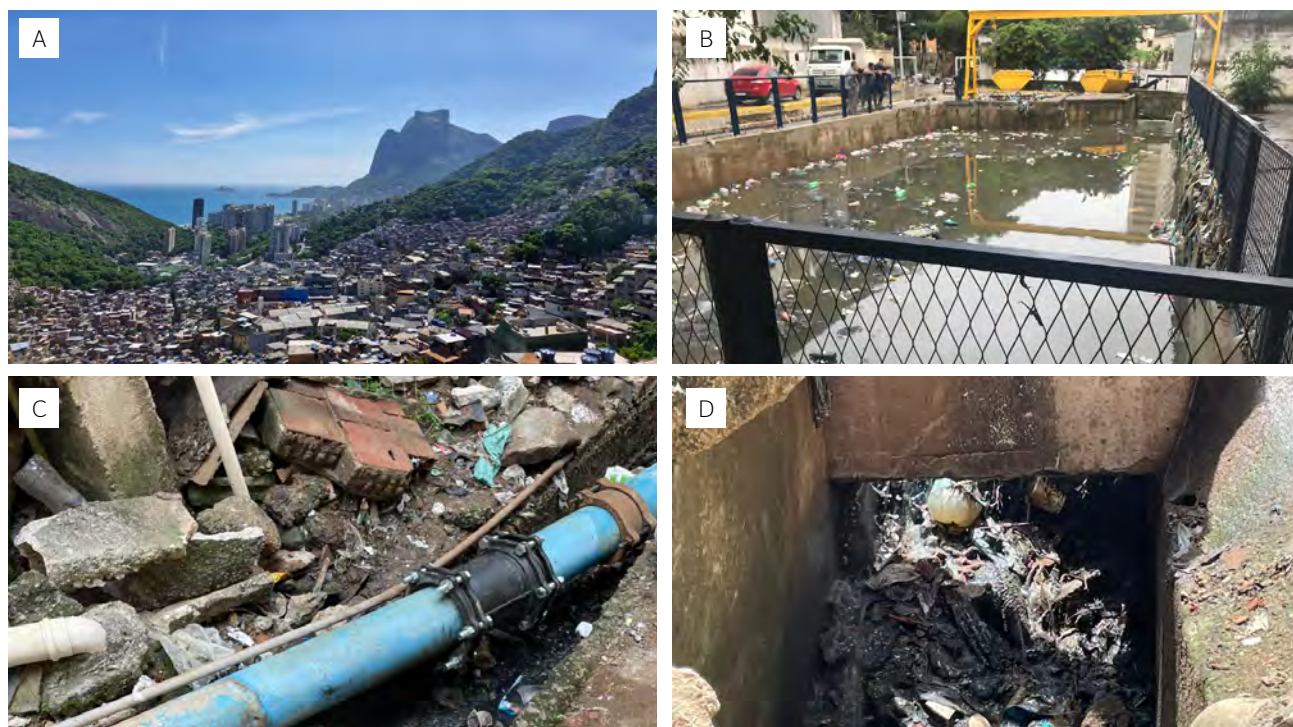


Figura 3 – Matriz SWOT.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 2 – Realidade do saneamento na Rocinha. (A) Vista da comunidade, evidenciando a ocupação urbana densa e a complexidade topográfica; (B) canal de drenagem com acúmulo de resíduos sólidos; (C) canal de águas residuárias com presença de tubulação de abastecimento de água e resíduos; (D) vista do interior de uma caixa-rato, evidenciando poluição e acúmulo de resíduos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da matriz SWOT possibilitou uma análise estratégica das especificidades locais, com potencial de replicação em contextos urbanos semelhantes, subsidiando soluções integradas que articulem o poder público e a participação comunitária.

Os quadros aplicam a matriz SWOT — também conhecida como FOFA (Força, Oportunidade, Fraqueza e Ameaça) — aos principais componentes do saneamento básico: manejo de águas pluviais (Quadro 1); esgotamento

sanitário (Quadro 2); manejo de resíduos (Quadro 3); e abastecimento de água (Quadro 4), identificando elementos estratégicos para subsidiar ações e políticas de melhoria.

Aproveitar as oportunidades para explorar ao máximo as forças

As forças existentes no território da Rocinha podem ser potencializadas a partir de oportunidades institucionais e sociais, com destaque para a elevada mobilização comunitária. A atuação contínua de associações de moradores,

Quadro 1 – Aplicação da matriz SWOT para o manejo de águas pluviais

Força	Oportunidade	Fraqueza	Ameaça
Forte engajamento comunitário (presença de organizações comunitárias e meios de comunicação locais que facilitam a mobilização da população para iniciativas de melhoria da infraestrutura e de conscientização ambiental).	Parcerias acadêmicas e com ONGs para inovação em soluções de problemas complexos. Aproveitamento do Novo Marco Legal e da Nova Norma de Manejo de Águas Pluviais para captação de recursos setoriais. Crescente interesse em Soluções Baseadas na Natureza (SBNs) com suporte técnico.	Inundações no canal principal. A falta de planejamento urbano e a alta densidade populacional dificultam a adoção de soluções de drenagem. Declividade e tipo de solo. Velocidade de escoamento elevado. Descarte irregular de resíduos.	Aumento das chuvas intensas, devido às mudanças climáticas. Desigualdade de investimentos, com prioridade para bairros vizinhos à Rocinha. Falta de manutenção nas redes de esgoto e drenagem. O gradeamento da caixa de contenção a jusante perde função nas cheias e agrava as inundações.

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 2 – Aplicação da matriz SWOT para o esgotamento sanitário

Força	Oportunidade	Fraqueza	Ameaça
O engajamento de jovens líderes locais, aliado à participação de universitários de várias instituições do RJ. Reconhecimento global do bairro Rocinha.	Potencial de apoio de educação ambiental de instituições de ensino parceiras. Disponibilidade de parcerias para o desenvolvimento de tecnologias voltadas para áreas de urbanização irregular. Investimento de novas concessionárias.	O crescimento populacional acelerado, aliado à infraestrutura deficiente e à fragmentação das políticas públicas, constitui uma fraqueza significativa, dificultando a implementação de melhorias eficazes.	Falta de manutenção adequada das redes de esgoto e drenagem, agravando o risco de inundações e a presença de esgoto a céu aberto.

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 3 – Aplicação da matriz SWOT para o manejo de resíduos

Força	Oportunidade	Fraqueza	Ameaça
A proximidade com áreas urbanas que já têm sistemas consolidados de manejo de resíduos. As escolas apresentam potencial estratégico como polos de conscientização ambiental.	Projetos interdisciplinares com educação ambiental, desenvolvidos em parceria com instituições externas, fortalecem o manejo de resíduos e a sustentabilidade.	A baixa conscientização da população resulta no descarte inadequado de resíduos. Resistência à mudança de hábitos. Vielas que dificultam o acesso dos caminhões às áreas mais internas da comunidade. Intenso crescimento demográfico.	A contaminação do solo e da água, causada pelo descarte inadequado de resíduos. A falta de incentivos para as escolas limita a efetividade das ações de conscientização e educação ambiental, impactando os esforços para promover mudanças duradouras. Falta de investimentos.

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 4 – Aplicação da matriz SWOT para o abastecimento de água

Força	Oportunidade	Fraqueza	Ameaça
Reconhecimento da Rocinha como território prioritário em políticas públicas de infraestrutura básica	Investimentos externos com novas concessionárias	A alta taxa de perda de água, resultante de vazamentos e ligações clandestinas Falta de reservação e dificuldade em abastecer regiões a montante	Contaminação das fontes de água locais, impactando na saúde pública Falta de infraestrutura para abastecimento e intermitência do abastecimento

Fonte: elaborado pelo autor.

coletivos locais e organizações da sociedade civil evidenciam uma organização social consolidada, observável em atividades de campo e na participação ativa da população em ações coletivas, favorecendo a adesão a projetos de saneamento básico. O conhecimento empírico dos moradores sobre a dinâmica territorial constitui um ativo estratégico para o planejamento de soluções adaptadas à realidade local, aumentando a efetividade e a sustentabilidade das intervenções. No manejo de resíduos, ecopontos comunitários e a educação ambiental nas escolas fortalecem a reciclagem, o engajamento social e o fomento à inclusão produtiva. De forma complementar, investimentos externos possibilitam a ampliação de reservatórios e a implantação de sistemas planejados de abastecimento de água e coleta de esgoto, enquanto projetos de pesquisa e capacitação comunitária contribuem para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis, promovendo melhorias integradas no saneamento, na qualidade de vida e no desenvolvimento urbano.

Usar as forças para eliminar ou reduzir os efeitos das ameaças

A mobilização das forças locais constitui elemento central para a mitigação de ameaças e a melhoria da qualidade de vida. No abastecimento de água, o reconhecimento da Rocinha como área prioritária pode impulsionar investimentos em infraestrutura hídrica e fortalecer a articulação entre concessionária e poder público, reduzindo riscos à saúde e à segurança hídrica. No esgotamento sanitário, o engajamento comunitário e a manutenção das redes são fundamentais para minimizar lançamentos irregulares, transbordamentos e doenças associadas. A educação ambiental, aliada à implantação de ecopontos, contribui para a redução do descarte inadequado de resíduos e dos impactos sobre os sistemas de águas residuárias.

Adicionalmente, a atuação de organizações comunitárias e a adoção de soluções baseadas na natureza (SbNs) favorecem a redução do escoamento superficial, o aumento da resiliência urbana e a promoção de um desenvolvimento mais sustentável e seguro.

Aproveitar as oportunidades para transformar fraquezas em forças ou reduzir sua gravidade

O engajamento de lideranças locais, estudantes e organizações comunitárias fortalece os processos de educação e conscientização em saneamento básico, contribuindo para a transformação de fragilidades estruturais em ativos territoriais. Parcerias estratégicas entre poder público, iniciativa privada, academia e sociedade civil viabilizam o desenvolvimento e a adaptação de tecnologias voltadas a áreas de urbanização irregular, especialmente nos sistemas de coleta e tratamento de esgoto e de drenagem urbana. Nesse contexto, a mobilização social, associada ao respaldo institucional proporcionado pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020) e às normas técnicas nacionais para o manejo de águas pluviais urbanas, conforma um arcabouço regulatório favorável à ampliação da cobertura dos serviços, ao estímulo à inovação tecnológica e ao aprimoramento da eficiência operacional dos sistemas de saneamento (Associação Brasileiro de Normas Técnicas, 2023; Brasil, 2020). Medidas adaptadas à realidade local, como escadarias hidráulicas verdes e demais soluções baseadas na natureza (SbNs), contribuem para mitigar transbordamentos e reduzir o volume e a velocidade do escoamento pluvial. No manejo de resíduos, iniciativas de conscientização ambiental e a criação de Polos de Reciclagem promovem gestão adequada, participação comunitária, além da promoção de emprego e incremento econômico.

No abastecimento de água, o reconhecimento da Rocinha como bairro e os investimentos externos possibilitam melhorias estruturais, regularização de conexões, ampliação de reservatórios e adoção de soluções tecnológicas, resultando em um sistema mais eficiente, resiliente e sustentável para toda a comunidade.

Reduzir as fraquezas para eliminar ou diminuir o impacto das ameaças

A redução das fraquezas estruturais da Rocinha pode diminuir significativamente os impactos das ameaças climáticas e urbanas. A melhoria do planejamento da drenagem urbana, com soluções que priorizem a infiltração, a retenção e o reúso das águas pluviais (como telhados verdes e hortas em lajes), contribui para reduzir inundações, alagamentos e deslizamentos, aumentando a resiliência comunitária e promovendo maior equidade nos investimentos em relação aos bairros vizinhos. No esgotamento sanitário, a rede mista e a indefinição de responsabilidades entre poder público e concessionária dificultam a manutenção, afetando o bem-estar da população. Políticas públicas integradas, aliadas à educação civil e ambiental, são essenciais para adequar normas às especificidades dos territórios populares. A gestão inadequada de resíduos sólidos, agravada pela dificuldade de coleta

e pela falta de conscientização, gera impactos à saúde e ao meio ambiente. Campanhas educativas, instalação de lixeiras, melhorias viárias e incentivos à mudança de hábitos podem reduzir obstruções e contaminações. Por fim, a elevada perda de água por vazamentos e ligações irregulares compromete o abastecimento. A regularização das conexões, o controle de perdas e o manejo adequado de efluentes e resíduos previnem a contaminação das fontes e mitigam a escassez hídrica.

CONCLUSÕES

O estudo mostrou que a inserção estratégica da comunidade no tecido urbano demanda políticas públicas integradas, capazes de incorporar as condicionantes morfológicas, ambientais e socioeconômicas do território. A articulação entre instituições acadêmicas e o conhecimento local qualifica o desenvolvimento de soluções técnicas contextualizadas. Apesar de sua adequação como instrumento diagnóstico, a análise SWOT apresenta limitações decorrentes de seu caráter estático, sendo necessária sua atualização periódica, aliada ao monitoramento contínuo das políticas públicas e à participação comunitária, de modo a orientar intervenções mais eficientes, adaptativas e alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da justiça socioambiental.

REFERÊNCIAS

ÁGUASDORIO. **Plano de investimentos e metas de universalização dos serviços de saneamento básico**. Rio de Janeiro, 2022.

AHMED, Abdel Moneim; ZAIRI, Mohamed; ALMARRI, K. S. SWOT analysis for Air China performance and its experience with quality. **Benchmarking: An International Journal**, v. 13, n. 1/2, p. 160-173, 2006. <https://doi.org/10.1108/14635770610644655>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Drenagem urbana**: diretrizes para o manejo de águas pluviais. Rio de Janeiro: ABNT, 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, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

CALDEIRA, Teresa Pires do Rio. **Cidade de muros**: a segregação sócio-espacial no Rio de Janeiro. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

CHIAVENATO, Idalberto; SAPIRO, Arão. **Planejamento estratégico**: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA. **Informações operacionais sobre a coleta de resíduos sólidos na Rocinha**. Rio de Janeiro, 2024.

DUARTE, Carolina; ETTKIN, Lawrence P.; HELMS, Marilyn M.; ANDERSON, Michael S. The challenge of Venezuela: a SWOT analysis. **Competitiveness Review: An International Business Journal**, v. 16, n. 3/4, p. 233-247, 2006.

FERREIRA, Alvaro. A produção do espaço entre dominação e apropriação: um olhar sobre os movimentos sociais. **Scripta Nova: Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales**, Madrid, v. 11, n. 14, 2007.

GREGORI, Maria Filomena. **A favela como um processo**. São Paulo: Contexto, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**: população e domicílios. Rio de Janeiro, 2022.

KUNZ, Maurício; LUZ, Bruno Macali da; NECKEL, Alcindo; FAUSTINONI, Luciano. Modelagem matemática em análises de riscos geomorfológicos: um estudo de caso da Rocinha/RJ, Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 32-39, 2016. <https://doi.org/10.5902/2236117019971>

LOPES, Beatriz. A história da primeira favela do Rio. *Agência de Notícias das Favelas*, 2018. Disponível em: <https://www.>

anf.org.br/a-historia-da-primeira-favela-do-rio/. Acesso em: 15 fev. 2026.

OLIVEIRA, Antonio Krishnamurti Beleño de; MAGALHÃES, Paulo Canedo de; REZENDE, Osvaldo Moura; SOUSA, Matheus Martins de; MARQUES, Rodrigo Hoerner Moraes; MIGUEZ, Marcelo Gomes. MODCEL-MHUS: a comprehensive multilayer hydrodynamic unified simulation for stormwater, sanitary sewer systems, and urban surface. **Water Science & Technology**, v. 90, n. 1, p. 190-212, 2024.

ONU-HABITAT. **Relatório sobre o estado das cidades na América Latina e no Caribe**. Nairobi, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo**: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Resolução A/RES/70/1 da Assembleia Geral das Nações Unidas. Nova York, 2015.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. Centro de Pesquisas e Articulação de Conhecimentos Rocinha. **Dimensões do Lixo**. 2025. Disponível em: <https://sigaunir.ccs.puc-rio.br/index.php/dimensoes/lixo>. Acesso em: 10 fev. 2026.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Diagnóstico socioambiental e de infraestrutura urbana da Rocinha**. Rio de Janeiro: PCRJ, 2023.

SANTOS, Milton. **Ensaio sobre a urbanização latino-americana**. São Paulo: Hucitec, 1982.

SILVEIRA, Henrique. SWOT. In: TARAPANOFF, Kira (org.). **Inteligência organizacional e competitiva**. Brasília, DF: Editora UnB, 2001.

SOUZA, Marcelo Lopes. **A luta pela cidade**: urbanização e resistência popular. São Paulo: Editora XYZ, 2018.

Análise da efetividade da educação ambiental sobre resíduos sólidos e segurança no ensino fundamental

Analysis of the effectiveness of environmental education on solid waste and safety in elementary education

Marcos Vinícios Figueiredo Nascimento^{1*} , Laura Victória Nascimento de Souza² ,
Vanessa Souza Álvares de Mello² , Alacid Rodrigues de Vilhena² , Raissa Tavares da Silva² 

RESUMO

Este estudo investigou a eficácia de uma intervenção educativa inovadora, que integrou a educação ambiental (EA) com princípios de segurança do trabalho, para alunos do 6º e do 7º ano do ensino fundamental em uma escola pública em Belém, Pará. A pesquisa foi motivada pela crescente geração de resíduos sólidos e pela necessidade de promover práticas de manejo seguras e ambientalmente responsáveis, especialmente no ambiente escolar. O objetivo geral foi sensibilizar e capacitar os alunos a compreender a complexidade dos desafios dos resíduos sólidos e adotar comportamentos que minimizem riscos de acidentes e contribuam para a sustentabilidade. A metodologia estruturou-se em quatro etapas. Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica e aplicaram-se questionários diagnósticos para mapear o conhecimento prévio dos alunos. A etapa central foi a implementação de ações educativas, incluindo palestras interativas, dinâmicas de grupo e uma oficina de reutilização de resíduos, na qual os alunos confeccionaram brinquedos. A avaliação da efetividade foi feita por meio de questionários aplicados antes e após as atividades, permitindo comparar a evolução dos conhecimentos e atitudes sobre resíduos e segurança. Os resultados revelaram uma melhora significativa no entendimento dos alunos sobre a importância da separação, do descarte correto e da reutilização de resíduos, além de uma maior consciência sobre os riscos de acidentes e a necessidade de prevenção. O estudo demonstrou, em suma, que a integração da EA com a segurança do trabalho é uma estratégia eficaz para promover a conscientização ambiental e a adoção de práticas sustentáveis no contexto escolar.

Palavras-chave: segurança do trabalho; sustentabilidade; educação ambiental; resíduos sólidos; sensibilização.

ABSTRACT

This study investigated the effectiveness of an innovative educational intervention that integrated environmental education (EE) with occupational safety principles, targeting 6th and 7th grade elementary school students in a public school in Belém, Pará, Brazil. The research was motivated by the growing generation of solid waste and the pressing need to promote safe and environmentally responsible waste management practices, especially in the school environment. The general objective was to raise awareness and empower students to understand the complexity of solid waste challenges to adopt behaviors that minimize accident risks and contribute to sustainability. The methodology was structured in four steps. Initially, a bibliographic review was conducted, and diagnostic questionnaires were applied to map the students' prior knowledge. The central stage involved implementing educational activities, including interactive lectures, group dynamics, and a waste reuse workshop where students made toys. The project's effectiveness was evaluated using pre- and post-activity questionnaires, allowing for the comparison of changes in knowledge and attitudes regarding waste and safety. The results showed a significant improvement in students' understanding of the importance of waste separation, correct disposal, and reuse, as well as greater awareness of accident risks and the need for prevention. In short, the study demonstrated that integrating EE with occupational safety is an effective strategy for promoting environmental awareness and adopting sustainable practices in the school context.

Keywords: occupational safety; sustainability; environmental education; solid waste; awareness.

¹Universidade Federal do Pará - Belém (PA), Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - Belém (PA), Brasil.

*Endereço para correspondência: Rua São João, 58, Quadra 52 - Cabanagem - CEP: 66625-810 - Belém (PA), Brasil. e-mail: marcos.figueiredo.nascimento@itec.ufpa.br

INTRODUÇÃO

A educação ambiental desempenha papel estratégico na formação de cidadãos críticos e conscientes, contribuindo para a mitigação de problemas ambientais contemporâneos e para a promoção de práticas sustentáveis no ambiente escolar. Diante do aumento expressivo da geração de resíduos sólidos e de seus impactos socioambientais, torna-se essencial sensibilizar a comunidade escolar quanto à redução da geração de resíduos, à reciclagem e à separação correta na fonte geradora. Tais ações favorecem a sustentabilidade ambiental, a saúde pública e a segurança das pessoas envolvidas no manejo desses materiais.

O projeto apresentado propõe uma abordagem integrada entre educação ambiental e princípios de segurança do trabalho, enfatizando a prevenção de riscos associados ao manejo inadequado de resíduos sólidos no contexto escolar. As atividades foram desenvolvidas com alunos do ensino fundamental, articulando conteúdos técnicos do Curso Técnico em Segurança do Trabalho do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) e conhecimentos relacionados ao saneamento básico, fortalecendo o vínculo entre teoria e prática e promovendo a formação de estudantes como agentes de transformação socioambiental.

A relevância da iniciativa dialoga diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente o ODS 4 (Educação de Qualidade), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 17 (Parcerias e Meios de Implementação) (Organização das Nações Unidas, 2015).

Estudos internacionais reforçam a importância estratégica da reciclagem para a melhoria do desempenho ambiental dos sistemas de gestão de resíduos. Pesquisas demonstram que maiores níveis de eficiência na recuperação de materiais e maiores taxas efetivas de reciclagem estão associados à redução dos impactos ambientais e ao uso mais eficiente dos recursos naturais, evidenciando que indicadores de eficiência material constituem instrumentos relevantes para avaliar o desempenho ambiental dos sistemas de gerenciamento de resíduos (Schmidt *et al.*, 2020). Além disso, investigações publicadas em periódicos

internacionais indicam que fatores educacionais e institucionais influenciam significativamente a eficiência dos sistemas de gestão de resíduos, evidenciando que políticas públicas associadas à educação ambiental ampliam a eficácia das práticas de reciclagem (Springer, 2016).

No campo da saúde ocupacional, estudos apontam que trabalhadores envolvidos na coleta e na reciclagem de resíduos estão expostos a riscos físicos, químicos e biológicos quando não há segregação adequada e medidas preventivas eficazes (Arivanandan; Jaiswal, 2020). Esse cenário reforça a necessidade de integrar princípios de segurança do trabalho às ações educativas, ampliando a compreensão dos riscos associados ao descarte inadequado.

No contexto normativo brasileiro, a classificação dos resíduos sólidos foi recentemente atualizada pela ABNT NBR 10004:2024 – Resíduos sólidos – Classificação, que substituiu a versão de 2004. A nova norma estabelece critérios técnicos mais rigorosos para identificação da periculosidade dos resíduos, organizando-se em duas partes: requisitos para classificação e Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR). A atualização fortalece a precisão técnica no gerenciamento de resíduos e a prevenção de riscos à saúde e ao meio ambiente.

No plano legal, o Decreto nº 11.413/2023 instituiu instrumentos de certificação vinculados à logística reversa previstos na Lei nº 12.305/2010, incluindo o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa (CCRLR), o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral (CERE) e o Certificado de Crédito de Massa Futura (CCMF), revogando o Decreto nº 11.044/2022. Esses instrumentos reforçam a responsabilidade compartilhada e estimulam a reinserção de resíduos no ciclo produtivo.

Complementarmente, a Resolução CONAMA nº 275/2001 estabelece o código de cores padronizado para a identificação dos diferentes tipos de resíduos nos sistemas de coleta seletiva, facilitando a segregação na fonte geradora e contribuindo para a eficiência da reciclagem.

Dessa forma, a integração entre educação ambiental, atualização normativa e princípios de segurança do trabalho constitui estratégia relevante para a formação de estudantes conscientes, capazes de compreender tanto os impactos ambientais quanto os riscos ocupacionais

associados ao manejo inadequado de resíduos. O fortalecimento dessas práticas no ambiente escolar representa contribuição significativa para a construção de uma cultura de sustentabilidade e prevenção.

METODOLOGIA

Tipo de pesquisa e abordagem

De acordo com a classificação de Gil (2022), esta pesquisa é caracterizada, quanto aos fins, como descritiva e explicativa. Assume um caráter descritivo ao buscar detalhar e delinear o panorama do conhecimento e das práticas dos alunos sobre o manejo de resíduos sólidos, tanto no momento inicial da investigação quanto após a implementação das ações educativas. Paralelamente, adota um viés explicativo, uma vez que se propõe a analisar e elucidar as relações de causa e efeito, investigando de que modo a educação ambiental e as atividades práticas influenciam a aprendizagem e a modificação de comportamento dos estudantes.

No que concerne aos meios, a pesquisa recorre a uma abordagem combinada, integrando elementos de pesquisa bibliográfica e de *survey*. A pesquisa bibliográfica serve como alicerce teórico fundamental, fornecendo o arcabouço conceitual e a base de referências necessárias para sustentar o estudo. Já a metodologia de *survey* é operacionalizada por meio da aplicação de questionários aos alunos, com o objetivo de coletar dados empíricos diretos sobre seus conhecimentos, atitudes e práticas em relação ao tema investigado, permitindo uma análise quantitativa e qualitativa das informações (Gil, 2022).

Etapas metodológicas

Para o atendimento dos objetivos propostos, o presente estudo adotou uma abordagem metodológica estruturada em quatro etapas distintas, detalhadas sequencialmente a seguir.

1ª etapa: Em fevereiro de 2024, iniciou-se a seleção de uma instituição de ensino público fundamental e médio situada nas proximidades do IFPA, Campus Belém, que apresentasse infraestrutura compatível com as demandas do projeto. A Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio (EEEFM) Dom Pedro II foi selecionada e, em

seguida, realizou-se uma visita técnica à instituição, para realização de uma reunião com a gestão escolar, visando definir o cronograma de execução das atividades e avaliar o espaço físico disponível para a implementação do projeto. Adicionalmente, as informações coletadas durante esta etapa serviram como subsídio para a elaboração do primeiro instrumento de coleta de dados (questionário). Concomitantemente, efetuou-se um levantamento bibliográfico abrangente com o objetivo de fundamentar teoricamente as ações a serem desenvolvidas e orientar o planejamento metodológico da pesquisa.

2ª etapa: Em março foram realizadas apresentações detalhadas do planejamento de ações do projeto para as turmas participantes. Visando avaliar o nível de conhecimento prévio dos alunos em relação à temática investigada, aplicou-se um questionário diagnóstico estruturado em cada turma, com o objetivo de subsidiar a elaboração da palestra sobre educação ambiental (EA), adequando o conteúdo às necessidades identificadas, e refinar o instrumento de coleta de dados aplicado no final no projeto, de forma a servir como métrica para verificação do alcance do objetivo geral da pesquisa.

3ª etapa: Durante o mês de abril, foi ministrada uma palestra sobre EA, com foco nos impactos insalubres do descarte inadequado de resíduos sólidos e na relevância da reciclagem. A atividade foi ministrada por discentes integrantes do projeto e caracterizou-se pela participação ativa dos alunos. Para a consolidação do conteúdo apresentado, foram implementadas duas atividades práticas: uma tarefa de associação entre o código de cores das lixeiras de coleta seletiva e os tipos específicos de materiais recicláveis, e uma dinâmica simulando a separação correta de diferentes tipos de resíduos no ambiente da sala de aula.

4ª etapa: Foi conduzida uma oficina de reutilização de resíduos direcionada aos alunos do 6º e do 7º ano do ensino fundamental, no mês de junho de 2024, com o objetivo de estimular a criatividade e a aplicação prática dos conceitos de reaproveitamento, a qual os participantes confeccionaram brinquedos do tipo “vai e vem” utilizando garrafas de polietileno tereftalato (PET) fornecidas pela empresa responsável pelo serviço de alimentação escolar do IFPA Campus Belém, além de barbante, papel crepom

e adesivo. Ao término da atividade, aplicou-se o segundo questionário, com a finalidade de avaliar o impacto das intervenções realizadas e obter dados relevantes para posterior apresentação à gestão da instituição escolar.

Contexto da pesquisa

A investigação foi realizada na EEEFM Dom Pedro II, localizada no bairro do Marco, em Belém, Pará, conforme ilustrado na O Marco caracteriza-se por ser um bairro de ocupação mista, abrigando desde áreas residenciais de classe média até importantes polos de saúde e educação. Para compreender a relevância da intervenção, é necessário observar o cenário macroeconômico da capital paraense, que tem um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,746, considerado alto e ocupando a terceira posição entre as capitais do Norte, além de um Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* de aproximadamente R\$ 21.708,55. Contudo, esses indicadores mascaram profundas desigualdades socioespaciais, pois, enquanto o bairro do Marco dispõe de infraestrutura consolidada, o município enfrenta desafios críticos em saneamento básico e gestão de resíduos que impactam diretamente a segurança ambiental e a saúde pública (Chad *et al.*, 2024).

No que tange à infraestrutura de resíduos e ao cenário de risco, a área envolvente da escola conta com coleta regular; entretanto, o sistema municipal de Belém apresenta vulnerabilidades que justificam a urgência da EA. A quase totalidade dos resíduos da Região Metropolitana de Belém é enviada para o Aterro Sanitário de Marituba, local que tem sido alvo de sucessivos imbrólios jurídicos e crises operacionais devido à sua saturação e à falta de alternativas viáveis de longo prazo, gerando insegurança ambiental para toda a região. Somado a isso, apesar da coleta formal, é comum a existência de depósitos ilegais, conhecidos como “pontos viciados” de descarte, em esquinas e canteiros centrais de vias próximas ao bairro. Essas lixeiras irregulares favorecem a proliferação de vetores de doenças e aumentam o risco de acidentes tanto para a população quanto para os profissionais da limpeza urbana.

Além disso, a cultura da reciclagem e da coleta seletiva em Belém ainda é incipiente, dependendo fortemente da atuação de cooperativas de catadores e de pontos de entrega voluntária (LEV), apresentando baixa adesão de separação na fonte em residências e escolas.

Esse cenário de precariedade na gestão pública reforça a necessidade de projetos de sensibilização escolar, visando



Figura 1 – Localização e fachada da referida EEEFM Dom Pedro II

mitigar o impacto sobre o sistema saturado e garantir a segurança daqueles que manuseiam os materiais. Tais iniciativas são fundamentais para prevenir riscos ocupacionais que, embora indiretos para os alunos, são críticos e severos para os trabalhadores da coleta de resíduos (Arivanandan; Jaiswal, 2020). A Figura 1 apresenta a localização da escola onde foi realizada a pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sequência ilustrativa a seguir apresenta o relatório fotográfico das etapas de intervenção realizadas junto às turmas do 6º e do 7º ano do ensino fundamental da EEEFM Dom Pedro II. As Figuras 2 e 3 exemplificam a apresentação da

2ª etapa, desenvolvida com as turmas do turno vespertino da referida instituição de ensino.

As Figuras 4 a 6 documentam a 3ª etapa do projeto, que compreendeu a ministração da palestra sobre EA e a realização da dinâmica prática de coleta seletiva. Nessa atividade, os estudantes efetuaram a coleta e o descarte apropriado de resíduos previamente distribuídos no ambiente da sala de aula, além de conduzirem uma atividade de fixação para a consolidação do conteúdo abordado na palestra.

As Figuras 7 a 10 ilustram a 4ª etapa do projeto, dedicada à oficina de reutilização de resíduos para a confecção do brinquedo “vai e vem”. Ao término da oficina, procedeu-se



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 2 - Apresentação do projeto à turma do 6º ano do ensino fundamental



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 4 - Palestra sobre educação ambiental para a turma do 6º ano do ensino fundamental



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 3 - Aplicação do primeiro questionário aos estudantes do 7º ano do ensino fundamental



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 5 - Palestra sobre educação ambiental para a turma do 7º ano do ensino fundamental



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 6 - Dinâmica da identificação de resíduos sobre coleta seletiva com o 7º ano do ensino fundamental



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 7 - Turmas do 6º e do 7º ano no início da oficina



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 8 - Realização da oficina com as turmas

à aplicação do segundo instrumento de coleta de dados (questionário) aos estudantes participantes.

A aplicação dos instrumentos de coleta de dados (questionários) aos estudantes do 6º e do 7º ano da EEEFM Dom Pedro II, com o objetivo de avaliar seus conhecimentos e interesse em relação aos temas de resíduos sólidos, reciclagem, meio ambiente e segurança, permitiu a obtenção de dados que, após o processo de tabulação, resultaram nos achados apresentados nos Gráficos 1 a 6.

Os Gráficos 1 e 2 ilustram, respectivamente, os resultados da aplicação do primeiro instrumento de coleta de dados (questionário), que investigou o conhecimento prévio dos estudantes acerca da terminologia adequada para



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 9 - Alunas testando a funcionalidade dos brinquedos elaborados na oficina



Fonte: pesquisa direta (2024).

Figura 10 - Aplicação do segundo questionário às turmas do 6º e do 7º ano do ensino fundamental

designar resíduos sólidos, e do segundo instrumento, que avaliou a progressão desse entendimento em decorrência das ações implementadas no âmbito do projeto.

A análise do Gráfico 1 revela que uma parcela considerável dos estudantes empregava o termo “lixo” de maneira abrangente, sinalizando a necessidade de aprofundamento conceitual.

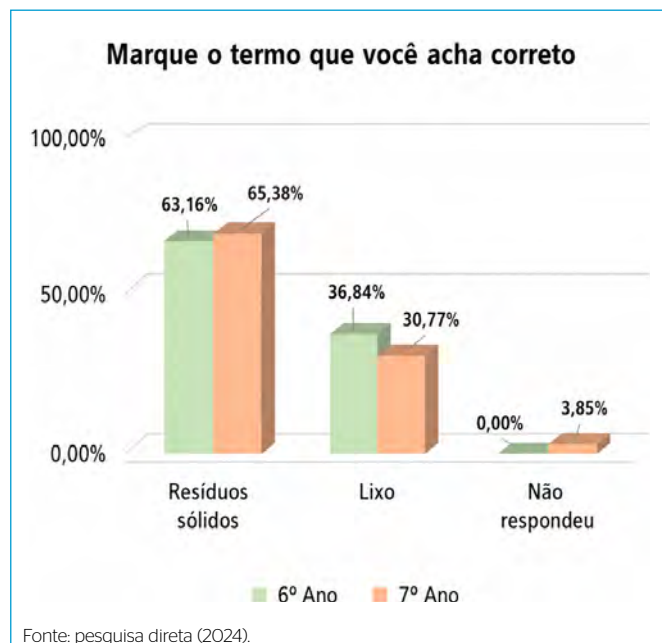


Gráfico 1 - Conhecimento do termo correto sobre lixo

Em contraste, o Gráfico 2 apresenta um avanço na distinção entre a terminologia correta e a inadequada referente aos resíduos sólidos, indicando o efeito positivo das intervenções pedagógicas, notadamente a palestra informativa e a oficina prática.

Esses resultados convergem com o que é discutido por Chad *et al.* (2024) ao afirmarem que a reciclagem de

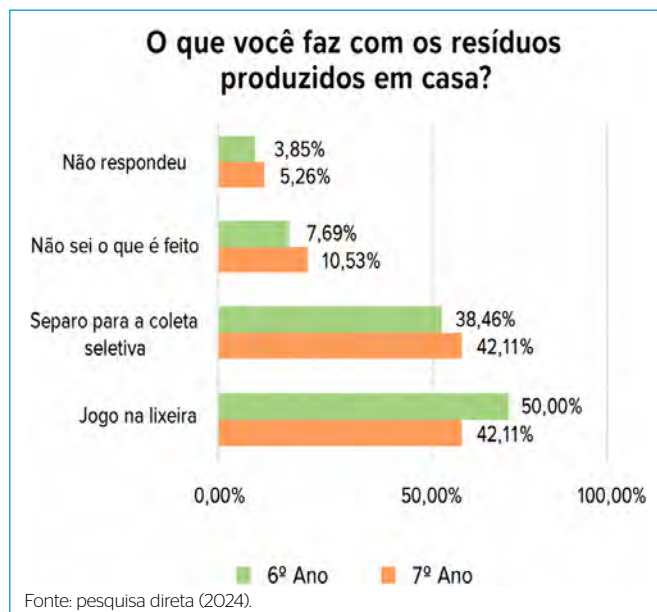


Gráfico 3 - Manejo dos resíduos domésticos, informado no primeiro questionário



Gráfico 2 - Reavaliação dos termos corretos



Gráfico 4 - Manejo dos resíduos domésticos, informado no segundo questionário

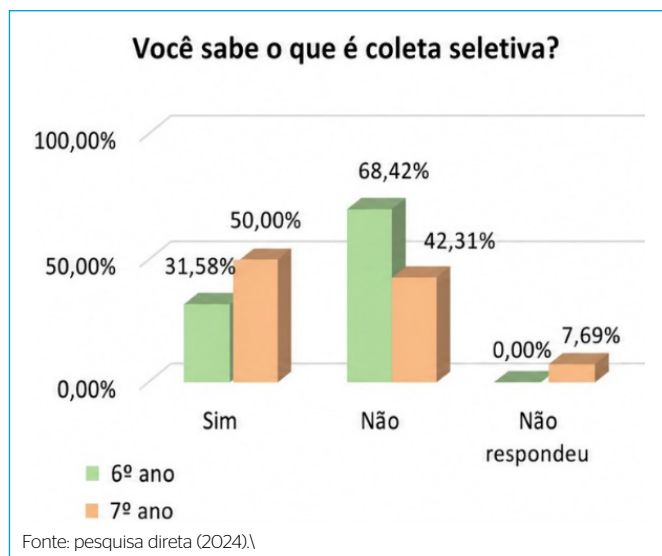


Gráfico 5 - Conhecimento sobre coleta seletiva

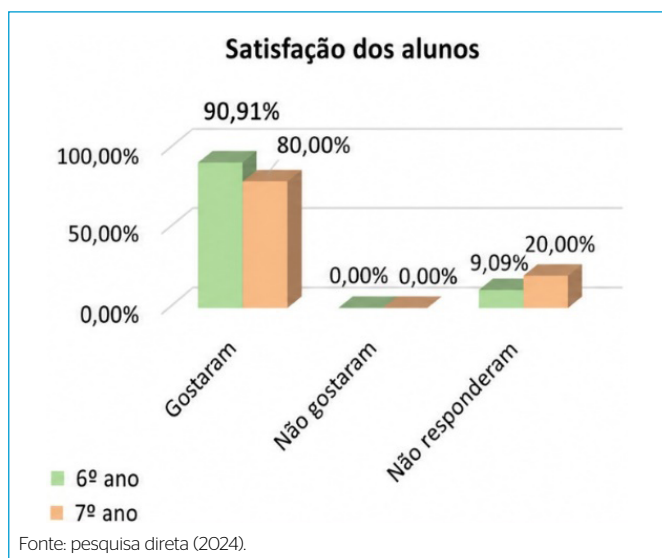


Gráfico 6 - Satisfação pela participação no projeto

resíduos sólidos tem uma influência direta na segurança ambiental nacional. Para os autores, a transição para modelos de economia circular e o bom desempenho no Índice de Desempenho Ambiental (EPI) dependem de uma infraestrutura cognitiva iniciada na base educacional, em que a distinção correta entre o que é “lixo” e o que é “resíduo” permite que o cidadão reconheça o valor econômico e ambiental do material descartado.

Os Gráficos 3 e 4 ilustram os resultados das questões referentes ao manejo de resíduos no âmbito doméstico, investigando as práticas adotadas pelos estudantes no

descarte e na segregação de materiais. Esses gráficos oferecem uma perspectiva sobre o conhecimento e as condutas dos estudantes em relação à gestão dos resíduos gerados em seus lares, possibilitando a avaliação do nível de conscientização acerca da relevância da reciclagem e do descarte adequado no contexto familiar.

A análise do Gráfico 3 revela uma semelhança nas respostas de ambas as turmas, indicando que a prática predominante para o acondicionamento de resíduos nos domicílios dos estudantes é a utilização de lixeiras. Em contraste, o Gráfico 4 demonstra um entendimento entre os alunos de que a destinação correta dos resíduos implica a adoção de separação e reciclagem, para fins de coleta seletiva. A comparação entre os dados coletados no primeiro e no segundo questionários apresenta uma mudança significativa. No primeiro questionário, 42,11% dos alunos do 6º ano e 50% dos alunos do 7º ano reportaram destinar os resíduos diretamente às lixeiras, sem realizar a separação prévia.

Essa mudança de percepção é fundamental em países em desenvolvimento, nos quais a eficácia da gestão de resíduos está intrinsecamente ligada a fatores institucionais e educacionais. Conforme aponta a literatura da Springer (2016), a implementação de políticas de EA escolar amplia significativamente a eficácia dos sistemas de coleta em regiões nas quais a infraestrutura municipal é sobrecarregada, como ocorre em Belém com o aterro de Marituba, transformando o estudante em um agente que reduz a pressão sobre o sistema de limpeza urbana.

Os Gráficos 5 e 6 apresentam informações complementares, retratando o nível de conhecimento sobre coleta seletiva e o grau de satisfação dos alunos.

A análise do Gráfico 5 evidencia um desconhecimento significativo sobre a coleta seletiva por parte de muitos estudantes, informação identificada inicialmente e que direcionou a abordagem pedagógica da palestra e das dinâmicas. Embora o foco inicial tenha sido a EA, a introdução de conceitos de segregação correta conecta-se diretamente à Segurança do Trabalho. De acordo com Arivanandan e Jaiswal (2020), a saúde ocupacional de trabalhadores da limpeza urbana e catadores é severamente impactada pela falha na segregação na fonte, que os expõe

a riscos biológicos e materiais perfurocortantes. Ao educar os alunos para o descarte correto, o projeto cria uma barreira de segurança preventiva que protege os profissionais da região do bairro do Marco e arredores.

Em contrapartida, o Gráfico 6 demonstra um elevado nível de satisfação dos alunos, o que se refletiu positivamente nas interações observadas. Adicionalmente aos resultados quantitativos, a gestão escolar destacou o impacto da iniciativa na transformação da perspectiva dos alunos e na introdução de abordagens metodológicas inovadoras. Em virtude do sucesso alcançado, a gestão da escola solicitou a implementação do projeto no semestre seguinte, confirmando que a união entre teoria (Segurança do Trabalho) e prática (Educação Ambiental) é uma estratégia eficaz para a consolidação do aprendizado e para a promoção da sustentabilidade local.

CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a efetividade de uma abordagem de EA integrada à segurança do trabalho na sensibilização de alunos do 6º e do 7º ano da EEEFM Dom Pedro II, em Belém do Pará, para a problemática da geração de resíduos sólidos e a importância da prevenção de acidentes em seu manejo. A metodologia empregada, estruturada em quatro etapas que incluíram diagnóstico, palestra informativa e atividades práticas como a oficina de reutilização, revelou-se pertinente para o alcance dos objetivos propostos.

A análise comparativa dos resultados obtidos nos questionários aplicados antes e após as intervenções pedagógicas evidenciou uma evolução significativa no conhecimento dos discentes em relação à terminologia correta para designar resíduos sólidos, com uma diminuição da utilização do termo genérico “lixo”. Adicionalmente, constatou-se uma maior compreensão da importância da coleta seletiva e da destinação adequada dos resíduos, tanto no contexto escolar quanto no doméstico.

Embora o acondicionamento de resíduos em lixeiras já fosse uma prática comum entre os alunos, a intervenção pedagógica contribuiu para a conscientização sobre a necessidade de separação para reciclagem, conforme demonstrado na análise dos Gráficos 3 e 4. O desconhecimento

inicial sobre a coleta seletiva, identificado no Gráfico 5, direcionou o conteúdo da palestra e do questionário final, resultando em maior entendimento sobre o tema, conforme relatado pelos alunos e observado nas interações durante as atividades.

O elevado nível de satisfação dos alunos com o aprendizado, evidenciado no Gráfico 6, reforça o impacto positivo da metodologia ativa e participativa adotada, que combinou teoria e prática de forma engajadora. O sucesso da oficina de reutilização, utilizando resíduos da própria escola, ilustra o potencial de atividades lúdicas e criativas para internalizar conceitos de sustentabilidade.

O reconhecimento do impacto positivo do projeto por parte da gestão escolar e a solicitação de sua continuidade e adaptação para o ensino médio sinalizam a relevância e a pertinência da abordagem desenvolvida. Em suma, as ações implementadas lograram sensibilizar os alunos, promover o conhecimento sobre o manejo sustentável de resíduos e despertar atitudes mais conscientes em relação ao meio ambiente e à segurança, demonstrando o potencial da integração da EA com a segurança do trabalho no contexto escolar.

Considerando o interesse manifestado pela gestão, a expansão do projeto para o ensino médio surge como um passo natural. Nessa nova etapa, a abordagem pode ser aprofundada, explorando aspectos legais, responsabilidades em diversos contextos e oportunidades profissionais na área. Para assegurar a internalização dos conhecimentos e a sustentabilidade das práticas incentivadas, a incorporação contínua da coleta seletiva e da reutilização no dia a dia da escola é fundamental. Paralelamente, o engajamento de toda a comunidade escolar, incluindo professores, funcionários e pais, por meio de atividades específicas, pode ampliar o impacto do projeto.

Ao direcionar o olhar para a segurança do trabalho, especialmente na adaptação para o ensino médio, um aprofundamento das questões de prevenção de acidentes no manejo de resíduos, abordando riscos específicos e o uso de EPIs, é crucial. A implementação dessas recomendações permitirá à EEEFM Dom Pedro II fortalecer suas iniciativas, consolidando uma cultura de sustentabilidade e prevenção de acidentes que transcenda os muros da escola e impacte positivamente a comunidade.

REFERÊNCIAS

ARIVANANDAN, M.; JAISWAL, Ajeet. Occupational health and safety of workers in municipal solid waste management system. **International Journal of Clinical and Medical Case Reports**, v. 2, n. 5, 2020. <https://doi.org/10.46998/IJCMCR.2020.02.000049>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BRASIL. Decreto nº 11.044, de 13 de abril de 2022. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem – Recicla+. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 abr. 2022.

BRASIL. Decreto nº 11.413, de 13 de abril de 2023. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral e o Certificado de Crédito de Massa Futura, no âmbito dos sistemas de logística reversa de que trata o art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 fev. 2023.

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.

CHAD, Felix *et al.* The Influence of Solid Waste Recycling on National Environmental Security Based on the 2022 Environmental

Performance Index (EPI): An Analysis of Leading Global Models. **ResearchGate**, 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 275, de 25 de abril de 2001. Estabelece o código de cores para os diferentes tipos de resíduos, a ser adotado na identificação de coletores e transportadores, bem como nas campanhas informativas para a coleta seletiva. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 jun. 2001.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. [S. l.]: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 12 jan. 2025.

SCHMIDT, Sarah; LANER, David; VAN EYGEN, Emile; STANISAVLJEVIC, Nemanja. Material efficiency to measure the environmental performance of waste management systems: A case study on PET bottle recycling in Austria, Germany and Serbia. **Waste Management**, v. 110, p. 74-86, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.011>

SPRINGER. **Solid waste management and education in developing countries**. Switzerland: Springer Nature, 2016.

Avaliação da vulnerabilidade a inundações na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé

Assessment of flood vulnerability in the Minas Gerais portion of the Pomba and Muriaé river basins

Breno Verly Rosa^{1*} , Luciana Fernandes Guimarães¹ ,
Rosa Maria Formiga Johnsson¹ , Bruna Peres Battemarco¹ 

RESUMO

As mudanças climáticas e o crescimento desordenado das cidades vêm intensificando a frequência e a severidade das inundações, tornando a gestão do risco um desafio crescente. O mapeamento da vulnerabilidade é essencial para o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas voltadas à redução dos impactos das inundações. Nesse sentido, o estudo teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade a inundações na porção mineira das Bacias Hidrográficas dos Rios Pomba e Muriaé, utilizando uma abordagem multicritério. O Índice de Vulnerabilidade a Inundações Fluviais foi calculado com base em quatro indicadores: densidade de vias, densidade populacional, uso e ocupação do solo e distância do rio. Os dados foram processados no **software** QGIS e normalizados em uma escala linear para facilitar a classificação da vulnerabilidade em três níveis (baixo, médio e alto). Os resultados indicaram pontos de alta vulnerabilidade em 41% dos municípios pertencentes às bacias, com destaque para: Carangola, Muriaé, Cataguases, Visconde do Rio Branco e Ubá. Dentre os indicadores utilizados, a distância dos cursos d'água e a densidade populacional foram os mais influentes na definição das áreas de maior vulnerabilidade. A sobreposição do mapa de vulnerabilidade com registros históricos de alagamentos confirmou a correlação entre as áreas mais vulneráveis e os eventos recorrentes de inundação. Por fim, a utilização dos quatro indicadores para a composição do índice de vulnerabilidade mostrou-se apropriada, uma vez que os resultados obtidos refletem, de maneira geral, a realidade e demonstram a eficácia do índice em representar adequadamente a vulnerabilidade.

Palavras-chave: risco a inundações; vulnerabilidade; avaliação multicritério.

ABSTRACT

Climate change and the unplanned growth of cities have intensified the frequency and severity of floods, making risk management an increasing challenge. Mapping vulnerability is a key tool for land-use planning and for the formulation of public policies aimed at reducing flood impacts. In this context, the present study aimed to assess flood vulnerability in the Minas Gerais portion of the Pomba and Muriaé River Basins, using a multicriteria approach. The River Flood Vulnerability Index was calculated based on four indicators: road density, population density, land use and land cover, and distance to the river. The data were processed using QGIS, and normalized on a linear scale to facilitate the classification of vulnerability into three levels (low, medium, and high). The results revealed areas of high vulnerability in 41% of the municipalities within the basins, particularly in Carangola, Muriaé, Cataguases, Visconde do Rio Branco, and Ubá. Among the indicators used, distance to the river and population density were the most influential in defining areas of higher vulnerability. The overlay of the vulnerability map with historical flood records confirmed a correlation between the most vulnerable areas and the recurrent flood events. Finally, the use of the four indicators to compose the vulnerability index proved appropriate, as the results generally reflect the regional reality and demonstrate the effectiveness of the index in adequately representing spatial flood vulnerability.

Keywords: flood risk; vulnerability; multicriteria assessment.

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

***Endereço para correspondência:** Rua São Francisco Xavier, 524 – Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente – Bloco F. Rio de Janeiro, RJ. CEP: 20550-900. E-mail: verly.breno@posgraduacao.uerj.br

INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos naturais que têm se intensificado tanto em frequência quanto em magnitude, principalmente devido à crescente pressão antrópica sobre a paisagem e às mudanças climáticas (Vojtek *et al.*, 2023). Em função disso, a abordagem tradicional de gestão da drenagem urbana tem sido gradualmente substituída por uma abordagem focada na gestão de risco de inundação (Miguez; Veról, 2017), o que transformou a compreensão e o gerenciamento dos riscos associados a inundações em desafios centrais para o planejamento e a gestão territorial.

Nesse contexto, o mapeamento dos riscos de inundação emerge como uma ferramenta crucial para a gestão desses desastres em todas as etapas de seu ciclo – prevenção, mitigação, preparação para o evento, resposta e recuperação. O mapeamento eficaz permite identificar as áreas mais vulneráveis e implementar ações mais assertivas e eficientes para reduzir os danos, sejam eles ambientais, sociais ou econômicos (Vojtek *et al.*, 2023).

Cabe destacar que o conceito de risco não é universal e distintas áreas do conhecimento adotam definições variadas. Além disso, este conceito foi evoluindo ao longo do tempo à medida que as discussões sobre o tema foram se intensificando. O relatório AR3 do IPCC (Assessment Report ou Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (IPCC, 2001), por exemplo, descreve o risco como uma função da probabilidade de ocorrência de determinado evento e suas consequências. Nos relatórios seguintes, houve a introdução do conceito de vulnerabilidade (IPCC, 2007) e, em seguida, a integração entre os dois conceitos (IPCC, 2014), reforçando o que já havia sido feito no SREX – Relatório Especial sobre Gestão dos Riscos de Eventos Extremos (IPCC, 2012). Já no AR6 do IPCC (IPCC, 2019), o risco foi redefinido como uma função do potencial de geração de consequências adversas para o homem e/ou o meio ambiente e da exposição, da sensibilidade e da capacidade de adaptação do sistema.

Neste trabalho, assume-se o conceito de risco definido nos relatórios mais recentes do IPCC, em que este é determinado pelo perigo, pela vulnerabilidade e pela exposição, sendo os dois últimos associados às consequências potenciais, ou seja, aos danos causados pelo evento. Segundo Samuels

e Gouldby (2009), enquanto a exposição ao risco é a quantidade dos elementos que podem ser afetados, a vulnerabilidade representa os atributos de uma comunidade que podem ser danificados por um evento de inundação devido à sua suscetibilidade e ao valor de cada elemento.

Especificamente quanto ao conceito de vulnerabilidade, o relatório AR4 do IPCC (IPCC, 2007) a definiu como sendo composta de três fatores: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação, enquanto no relatório AR5 (IPCC, 2014), a vulnerabilidade passou a ser definida por somente dois elementos: sensibilidade e capacidade de lidar e se adaptar.

Cabe ressaltar que a vulnerabilidade a inundações é um conceito multidimensional, capaz de envolver diversos componentes sociais, físicos e ambientais e, portanto, pode ser avaliada por meio de diversos critérios e indicadores (Tebasi; Fereshtehpour; Roghani, 2025). Em seu estudo de revisão acerca das estruturas de avaliação de risco de inundação, Tebasi, Fereshtehpour e Roghani (2025) identificaram critérios como a taxa de alfabetização, o uso do solo, a qualidade da construção, a densidade de construção, a proporção de área verde, a idade das construções, a densidade populacional, a densidade de drenagem, a densidade das redes de transportes e a idade da população, para avaliação e quantificação da vulnerabilidade a inundações nos diversos estudos levantados.

Mapear a vulnerabilidade a inundações auxilia na identificação de níveis diferentes de vulnerabilidade em determinada área geográfica, na elaboração de planos estratégicos e de gestão de risco para prevenção e redução de impactos das inundações e na compreensão dos fatores que causam a vulnerabilidade em determinada área, bem como promove a participação de diversas partes interessadas (Membele; Naidu; Mutanga, 2022).

A literatura recente sobre vulnerabilidade a inundações em países em desenvolvimento evidencia crescimento expressivo do interesse científico e a consolidação de abordagens integradas, que articulam variáveis geográficas, ambientais e socioeconômicas. A revisão de Membele, Naidu e Mutanga (2022) destaca esse avanço metodológico, mas também aponta uma baixa representatividade de estudos no Brasil, com apenas cinco trabalhos entre os

130 analisados, indicando uma lacuna relevante na produção científica nacional sobre o tema.

No contexto brasileiro, os estudos identificados apresentam diversidade de enfoques e metodologias. Rasch (2015) desenvolveu um índice nacional de vulnerabilidade à inundações para 1.276 municípios, integrando dados socioeconômicos, do ambiente construído e do meio natural. De Brito, Evers e Almoradie (2018; 2019) propuseram uma abordagem participativa de decisão multicritério aplicada aos municípios de Lajeado e Estrela, incorporando vulnerabilidade social, estrutural e capacidade de enfrentamento, além de análises de sensibilidade e incerteza. Já Caldas *et al.* (2018), ao estudarem Batatais, adotaram critérios físicos e ambientais, produzindo um mapeamento mais associado à suscetibilidade e ao perigo físico de inundações do que à vulnerabilidade socioeconômica.

Por sua vez, Rezende *et al.* (2020) ampliam o debate ao propor um índice de capacidade de recuperação socioeconômica de áreas urbanas sujeitas a inundações, por meio de uma abordagem multicritério aplicada à bacia do Canal do Mangue, no Rio de Janeiro. Em conjunto, esses estudos revelam que a vulnerabilidade a inundações no Brasil é tratada a partir de múltiplas dimensões — social, estrutural, ambiental, física e de resiliência —, evidenciando tanto a riqueza metodológica quanto a fragmentação conceitual do campo, e reforçando a necessidade de modelos integrados que articulem perigo, exposição, vulnerabilidade e capacidade de resposta e recuperação.

Apesar desses avanços, observa-se uma lacuna significativa na produção nacional, tanto em termos de cobertura territorial quanto de consolidação metodológica. Membele, Naidu e Mutanga (2022) identificaram que há necessidade de aprofundamentos no que se refere à produção de mapas de vulnerabilidade a inundações que retratem a distribuição espacial ou padrões e níveis de vulnerabilidade (baixa, média ou alta). Isso porque diferentes aspectos podem ser considerados para identificar pessoas ou grupos que são mais vulneráveis a inundações em áreas geográficas específicas. Além disso, os mapas produzidos devem ser capazes de retratar a realidade local para que sejam usados na tomada de decisões e em intervenções políticas (Membele; Naidu; Mutanga, 2022).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe contribuir para o avanço do conhecimento sobre a vulnerabilidade a inundações, tendo como objetivo calcular o Índice de Vulnerabilidade a Inundações Fluviais na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé, pertencente à Bacia do Rio Paraíba do Sul. Cabe destacar que a Bacia do Rio Paraíba do Sul conta com um plano de gerenciamento de risco (PGR) (Associação Pró-gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, 2022). Assim, por meio desse índice, busca-se uma base sólida para a tomada de decisões e para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes no enfrentamento dos riscos de inundações na região.

METODOLOGIA

A abordagem adotada neste estudo para avaliar a vulnerabilidade fundamenta-se na metodologia multicritério proposta por Cheng *et al.* (2023), na qual a vulnerabilidade é determinada com base em cinco indicadores: densidade de vias, densidade populacional, uso e ocupação do solo, distância do rio e densidade de pontos-chave. Contudo, baseado nas características da área de estudo, o último indicador foi desconsiderado. A Figura 1 mostra o fluxograma com as etapas da pesquisa.

A “densidade de vias” refere-se à relação entre a extensão da rede viária e a área da região. Assim, áreas com altas densidades de vias são consideradas mais vulneráveis a inundações e com maior potencial de danos. A relação população residente-área reflete a distribuição e a concentração de pessoas em um território. Nesse sentido, áreas com alta densidade populacional podem ser mais vulneráveis a desastres e indicam que mais pessoas e atividades podem ser afetadas. O “uso e ocupação do solo”, por sua vez, reflete a forma como o território de determinada região está ocupado e é utilizado. Os variados padrões de uso da terra impactam os processos hidrológicos, uma vez que diferentes padrões apresentam condições distintas de escoamento e capacidade de infiltração. Por fim, o indicador “distância do rio” reflete quão próxima determinada área está do curso d’água. Dessa forma, áreas mais próximas dos cursos d’água são mais vulneráveis por estarem mais propensas a inundações.

A formulação do Índice de Vulnerabilidade é, portanto, um somatório ponderado dos quatro indicadores, expresso em escala linear de 4 a 10. Posteriormente, esses valores foram divididos em faixas (baixa, média e alta), com o intuito de facilitar a interpretação e destacar com maior clareza os diferentes níveis de gravidade. A classificação de cada indicador nas faixas é detalhada na Tabela 1.

Os indicadores foram processados usando o *software* QGIS. Como os indicadores têm unidades diferentes, foi necessária a normalização deles entre 1 e 3 para eliminar a influência dimensional. Cada camada de informação foi transformada em uma camada *raster* com resolução espacial uniforme de 50 × 50 m.

A resolução espacial de 50 × 50 m foi adotada em consonância com a metodologia multicritério proposta por Cheng *et al.* (2023), que enfatiza a necessidade de compatibilidade entre a escala de análise, a resolução dos dados de entrada e o nível de detalhe requerido na avaliação da

vulnerabilidade. Essa resolução é suficiente para capturar a variabilidade espacial dos indicadores analisados, ao mesmo tempo em que evita a superinterpretação de informações provenientes de dados com diferentes escalas e precisões, além de garantir eficiência computacional no processamento das camadas raster.

Para os indicadores “densidade de vias”, “densidade populacional” e “distância do rio”, caracterizados como quantitativos, quatro técnicas distintas apresentadas por *default* no QGIS (intervalo igual, intervalo geométrico, quartil e Quebra Natural de *Jenks*) foram testadas para analisar a sensibilidade dos dados de cada indicador quanto à divisão nas três classes. Contudo, foi adotada aquela que demonstrou a melhor adequação ao tipo e às características dos dados analisados.

Para o indicador “uso e ocupação do solo”, de natureza qualitativa, a classificação foi baseada nas características específicas do local de estudo, levando em consideração o grau de impermeabilização do solo, a presença de

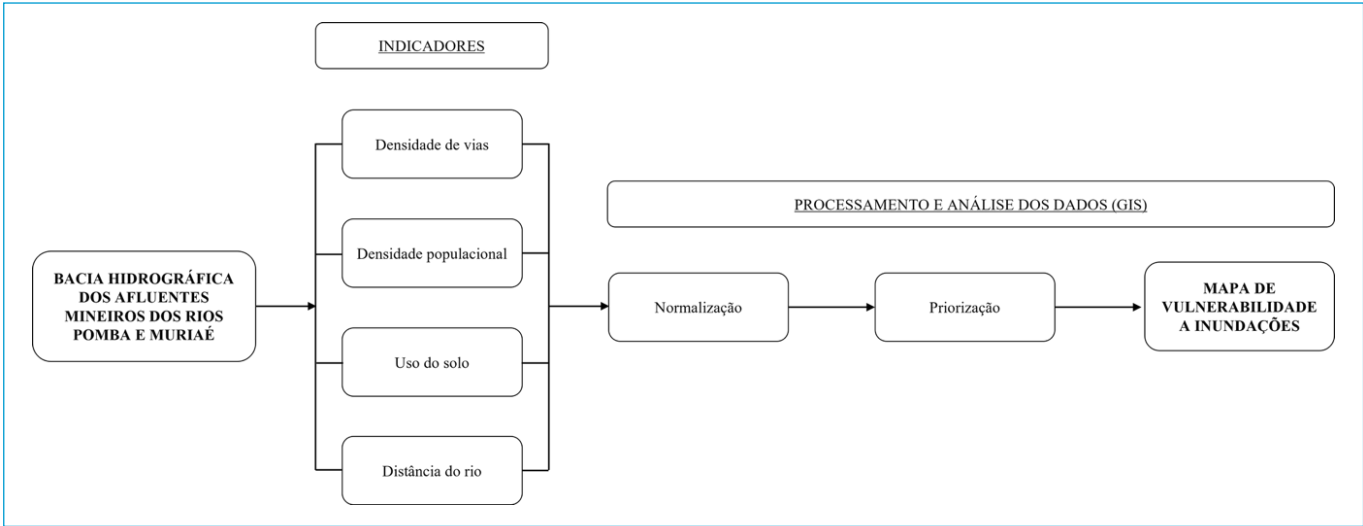


Figura 1 – Metodologia do estudo, adaptado de Cheng et al. (2023)

Tabela 1 – Classificação dos indicadores de vulnerabilidade utilizados

Indicadores	Pesos	Classificação		
		Baixa (≤ 5,35)	Média (5,35-7,00)	Alta (≥ 7,00)
Densidade de vias (km/km²)	0,25	≤ 0,11	0,12-0,18	> 1,18
Densidade populacional (hab./km²)	0,25	≤ 46	47-120	> 120
Uso do solo	0,25	Corpo hídrico, floresta e vegetação, sem classificação	Campos/pastagens e área agrícola	Área urbanizada
Distância do rio (m)	0,25	> 150	151-50	≤ 50

Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2023).

ocupação urbana, bem como a existência de áreas verdes e agrícolas. As classes de uso do solo foram hierarquizadas de acordo com sua maior ou menor suscetibilidade à ocorrência de danos, sendo posteriormente normalizadas para integração ao índice de vulnerabilidade.

Em relação à priorização, optou-se pela simplificação com a utilização de pesos iguais para os indicadores, ou seja, considerou-se que cada indicador exerce a mesma influência na classificação da vulnerabilidade. Por fim, utilizando a ferramenta *raster calculator* para a realizar a sobreposição das camadas *raster* de cada indicador, foi possível criar uma única camada de informação referente ao mapa de vulnerabilidade a inundação.

Características da área de estudo

As Bacias dos Rios Pomba e Muriaé são sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, uma bacia altamente estratégica no cenário nacional, abrangendo áreas de São

Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (Figura 2). Juntas, as duas sub-bacias compreendem 65 municípios e abrangem uma área de 16.778 km², correspondente a 30% da área total da Bacia do Rio Paraíba do Sul. De acordo com o Censo IBGE (2010), a população total das sub-bacias dos Rios Pomba e Muriaé era de 837.509 habitantes (cerca 10% da população total da Bacia Paraíba do Sul), com a maioria vivendo em áreas urbanas (82,6%).

Em termos populacionais, os maiores municípios são (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010): Muriaé (100.765 habitantes), Ubá (100.505 habitantes), Cataguases (69.757 habitantes) e Leopoldina (51.130 habitantes). No entanto, na porção mineira das bacias dos rios Pomba e Muriaé, predomina municípios de pequeno porte, a maioria deles (86,2%) apresentando populações abaixo de 20 mil habitantes.

De acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia (2021), 77,5% das faixas marginais dos rios da

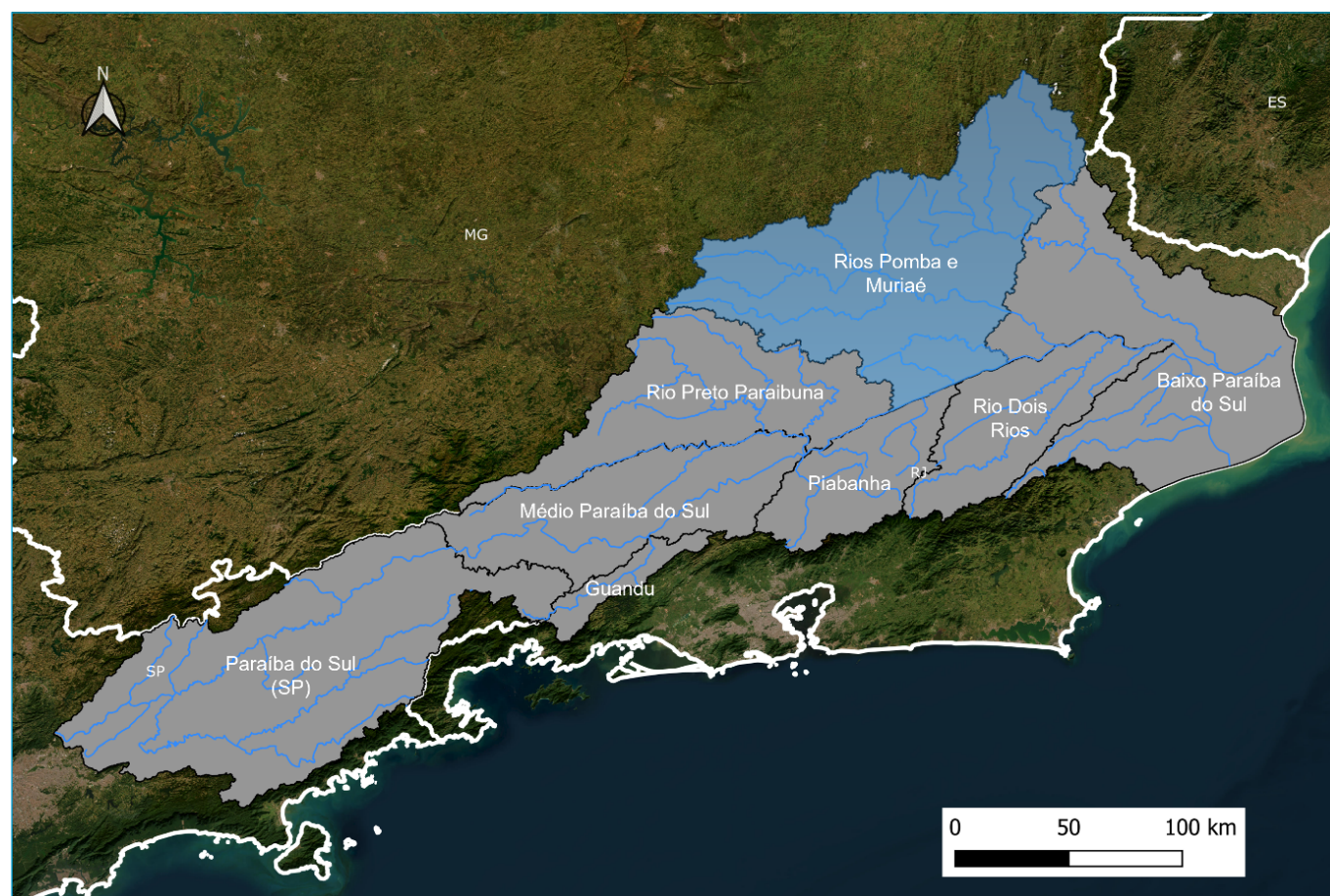


Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo

bacia são áreas afetadas por atividades antrópicas, utilizadas predominantemente como campos/pastagens. Somente 19,8% das faixas marginais estão protegidas ou não estão afetadas pela atividade humana.

Um dos principais desafios enfrentados pelos municípios dessas bacias são as cheias (Comitê da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Pomba e Muriaé, 2021), de caráter regional, que impactam várias cidades ao longo dos rios. Esse problema é agravado pela forma como o território foi ocupado: às margens dos rios, algumas vezes em sua calha secundária, em áreas potencialmente alagáveis.

As maiores cheias de caráter regional dos rios Pomba e Muriaé ocorreram nos anos de 1925, 1943, 1961, 1979, 1983, 1985, 1997, 2003, 2007, 2008, 2009 e 2012. As principais cidades afetadas nesses processos foram: Muriaé, Patrocínio do Muriaé, Miraí, Tombos, Cataguases e Carangola. Ressalta-se que eventos críticos nessas sub-bacias são comuns, sendo algumas cidades atingidas quase anualmente por inundações em pontos isolados (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019).

Para o equacionamento da vulnerabilidade à inundação na porção mineira das Bacias dos Rios Pomba e Muriaé, utilizaram-se bases de dados de órgãos oficiais do governo, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e órgãos gestores da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e das sub-bacias dos rios Pomba e Muriaé, conforme apresentado na Tabela 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vulnerabilidade a inundações na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé
A Figura 3 apresenta os mapas resultantes da aplicação de cada um dos indicadores de vulnerabilidade selecionados

à área de estudo. Os resultados dos indicadores “densidade de vias” e “densidade populacional” estão diretamente relacionados às áreas urbanas da área de estudo. Assim, as zonas de alta densidade de vias e alta densidade populacional coincidiram com as áreas urbanas consolidadas, especificamente os centros urbanos das sedes dos municípios.

As maiores densidades de vias foram observadas nas áreas urbanas dos distritos sede de Muriaé, Visconde do Rio Branco, Cataguases e Leopoldina (Figura 3A). Nessas localidades, a impermeabilização do solo dificulta a infiltração da água, intensificando o escoamento superficial.

A densidade populacional na bacia tende a ser baixa, com a maioria dos municípios apresentando valores de até 50 hab./km². Densidades superiores a 100 hab./km² ocorrem nos municípios de Barbacena, Cataguases, Muriaé, Rio Branco e Ubá (Figura 3B), tornando essas áreas mais vulneráveis devido à maior quantidade de pessoas e construções expostas ao perigo.

No que se refere ao uso e à ocupação do solo, as áreas de campos/pastagens, floresta e vegetação são as que predominam na bacia (76,11%) e são as que apresentam menor vulnerabilidade a inundações (Figura 3C). Em contrapartida, as manchas urbanas (3,28%), associadas às sedes dos municípios mais populosos, são mais suscetíveis a eventos de inundação devido à menor capacidade de infiltração da água, ao maior volume de escoamento superficial e ao maior potencial de impacto diante esses eventos.

Quanto à análise acerca da distância do rio (Figura 3D), as áreas mais próximas aos rios e seus afluentes são também as que apresentam os maiores valores de vulnerabilidade, pois estão sujeitas aos impactos diretos do extravasamento do rio. Esse fator torna o indicador crucial na análise da área de estudo, já que a maior parte da

Tabela 2 – Fontes dos dados levantados para a aplicação do Índice de Vulnerabilidade a Inundações na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé

Índice	Indicadores	Fonte de dados
Vulnerabilidade	Densidade de vias (DV)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – Face de logradouros, 2022
	Densidade populacional (DP)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – Face de logradouros – Censo 2010
	Uso do solo (US)	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), s.d.
	Distância do rio (DR)	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), s.d.

população da bacia está concentrada próxima às margens dos cursos d'água.

O mapa resultante da avaliação da vulnerabilidade à inundação na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé é apresentado na Figura 4. Todos os municípios das bacias apresentaram algum nível de vulnerabilidade. Ressalta-se que pontos de alta vulnerabilidade foram observados em 27 municípios (41%), com destaque para Carangola, Muriaé, Cataguases, Visconde do Rio Branco e Ubá.

Os municípios de Visconde do Rio Branco (14,51%), Carangola (13,20%) e Muriaé (12,58%) apresentam parcelas expressivas de suas áreas urbanas inseridas em zonas classificadas como de alta vulnerabilidade a inundações. Destacam-se, entretanto, Ubá e Cataguases, cujas proporções são ainda mais elevadas — 27,75 e 24,17% de suas áreas urbanas, respectivamente, estão enquadradas

nessa mesma categoria de vulnerabilidade. A Figura 5 apresenta a porcentagem da área urbana desses cinco municípios que se sobrepõe às áreas classificadas como de alta vulnerabilidade.

Dentre as sub-bacias, a do Rio Pomba é a que apresenta as maiores extensões de áreas de alta vulnerabilidade (0,21% de seu território total) e, nos municípios, as áreas com pior classificação consistem naquelas situadas às margens dos rios, muitas vezes onde está concentrada praticamente toda a população.

No estudo de caso em questão, os indicadores que mais influenciaram o surgimento de níveis elevados de vulnerabilidade foram a distância em relação ao curso hídrico e a densidade populacional. Isso significa que a interação entre a proximidade dos cursos d'água e a ocupação dessas áreas marginais se revelou um fator de maior importância para o aumento da vulnerabilidade

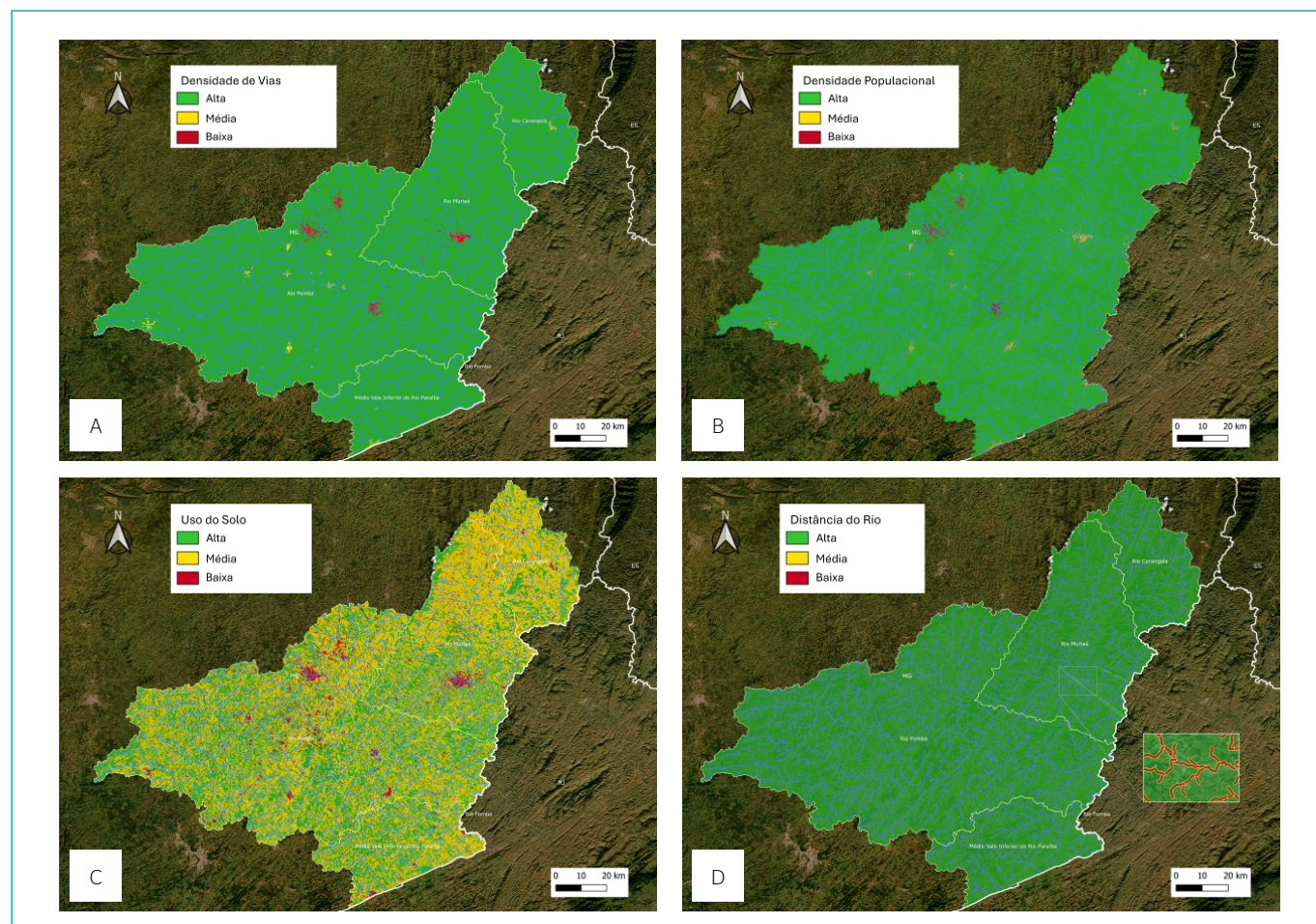


Figura 3 – Mapa dos indicadores de vulnerabilidade na área de estudo: (A) densidade de vias; (B) densidade populacional; (C) uso do solo; (D) distância do rio

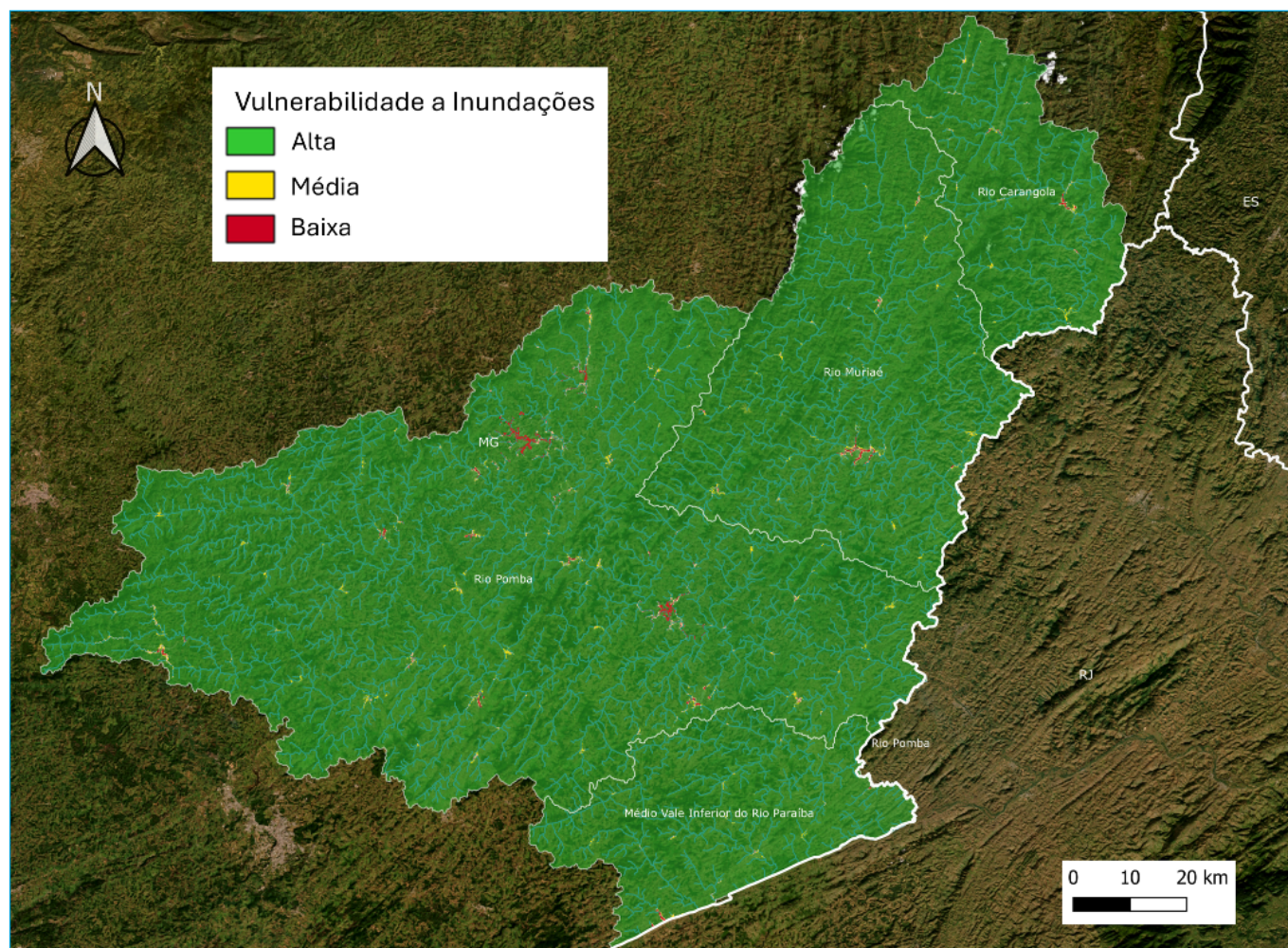


Figura 4 - Avaliação da vulnerabilidade a inundações da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Pomba e Muriaé

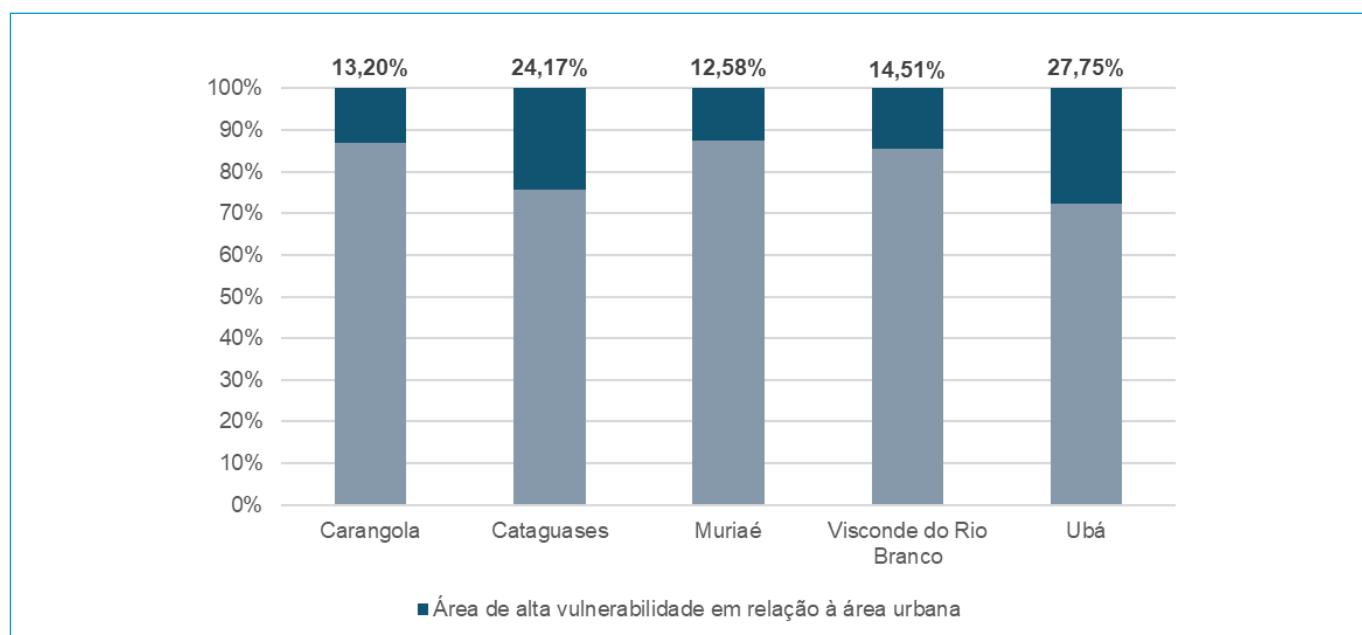


Figura 5 - Área de alta vulnerabilidade a inundações em relação à área urbana

na maioria das regiões. Consequentemente, as áreas mais distantes dos rios, com menores densidades, foram consideradas de baixa vulnerabilidade. Ao mapa do nível de vulnerabilidade foram sobrepostos pontos de alagamentos nos municípios de Carangola, Cataguases e Muriaé (Figura 6), levantados durante o desenvolvimento do Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul — SISPREC

(Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019), a fim de verificar a materialização do risco de inundações. A análise da sobreposição sugere que as áreas de maior vulnerabilidade coincidem, em grande parte, com os locais onde os pontos de alagamento são mais frequentes, evidenciando alto grau de risco às comunidades expostas.

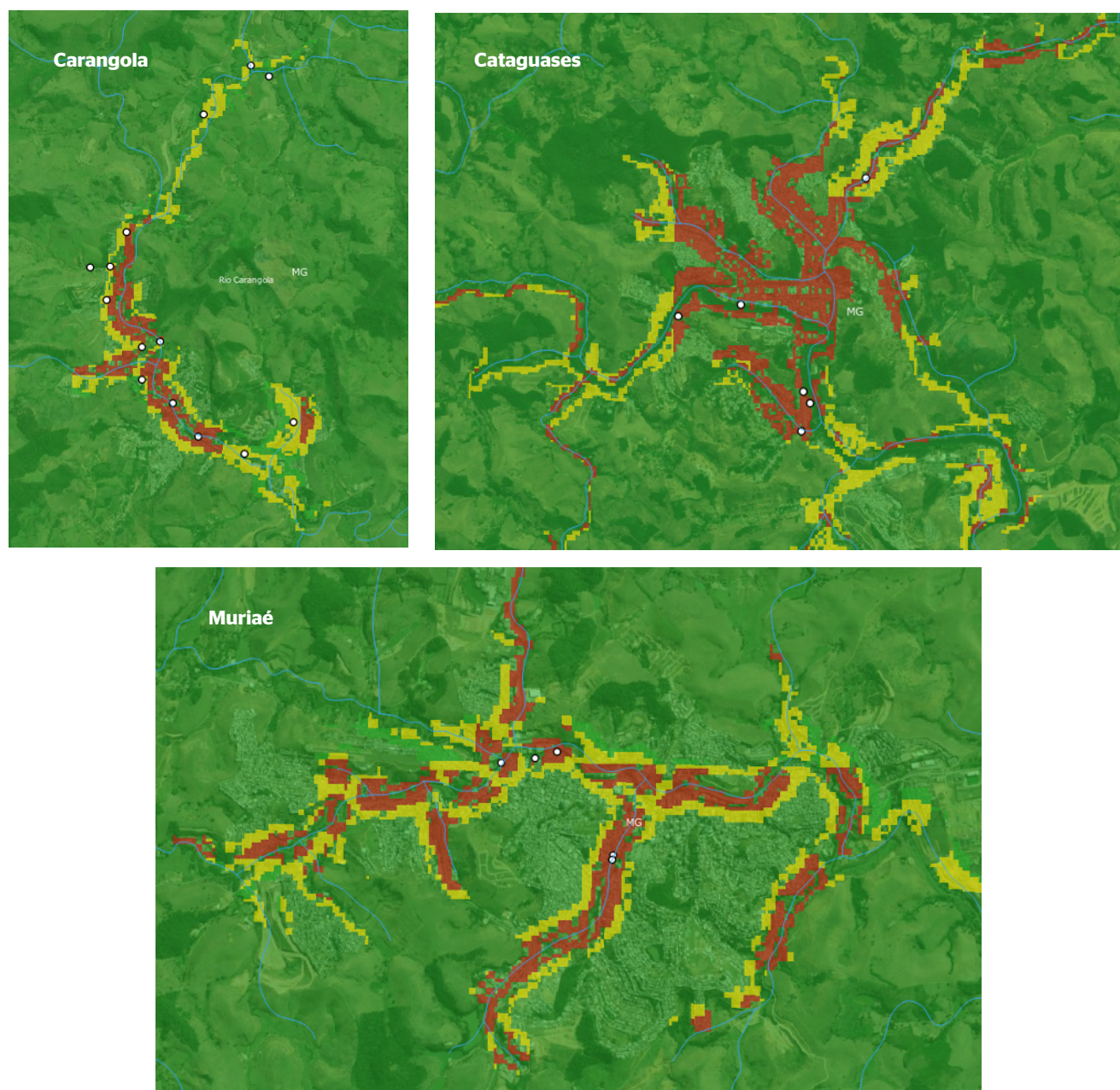


Figura 6 – Detalhes do mapa de vulnerabilidade à inundação e pontos de alagamento nos municípios de Carangola, Cataguases e Muriaé

Discussões

Os resultados evidenciam o potencial do índice de vulnerabilidade como instrumento técnico de apoio ao planejamento territorial e à gestão de riscos de inundações, ao permitir a identificação objetiva de áreas prioritárias para intervenção. O índice de vulnerabilidade pode ser incorporado a instrumentos de planejamento territorial e gestão de riscos, como planos diretores, planos municipais de redução de riscos, planos de drenagem urbana e planos de defesa civil, orientando o ordenamento do uso do solo, a priorização de investimentos em infraestrutura e a definição de ações preventivas.

Nesse sentido, a hierarquização espacial da vulnerabilidade também contribui para a alocação mais eficiente de recursos públicos, para o planejamento de ações preventivas e para a estruturação de estratégias de monitoramento e resposta a desastres. A correspondência entre áreas de alta vulnerabilidade e registros históricos de alagamentos reforça a consistência empírica do modelo e sua capacidade de representar padrões reais de exposição e suscetibilidade.

Cabe destacar que a extrapolação do método para outros municípios brasileiros é viável por se tratar de uma estrutura multicritério baseada em indicadores universalmente disponíveis no território nacional, obtidos em bases públicas padronizadas, e operacionalizada por técnicas SIG acessíveis. A lógica espacial dos critérios adotados (proximidade a cursos d'água, densidade populacional, densidade de vias e uso do solo) representa processos territoriais comuns à maioria dos contextos urbanos brasileiros, permitindo sua replicação. Além disso, o modelo apresenta caráter adaptativo, possibilitando ajustes por meio da inclusão de novos indicadores, redefinição de pesos e calibração das classes de vulnerabilidade conforme as especificidades locais. Assim, o método se configura como uma estrutura-base transferível, aplicável a diferentes municípios, desde que respeitadas as particularidades socioespaciais e as limitações associadas à disponibilidade e atualização dos dados.

Contudo, a aplicação prática dos resultados requer cuidados metodológicos e interpretativos. O índice representa

apenas a dimensão da vulnerabilidade, não o risco em sua totalidade, devendo ser integrado a análises de perigo, exposição e capacidade de resposta. Ademais, limitações relacionadas à utilização de dados secundários, à adoção de pesos iguais entre os indicadores e à ausência de variáveis socioeconômicas restringem a análise às dimensões física e estrutural do risco.

Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como uma base estruturante para sistemas integrados de gestão de risco de inundações, e não como um modelo fechado ou definitivo. O índice apresenta robustez como ferramenta de diagnóstico territorial e de priorização espacial, mas seu pleno potencial se concretiza quando integram perigo, exposição, vulnerabilidade social, capacidade de resposta e resiliência, contribuindo para a construção de políticas públicas mais eficazes, territorialmente orientadas e adaptativas frente ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos.

CONCLUSÕES

O uso de indicadores integrados constitui uma estratégia válida para se conhecer e analisar determinada realidade, sendo fundamental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pelo consequente aumento de eventos extremos. Nas bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé, a avaliação da vulnerabilidade a inundações consiste em um passo essencial para o planejamento territorial sustentável e para a mitigação de riscos.

Cabe ressaltar, contudo, que a presente pesquisa apresentou limitações inerentes à abordagem e à metodologia adotadas. Embora a aplicação dos quatro indicadores para a composição do índice de vulnerabilidade tenha se mostrado adequada — considerando que, de forma geral, os resultados observados são aderentes à realidade —, a ausência de indicadores socioeconômicos (como renda, faixa etária, estrutura/qualidade das habitações ou acesso à infraestrutura) pode limitar a compreensão da vulnerabilidade social, restringindo o resultado às dimensões física e estrutural do risco.

Outro aspecto limitante refere-se à adoção de pesos iguais entre os indicadores. Embora essa decisão simplifique a

análise e o processamento dos dados, ela pode não refletir necessariamente a influência diferenciada de cada variável na determinação da vulnerabilidade. Além disso, a utilização de dados secundários provenientes de fontes com diferentes períodos de atualização, ainda que correspondam às fontes mais recentes disponíveis, pode não contemplar transformações recentes no padrão de urbanização e impermeabilização do solo, e subestimar as condições atuais de exposição.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o aprimoramento do índice por meio da incorporação de novos indicadores socioeconômicos, ambientais e de infraestrutura, de modo a ampliar a multidimensionalidade da análise. Sugere-se, ainda, a utilização de métodos de ponderação diferenciada, como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), o método Entropy ou Delphi, que permitem atribuir pesos com base na importância relativa de cada indicador, proporcionando maior robustez ao modelo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Estudos Auxiliares para Gestão do Risco de Inundações da Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://gripbsul.ana.gov.br/Sisprec.html>. Acesso em: 27 jun. 2025.
- ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **Plano de Gerenciamento de Risco (PGR) para a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. São Paulo, 2022.
- CALDAS, Anildo Monteiro; PISSARRA, Teresa Cristina Tarle; COSTA, Renata Cristina Araujo; ROLIM NETO, Fernando Cartaxo; ZANATA, Marcelo; PARAHYBA, Roberto da Boa Viagem; FERNANDES, Luis Filipe Sanches; PACHECO, Fernando Antonio Leal. Flood Vulnerability, Environmental Land Use Conflicts, and Conservation of Soil and Water: A Study in the Batatais SP Municipality, Brazil. *Water*, v. 10, n. 10, p. 1357, 2018.
- CHEN, Yiqing; WANG, Deyun; ZHANG, Ludan; GUO, Haixiang; MA, Junwei; GAO, Wei. Flood risk assessment of Wuhan, China, using a multi-criteria analysis model with the improved AHP-Entropy method. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 42, p. 96001-96018, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29066-8>
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS AFLUENTES MINEIROS DOS RIOS POMBA E MURIAÉ. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Pomba e Muriaé - PDRH**. Rio de Janeiro, 2021.
- COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **SIGA-CEIVAP**. Sistema Integrado de Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Resende, RJ: CEIVAP; AGEVAP, [s. d.]. Disponível em: <https://sigaaguas.org.br/home/apps/repositorio/?group=Compe>. Acesso em: 3 maio 2025.
- DE BRITO, Mariana Madruga; EVERS, Mariele; ALMORADIE, Adrian Delos Santos. Participatory flood vulnerability assessment: a multi-criteria approach. *Hydrology Earth System Sciences*, v. 22, n. 1, p. 373-390, 2018. <https://doi.org/10.5194/hess-22-373-2018>
- DE BRITO, Mariana Madruga; ALMORADIE, Adrian Delos Santos; EVERS, Mariele. Spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis in a MCDA-based flood vulnerability model. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 33, n. 9, p. 1788-1806, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base de Faces de Logradouros do Brasil: 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/28971-base-de-faces-de-logradouros-do-brasil.html>. Acesso em: 3 maio 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Assessment Report - AR3**. 2001. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/front-1.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Assessment Report - AR4**. 2007. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Assessment Report - AR5**, 2014. Disponível em: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Assessment Report - AR6**. 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation – SREX**. 2012. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.

MEMBELE, Garikai M.; NAIDU, Maheshvari; MUTANGA, Onesimo. Examining flood vulnerability mapping approaches in developing countries: A scoping review. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 69, n. 3, p. 102766, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102766>

MIGUEZ Marcelo G.; VERÓL Aline P. A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design. **Environment and Planning B: Urban**, v. 44, n. 5, p. 925-946, 2017. <https://doi.org/10.1177/0265813516655799>

RASCH, Rebecca Joan. Assessing urban vulnerability to flood hazard in Brazilian municipalities. **Environment & Urbanization**, v. 28, n. 1, p. 145-168, 2015. <https://doi.org/10.1177/0956247815620961>

REZENDE, Osvaldo Moura; FRANCO, Anna Beatriz Ribeiro da Cruz de; OLIVEIRA, Antonio Krishnamurti Beleño de; MIRANDA,

Francis Martins; JACOB, Ana Caroline Pitzer; SOUSA, Matheus Martins de; MIGUEZ, Marcelo Gomes. Mapping the flood risk to Socioeconomic Recovery Capacity through a multicriteria index. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, n. 2020, p. 120251, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120251>

SAMUELS, Paul Graham; GOULDBY, Ben. **Language of Risk – Project Definitions**. 2nd ed. (Report No. T32-04-01). FLOODsite, 2009. 57 p. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:268e1ef4-7b45-4b4d-8504-13d2f252e4d9/datastream/OBJ/download>. Acesso em: 20 jun. 2025.

TEBASI, Nazgol; FERESHTEHPOUR, Mohammad; ROGHANI, Bardia. A review of flood risk assessment frameworks and the development of hierarchical structures for risk components. **Discover Water**, v. 5, n. 10, p. 1-20, 2025.

VOJTEK, Matej; VOJTEKOVÁ, Jana; DE LUCA, Davide Luciano; PETROSELLI, Andrea. Combined basin-scale and decentralized flood risk assessment: a methodological approach for preliminary flood risk assessment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 3, p. 355-378, 2023. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2157279>

Artigo Científico

Regulador baixa tensão/baixa tensão móvel para uso nas instalações operacionais de água e esgoto com problemas de qualidade de energia

Low voltage/low voltage mobile regulator for use in water and sewage operational facilities with power quality issues

Rodrigo Masayuki Yamano^{1*} , Leandro Pereira dos Santos¹ , Marcos Cesar de Souza Brito¹ 

RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade da utilização de um regulador de tensão móvel e portátil, com capacidade de entrada e saída de 220/380 Vca (tensão em corrente alternada), para a estabilização da tensão em unidades operacionais críticas, frequentemente afetadas por instabilidades no fornecimento de energia elétrica. No contexto dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário, as estações de bombeamento, dispersas geograficamente ao longo das áreas de serviço, estão comumente localizadas a grandes distâncias dos alimentadores e subestações de energia. Tal condição as torna particularmente vulneráveis a falhas em reguladores de média tensão da concessionária de energia e a sobrecargas no sistema elétrico, o que compromete a continuidade operacional. A implementação do regulador de tensão móvel e portátil visa garantir a operação ininterrupta dessas instalações essenciais, minimizando os impactos adversos decorrentes de falhas prolongadas na qualidade do fornecimento de energia. A análise proposta considera os benefícios técnicos e econômicos da tecnologia, sua aplicabilidade em cenários reais e os potenciais ganhos operacionais para o setor de saneamento.

Palavras-chave: regulador de tensão; qualidade de energia; manutenção eletromecânica; disponibilidade operacional.

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility of using a mobile and portable voltage regulator, with an input/output capacity of 220/380 VAC (alternating current voltage), for voltage stabilization in critical operational units frequently affected by power supply instabilities. Within the context of water supply and sewage systems, pumping stations—geographically dispersed throughout the service areas—are commonly located at great distances from power feeders and substations. Such condition makes them particularly vulnerable to failures in the utility's medium-voltage regulators and power system overloads, compromising operational continuity. The implementation of the mobile and portable voltage regulator aims to ensure the uninterrupted operation of these essential facilities, minimizing adverse impacts resulting from prolonged failures in power supply quality. The proposed analysis considers the technical and economic benefits of the technology, its applicability in real-world scenarios, and the potential operational gains for the sanitation sector.

Keywords: voltage regulator; power quality; electromechanical maintenance; operational availability.

INTRODUÇÃO

Os reguladores de tensão utilizados em redes de distribuição geralmente são compostos de autotransformadores, dispositivos que integram as funções de entrada e saída em um sistema compartilhado. Essa configuração permite que o equipamento atue de forma versátil, funcionando

tanto para elevar quanto para reduzir a tensão da rede conforme a necessidade.

Quando o equipamento opera no modo elevador, a tensão entregue na saída é ajustada para ser superior à tensão recebida na entrada. Essa funcionalidade é essencial para compensar quedas de energia que ocorrem naturalmente

¹Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. – Salvador (BA), Brasil.

*Endereço para correspondência: 4ª Avenida, 420, Centro Administrativo da Bahia – CAB, Salvador, Bahia. CEP: 41745-002. E-mail: rodrigoyamano@embasa.ba.gov.br

ao longo de linhas de distribuição extensas, garantindo que a unidade operacional receba a voltagem adequada.

Por outro lado, ao operar como redutor, o sistema ajusta os níveis elétricos para que a tensão de saída seja inferior à de entrada. Essa operação protege os componentes da rede contra sobretensões, evitando danos aos equipamentos e assegurando a estabilidade e a continuidade dos serviços. Os reguladores para rede de distribuição utilizados pelas concessionárias de energia são projetados com saída regulável de acordo com o diagrama de funcionamento básico mostrado na Figura 1. Esses equipamentos têm diversos TAP's (derivações) na bobina secundária possibilitando alterar a relação de transformação das espiras e, conseqüentemente, a tensão de saída.

A chave com duas posições com terminais K1 e K2 da Figura 1 é responsável pela elevação ou redução da tensão nos terminais da carga. Sensores de tensão e corrente instalados no lado secundário em conjunto com a placa de controle realizam a comutação automática entre os TAP's, variando a entrada do reator de modo a manter a tensão na carga constante.

As concessionárias de energia elétrica instalam reguladores de tensão nas redes de média tensão, ao longo dos alimentadores de distribuição, para assegurar a manutenção da tensão dentro dos limites especificados.

Conforme ilustrado na Figura 2, essas instalações que são fixas são aplicadas em sistemas de distribuição nas classes de tensão 15 a 34,5 kV. Embora projetados para serem robustos, esses equipamentos, com componentes cujo funcionamento é eletromecânico, estão sujeitos

a falhas operacionais. A manutenção corretiva é de responsabilidade exclusiva da concessionária e exige mão de obra altamente capacitada e qualificada, devido à classe de tensão envolvida.

As instalações operacionais de água e esgoto da Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA) são compostas de conjuntos motobombas que funcionam por meio da energia elétrica disponibilizada pela Concessionária de Energia.

As empresas de saneamento, ao contrário de uma planta industrial, nas quais todos os equipamentos estão localizados em um único local, têm seu parque de produção de forma descentralizada de modo que as instalações operacionais estão afastadas umas das outras e da Estação de Tratamento de Água (ETA) ou Estação de Tratamento de Esgotos (ETE).

Considerando essa topologia de operação, as unidades operacionais atendidas em baixa tensão e mais afastadas dos centros urbanos são mais suscetíveis a problemas de qualidade de energia como subtensão e desequilíbrio de tensão.

Destaca-se, também, que instalações localizadas em regiões turísticas que recebem população flutuante sofrem com a qualidade de energia nos períodos em que a rede é sobrecarregada (eventos sazonais e periódicos), resultando em piora na qualidade de energia distribuída.

Constata-se que esses distúrbios no fornecimento de energia podem sensibilizar o relé de proteção de falta de fase/subtensão/desequilíbrio de tensão e as proteções internas dos *drives* como Inversores/*Soft Starters*, provocando o desligamento automático da Instalação. Nessa situação, os equipamentos ficam impedidos de serem acionados até

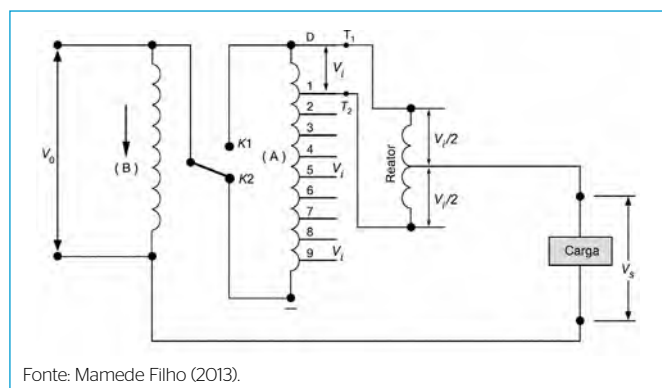


Figura 1 – Esquema básico de um regulador de tensão



Figura 2 – Regulador de tensão instalado na rede de distribuição

que a rede normalize, ocasionando desabastecimento de água ou extravasamento de esgoto.

Ocasionalmente, os problemas de qualidade de energia persistem por horas, raramente, por alguns dias, até serem resolvidos.

Nas estações elevatórias de esgotos (EEE) equipadas com geradores de emergência, a operação contínua desses geradores, quando a rede elétrica apresenta tensão inadequada, é uma preocupação significativa. Esses geradores, projetados para uso temporário, do tipo *stand-by*, sofrem desgaste mecânico e maior risco de falhas quando operados em regime contínuo.

Frequentemente, em cenários de contingência generalizada, em caso de falha do regulador, a concessionária de energia não consegue disponibilizar manutenção no tempo necessário para evitar problemas como desabastecimento de água ou extravasamento de esgoto nas EEE.

Embora uma unidade operacional possa, em certas situações, funcionar sob níveis precários de tensão, tal operação não é recomendável. Níveis críticos de subtenção e desequilíbrio de tensão provocam aquecimento e aumento da vibração nos motores elétricos, reduzindo drasticamente sua vida útil.

Conforme estudos do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e do *Electric Power Research Institute* (EPRI), as falhas nos estatores e nos rolamentos correspondem a 78% de todas as falhas observadas em motores elétricos de indução (Cornell *et al.*, 1982; Motor Reliability Working Group, 1985), conforme mostra a Figura 3.

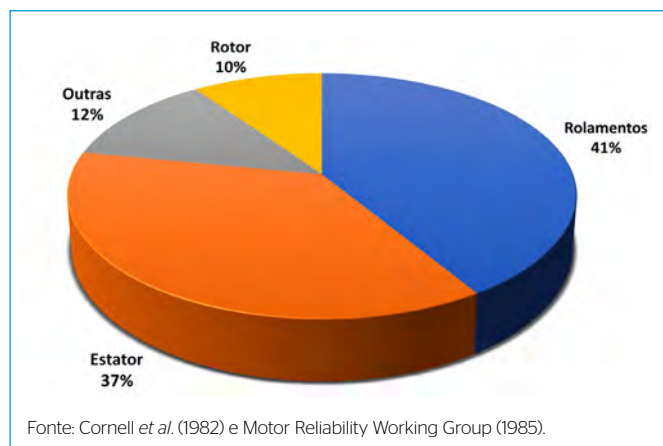


Figura 3 – Distribuição das falhas pelos principais componentes do motor

Diante disso, é possível inferir que a má qualidade da tensão pode contribuir/aumentar a probabilidade de surgimento dos dois tipos de falhas de maior representatividade (elétricas e mecânicas) nos motores elétricos de indução, responsáveis pelo funcionamento das bombas.

Acrescenta-se que o desequilíbrio de tensão pode danificar componentes eletrônicos mais sensíveis, como fontes chaveadas, *nobreaks*, relés eletrônicos e controladores, resultando na parada da unidade.

Portanto, este trabalho propõe uma alternativa para mitigar esses problemas por meio de um regulador de tensão móvel de 40 kVA, de fácil instalação pela equipe de manutenção, com entrada e saída em baixa tensão para atender de forma pontual e periódica as unidades com problemas de qualidade de energia elétrica.

METODOLOGIA

Para este trabalho foi utilizado o método experimental, consistindo no posicionamento de um regulador de tensão de pequeno porte entre o quadro geral de baixa tensão e o painel de acionamento de conjuntos motobombas, conforme o esquema operacional da Figura 4. Diferentemente dos

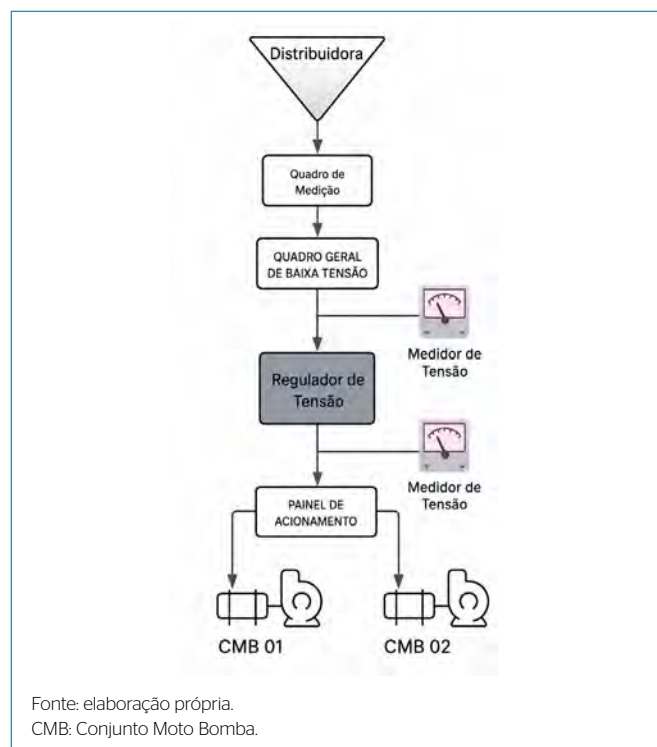


Figura 4 – Posicionamento de regulador de tensão na instalação operacional

modelos de média tensão de instalação fixa, esse equipamento foi dimensionado para fácil transporte em veículos utilitários pela equipe da EMBASA (Figura 5). Sua capacidade atende motores de até 50 CV, o que representa uma abrangência superior a 90% das instalações de baixa tensão da companhia.

Nesse procedimento serão monitoradas as tensões de entrada e saída do regulador para análise comparativa, nível de regulação e performance do equipamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teste 1 - Captação de Cações

Informações da Unidade Operacional:

- 2 motores com potência nominal de 50 CV, potência requerida de 36,8 kW, sendo 1 titular e 1 reserva.
- Regime de operação: 21 horas/dia.

Na unidade de captação de Cações, vinculada à Unidade Regional de Santo Antônio de Jesus, o equipamento apresentou desempenho divergente do esperado. Devido à reduzida distância em relação ao inversor de frequência de 50 CV (inferior a 2 metros), suspeita-se que a distorção harmônica e os sinais eletromagnéticos gerados pelo inversor — que não dispunha de reator ou filtro de entrada — tenham causado interferências no circuito de controle do regulador. Ressalta-se que harmônicos provenientes da rede elétrica ou de cargas não lineares podem comprometer o funcionamento de circuitos eletrônicos sensíveis. Tal hipótese

é tecnicamente plausível, considerando que a saída do regulador estava conectada diretamente à entrada do inversor de frequência.

Teste 2 - Captação de Ouriçangas

Informações da Unidade Operacional:

- 1 motor com potência nominal de 50 CV, potência requerida de 36,8 kW.
- Regime de operação: 21 horas/dia.

Na captação de Ouriçangas, o equipamento operou de forma esperada. As tensões medidas na entrada e na saída são apresentadas na Tabela 1.

Teste 3 - Captação de Rio Real

Informações da Unidade Operacional:

- 1 motor com potência nominal de 50 CV, potência requerida de 36,8 kW.
- Regime de operação: 21 horas/dia.

Na captação de Rio Real (Figura 6), o regulador de tensão operou de forma esperada. As tensões medidas na entrada e na saída são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Tensões medidas e desequilíbrio - Captação de Ouriçangas

	Vab	Vac	Vbc	Desequilíbrio de tensão
Entrada	372,58	380,19	374,5	2,03%
Saída	378,98	376,72	380,88	1,10%

Vab: tensão entre as fases A e B; Vac: tensão entre as fases A e C; Vbc: tensão entre as fases B e C.



Figura 5 - Instalação do regulador BT/BT

Constatou-se que a referida instalação apresentava níveis de tensão em desconformidade com os limites estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2020). Para a tensão nominal de 380 Vca (fase-fase), verificaram-se violações tanto no desequilíbrio de tensão (Tabela 3), cujo limite normativo é de 3%, quanto nos níveis de sobretensão (Tabela 4), em que o intervalo adequado deveria situar-se entre 350 e 399 Vca. Tais irregularidades provocaram a atuação do sistema de proteção do equipamento.



Figura 6 – Regulador BT/BT (P1 Rio Real)

Tabela 2 – Tensões medidas e desequilíbrio – Captação de Rio Real

	Vab	Vac	Vbc	Desequilíbrio de tensão
Entrada	398,7	406,6	393,1	3,38%
Saída	368,8	378,8	372,2	2,68%

Vab: tensão entre as fases A e B; Vac: tensão entre as fases A e C; Vbc: tensão entre as fases B e C.

Tabela 3 – Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

FD: fator de desequilíbrio.
Fonte: ANEEL (2020).

Tabela 4 – Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da tensão de leitura (volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)/(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

TL: tensão de leitura.
Fonte: ANEEL (2020).

Como $V_n \leq 2,3 \text{ kV}$, aplica-se $FD95\% = 3,0\%$ (Tabela 3). Logo, o desequilíbrio de entrada 3,38% estava acima do limite; após o regulador (2,68%), ficou abaixo.

Para 380 V fase-fase, a faixa adequada é 350–399 V (Tabela 4). Na entrada, houve leitura acima de 399 V (por exemplo, 406,6 V), caracterizando sobretensão; na saída, as leituras retornaram à faixa adequada.

Destaca-se que as bombas operam em função do sistema de controle e força contidos no painel de acionamento. Esse painel é responsável pelo controle, pela proteção e pelo acionamento das bombas, e caso haja uma sobrecarga na rede ou problemas de qualidade, as proteções internas serão sensibilizadas e desligarão os equipamentos.

Vale destacar que a intermitência na operação do sistema é indesejável, uma vez que o abastecimento de água exige continuidade operacional para assegurar níveis adequados de pressão e vazão nas redes adutora e distribuidora. Na prática, com as instalações operando sem interrupções, a manutenção da rede pressurizada garante a integridade do fornecimento. Contudo, em cenários de interrupção por problemas no fornecimento de energia, a rede distribuidora é despressurizada, demandando um tempo considerável para sua plena normalização.

CONCLUSÕES

A presente investigação, conduzida por método experimental com o posicionamento de um regulador de tensão de pequeno porte entre o quadro geral de baixa tensão e o painel de acionamento de conjuntos motobombas, com monitoramento das tensões de entrada e saída para análise comparativa, permitiu avaliar o desempenho de um regulador móvel em baixa tensão para atendimento pontual de unidades operacionais com distúrbios de qualidade de energia.

Na Captação de Ouriçangas, o equipamento operou de forma esperada, reduzindo o desequilíbrio de tensão de 2,03% (entrada) para 1,10% (saída), conforme as medições registradas.

Na Captação de Rio Real, verificou-se condição de alimentação em desconformidade com os limites normativos, com sobretensão (por exemplo, 406,6 V fase-fase) e desequilíbrio de 3,38% na entrada, situação associada à

atuação do sistema de proteção do equipamento. Após a aplicação do regulador, as tensões na saída retornaram para o intervalo 368,8–378,8–372,2 V e o desequilíbrio foi reduzido para 2,68%, ficando abaixo do limite de 3% indicado para o indicador FD95% no nível de tensão considerado, além de retornar à faixa adequada de atendimento.

Por outro lado, na Captação de Cações, o equipamento apresentou desempenho divergente do esperado. Devido à proximidade do regulador em relação ao inversor de frequência de 50 CV (inferior a 2 m) e à inexistência de reator/filtro de entrada, suspeita-se que a distorção harmônica e sinais eletromagnéticos tenham interferido no circuito de controle do regulador, indicando a necessidade de critérios mínimos de instalação e mitigação para ambientes com elevada emissão eletromagnética.

Dessa forma, com base nos resultados obtidos, conclui-se que o regulador móvel apresentou viabilidade técnica para estabilização de tensão e redução do desequilíbrio em duas das três unidades testadas, inclusive em cenário com desconformidades frente ao PRODIST (ANEEL, 2020). Entretanto, o desempenho pode ser comprometido quando instalado em proximidade imediata de inversores de frequência sem filtragem, sendo recomendável incorporar medidas de imunidade/filtragem (por exemplo, reatores/filtros e critérios de afastamento) e ampliar

a campanha de ensaios para consolidar limites de aplicação e robustez do conjunto.

Quanto à potencialidade de mercado, os resultados reforçam a pertinência de uma solução móvel e portátil para o setor de saneamento, no qual estações de bombeamento são dispersas e frequentemente instaladas a grandes distâncias de alimentadores e subestações, ficando mais vulneráveis a instabilidades do fornecimento e a falhas de reguladores da concessionária, o que compromete a continuidade operacional.

Além disso, a intermitência operacional é indesejável, pois a interrupção por problemas de energia pode levar à depressurização da rede e demandar tempo considerável para normalização do abastecimento.

Nesse contexto, um regulador transportável, dimensionado para fácil deslocamento por equipes de manutenção e com capacidade para atender motores de até 50 CV (abrangendo parcela majoritária das instalações de baixa tensão da companhia), apresenta potencial para utilização como recurso contingencial e estratégia operacional planejada, seja por formação de “base móvel” regional (equipamento compartilhado entre unidades), seja por modelo de prestação de serviço para atendimento pontual e periódico, reduzindo indisponibilidades e impactos operacionais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica** (Revisão 11). Brasília, DF: ANEEL, 2020.

CORNELL, E. P. *et al.* **Improved motors for utility applications: final report**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1982.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 669 p.

MESH ENGENHARIA. **Regulador de tensão**. 2023. Disponível em: <https://meshengenharia.com/2023/12/19/regulador-de-tensao/>. Acesso em: 03 abr. 2025.

MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP. Report of large motor Reliability Survey of Industrial and Commercial installations: Part I and Part II. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-21, n. 4, p. 853-872, jul./ago. 1985.

Uso combinado de coagulantes naturais derivados de *Moringa oleifera* e *Aloe vera* no tratamento de água do Rio Solimões – Amazonas

*Combined use of natural coagulants derived from *Moringa oleifera* and *Aloe vera* in the treatment of water from the Solimões River – Amazonas*

Adriana Ribeiro Francisco^{1,2} , Camila Clementina Arantes^{1,3*} 

RESUMO

O aprimoramento de tecnologias e de processos de tratamento de água pode contribuir para ampliar as opções, gerando soluções com maior aceitação por parte da população, como o uso de coagulantes naturais em comunidades indígenas. Este trabalho objetivou avaliar a ação conjunta dos coagulantes *Moringa oleifera* e *Aloe vera*, em diferentes combinações de dosagens, no tratamento de água do Rio Solimões (Tabatinga, Amazonas). Foram realizados testes utilizando água bruta com duas faixas de turbidez: 200 a 254 NTU e 40 a 100 NTU. Os ensaios foram conduzidos com coagulação (300 s⁻¹ – 30 segundos) e floculação (40 s⁻¹ – 3 minutos e 20 s⁻¹ – 15 minutos). Amostras foram coletadas ao longo da sedimentação nos intervalos de 0, 5, 10, 20, 30 e 60 minutos para determinação de turbidez, cor aparente e pH. O uso isolado da *M. oleifera* e sua combinação com *A. vera* apresentaram reduções de turbidez e cor aparente em torno de 90%. *A. vera* isolada demonstrou baixo desempenho, com eficiências entre 5,2 e 43,5%. Em água bruta com turbidez mais elevada, a combinação de *M. oleifera* e *A. vera* mostrou discreto ganho de eficiência em relação ao uso isolado da *M. oleifera*, enquanto em turbidez mais baixa, a adição de *A. vera* não trouxe melhorias. Os resultados deste estudo, além de demonstrarem a elevada eficiência da *M. oleifera* usada isoladamente ou combinada com *A. vera* no tratamento da água do Rio Solimões, sugere que em determinadas combinações de dosagens, a *A. vera* atua como um polímero auxiliar.

Palavras-chave: coagulantes naturais; comunidades isoladas; saneamento rural; tratamento de água.

ABSTRACT

The improvement of water treatment technologies and processes can help expand available options, generating solutions with greater social acceptance, such as the use of natural coagulants in indigenous communities. This study aimed to evaluate the combined action of the natural coagulants *Moringa oleifera* and *Aloe vera* at different dosage combinations in the treatment of water from the Solimões River (Tabatinga-AM). Tests were performed using raw water with two turbidity ranges: 200-254 NTU and 40-100 NTU. The experiments included coagulation (300 s⁻¹ for 30 seconds) and flocculation (40 s⁻¹ for 3 minutes and 20 s⁻¹ for 15 minutes). Samples were collected during sedimentation at intervals of 0, 5, 10, 20, 30, and 60 minutes for the determination of turbidity, apparent color, and pH. The isolated use of *M. oleifera* and its combination with *A. vera* achieved turbidity and color reductions of around 90%. When used alone, *A. vera* exhibited low performance, with efficiencies ranging from 5.2 to 43.5%. In high-turbidity water, the combination of *M. oleifera* and *A. vera* showed a slight increase in efficiency compared to *M. oleifera* alone, whereas in lower-turbidity water, the addition of *A. vera* did not improve performance. The results of this study demonstrate the high efficiency of *M. oleifera*, used alone or combined with *A. vera*, in the treatment of Solimões River water, and suggest that, in certain dosage combinations, *A. vera* acts as a polymeric coagulant aid.

Keywords: natural coagulants; isolated communities; rural sanitation; water treatment.

¹Universidade Estadual de Campinas – Campinas (SP), Brasil.

²Universidade Estácio de Sá – Campinas (SP), Brasil.

³Universidade Federal do ABC – Santo André (SP), Brasil.

*Endereço para correspondência: Avenida dos Estados, 5001, Bloco A, Torre 1, sala 6071, Bangú. Santo André, SP. CEP: 09280-560. E-mail: camila.arantes@ufabc.edu.br

INTRODUÇÃO

No Brasil, locais remotos e distantes de grandes centros urbanos dependem de sistemas alternativos de tratamento de água, os quais trazem benefícios que impactam na qualidade de vida e promovem melhorias para as famílias. Muitas soluções simplificadas de tratamento de água demandam cuidados e monitoramento contínuo e eventualmente o envolvimento do usuário na operação e na manutenção do sistema. Mesmo as soluções caseiras podem exigir tempo para a realização do tratamento, conflitando com outras atividades executadas no ambiente rural, dada a indisponibilidade de mão de obra exclusiva para tratar água ou efluentes sanitários em tais localidades. O atendimento à população rural por meio de tecnologias compatíveis com as suas características econômicas e sociais está previsto nos marcos legais do saneamento, conforme as leis nº 11.445/2007 (Brasil, 2007) e nº 14.026/2020 (Brasil, 2020).

Por essa razão, diversas pesquisas buscam otimizar sistemas de tratamento de água, individuais ou coletivos, desenvolvendo técnicas cada vez mais simples, práticas e rápidas, sem comprometer a qualidade, garantindo a manutenção da saúde dos consumidores. O Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) aponta como uma das estratégias para o eixo abastecimento de água “promover incentivos tarifários para estimular a inovação e aplicação de tecnologias alternativas, mais eficientes e adequadas às diferentes localidades” (Brasil, 2019). Assim, o aprofundamento nas investigações de técnicas já difundidas em pequenas comunidades, como processos de coagulação e filtração, demonstra que o saneamento rural também pode ser alvo de inovações.

Outro aspecto importante na escolha da tecnologia de tratamento de água é o gerenciamento de resíduos e a redução da pegada ambiental (Deng, 2021). Nesse contexto, destaca-se a busca por soluções mais sustentáveis (Ang; Mohammad, 2020), como os coagulantes naturais, entre eles a *Moringa oleifera* e a *Aloe vera*. As sementes de *M. oleifera* têm proteínas catiônicas hidrossolúveis responsáveis pelo processo de coagulação e adsorção no tratamento de água e efluentes (Baptista *et al.*, 2015; Camacho *et al.*, 2017; Gandiwa *et al.*, 2020; Nhut *et al.*, 2021; Souza, 2016).

A *A. vera* também tem sido investigada como coagulante no tratamento de água (Amorim; Oliveira, 2023; Borri; Freire; Boina, 2014) por apresentar grupos funcionais que promovem ligações intermoleculares com partículas presentes na água, além de atuarem como adsorventes (Benalia *et al.*, 2022). Estudos utilizando tal coagulante têm demonstrado eficiências de redução de turbidez nas faixas de 36 a 68% (Rodrigues; Aquino; Cordeiro, 2020), 87% (Benalia *et al.*, 2022), 48 a 69% (Amorim; Oliveira, 2023) e 63 a 98% (Martins; Oliveira, 2023). Embora o uso do coagulante extraído da *A. vera* seja promissor, nem sempre o padrão de potabilidade é atendido, sendo sugerido que tal coagulante seja investigado como um coagulante auxiliar (Rodrigues; Aquino; Cordeiro, 2020).

Tais produtos têm origem em fontes renováveis, são biodegradáveis e apresentam um custo-benefício favorável tanto na aquisição e na produção do coagulante, quanto na destinação final do lodo (Saleem; Bachmann, 2019). Além disso, os coagulantes naturais não causam reduções consideráveis de pH (Yin, 2010), o que reduz o uso de insumos químicos no tratamento. A *M. oleifera* e a *A. vera* são espécies de fácil cultivo e bem adaptadas a diferentes regiões do Brasil, o que possibilita a produção do coagulante pelas próprias comunidades que demandam o tratamento de água.

Diversas comunidades indígenas e não indígenas localizadas no Alto Solimões e no Vale do Javari, no extremo oeste do Amazonas, apresentam dificuldades no acesso à água tratada. O Rio Solimões é o principal corpo hídrico superficial da região, sendo utilizado para transporte, recreação e abastecimento de água. No caso do Vale do Javari, o Rio Javari é o principal curso d'água, que, por sua vez, é um afluente que deságua no Rio Solimões. Por isso, os problemas relacionados à água são similares para as comunidades isoladas pertencentes à região. O Plano Distrital de Saúde Indígena do Vale do Javari aponta que a maioria dos casos de doenças diarreicas agudas na região está relacionada com a qualidade da água, com reduções de casos em algumas aldeias após implantação de tecnologias de tratamento de água (Brasil, 2024). No plano são relatadas ações como implantação de Salta-z e filtro de areia, além da distribuição de hipoclorito de sódio e de filtros de barro (Brasil, 2024).

Identificar novas possibilidades para o tratamento de água superficial da região em questão, baseado em plantas que possam ser cultivadas pelos próprios moradores, pode contribuir para a expansão do tratamento de água. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a ação conjunta dos coagulantes naturais a base de *M. oleifera* e de *A. vera* no tratamento de água do Rio Solimões no município de Tabatinga, Amazonas.

METODOLOGIA

Água bruta

A água bruta utilizada no estudo foi coletada na captação da estação de tratamento de água do município de Tabatinga, Amazonas, proveniente do Rio Solimões (4°14'14,92 S 69°56'44,27' W). O município está localizado no extremo oeste do Estado do Amazonas, na tríplice fronteira entre Brasil, Colômbia e Peru.

O valor de turbidez da água do Rio Solimões no ponto de coleta apresenta variações sazonais ao longo do ano. Em geral, após o período de estiagem, quando o rio volta a encher, os valores de turbidez da água bruta aumentam, apresentando valores de turbidez na faixa de 150 a 600 NTU. Quando atinge níveis máximos de cheias, os valores de turbidez diminuem, tendendo a valores mínimos entre 40 e 60 NTU. Neste estudo foram feitas coletas em dois momentos: janeiro de 2025, quando a

turbidez da água bruta variava entre 200 e 254 NTU, e em abril de 2025, com turbidez entre 40 e 100 NTU. Assim, foram efetuados testes em água bruta nessas duas faixas de turbidez.

Preparo dos coagulantes

O coagulante a base de *M. oleifera* foi obtido a partir da solução extraída de sementes descascadas, maceradas e peneiradas (Figura 1A). O pó obtido foi misturado em água destilada e processado em liquidificador. Tal mistura foi coada em filtro de papel (Figura 1B) e aplicada nas proporções concentradas descritas na Tabela 1. No caso da *A. vera*, a solução foi preparada de acordo com metodologia apresentada por Amorim e Oliveira (2023). As folhas foram descascadas (Figura 1C) e processadas em liquidificador com água destilada, na proporção de 2 g de *A. vera* para 50 mL de água. Assim como efetuado para a *M. oleifera*, a mistura obtida foi filtrada em filtro de papel (Figura 1D).

Ensaio de clarificação

Os ensaios de clarificação e análises foram realizados no laboratório da estação de tratamento de água de Tabatinga. Os testes foram conduzidos em equipamento Jar Test, utilizando provas de 1 L em cada jarro. Foi testado o uso do coagulante extraído de sementes de *M. oleifera* combinado com polímero à base de *A. vera* em diferentes combinações de dosagens (Tabela 1). Ensaio preliminares para

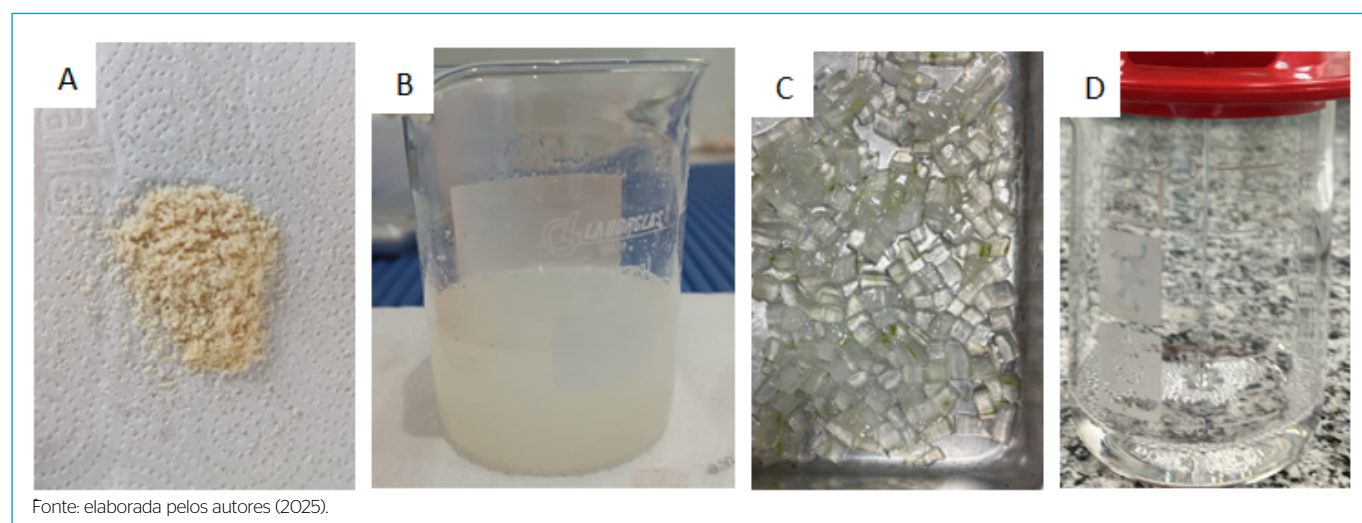


Figura 1 – Etapas da obtenção dos coagulantes: (A) pó obtido das sementes de *M. oleifera*; (B) coagulante extraído de sementes de *M. oleifera* coado; (C) folhas de *A. vera* descascadas; (D) coagulante extraído de folhas de *A. vera* coado

a definição da dosagem de *M. oleifera* foram realizados, com a água bruta com faixa mais reduzida de valores de turbidez, demandando dosagens significativamente superiores à dosagem necessária para valores mais elevados de turbidez da água bruta.

Após adição dos coagulantes nas respectivas dosagens (Tabela 1), efetuou-se o ensaio de clarificação utilizando o gradiente de velocidade máximo de 300 s⁻¹, por 30 segundos, intermediário de 40 s⁻¹, por 3 minutos, e mínimo de 20 s⁻¹, por 15 minutos. Após os tempos de mistura, ocorreram coletas nos intervalos de 0, 5, 10, 20, 30 e 60 minutos. Para as amostras coletadas ao longo do tempo foram determinados os valores dos parâmetros turbidez (NTU), cor aparente (mg Pt-Co/L) e pH (American Public Health Association, 2012).

Tabela 1 - Combinação de dosagem (mg L⁻¹) dos coagulantes testados em função do valor de turbidez da água bruta

Faixa de turbidez (NTU)	<i>M. oleifera</i> + <i>A. vera</i> (mg L ⁻¹)
200 a 254	50 + 0
	50 + 200
	50 + 400
	100 + 0
	100 + 200
	100 + 400
	0 + 400
40 a 100	500 + 0
	500 + 200
	500 + 400
	0 + 200
	0 + 400

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante as etapas de coagulação e floculação, observou-se a formação de flocos decorrente do uso combinado de *M. oleifera* e *A. vera* e apenas *M. oleifera*, com expressiva clarificação da água após a sedimentação (Figura 2).

Redução de turbidez

Para os tratamentos realizados com a água bruta apresentando valores de turbidez na faixa de 200 a 254 NTU, tanto os coagulantes aplicados em conjunto como apenas *M. oleifera*, apresentaram significativa redução de turbidez, com valores residuais inferiores a 6 NTU após 60 minutos de sedimentação (Figura 3), com exceção da dosagem de 50 mg/L de *M. oleifera* isolada. O melhor resultado observado foi para a combinação 100 mg/L de *M. oleifera* com 200 mg/L de *A. vera*, que resultou em turbidez média de 3,9 NTU após 60 minutos de sedimentação.

Ao analisar a contribuição da *A. vera* no processo, observou-se efeito mais expressivo apenas na combinação de 50 mg/L de *M. oleifera* com 200 e 400 mg/L de *A. vera*, que apresentaram turbidez residual de 4,3 e 4,8 NTU, respectivamente. Em comparação, o uso isolado de *M. oleifera* na dosagem 50 mg/L apresentou turbidez final de 10 NTU. Por outro lado, apenas a aplicação da *A. vera* implicou em turbidez de 102,8 NTU ao final da sedimentação.

Nos tratamentos com água bruta apresentando turbidez na faixa de 40 a 100 NTU, o uso isolado da *M. oleifera* ou desta combinada com *A. vera* também apresentaram os menores valores de turbidez residual, na faixa de 3,5 a 4,6 a NTU após 60 minutos de sedimentação (Figura 4). Não se

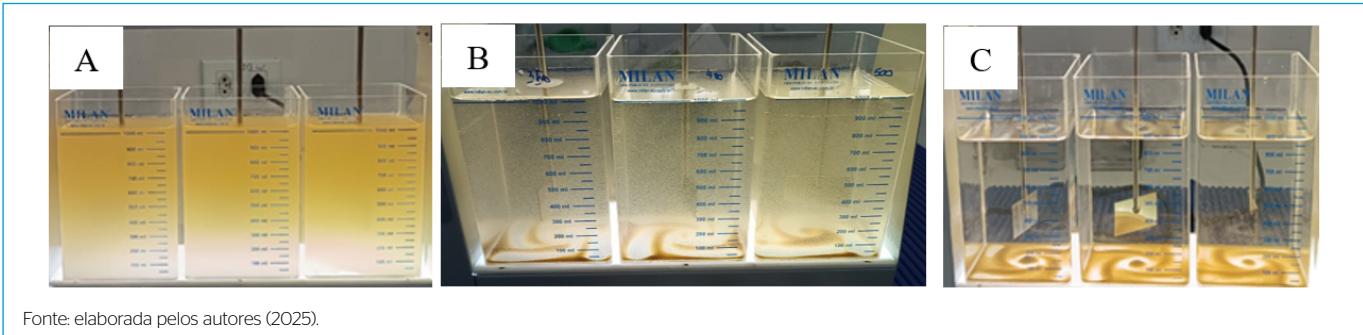


Figura 2 - (A) Água bruta do Rio Solimões; (B) flocos formados; (C) água clarificada após a sedimentação

observou contribuição do uso combinado dos coagulantes, com o uso da *M. oleifera* na dosagem de 500 mg/L combinada com 200 e 400 mg/L de *A. vera*, gerando turbidez

residual de 4,7 e 4,2 NTU, respectivamente, enquanto a *M. oleifera* isolada resultou em turbidez de 3,3 NTU ao final da sedimentação.

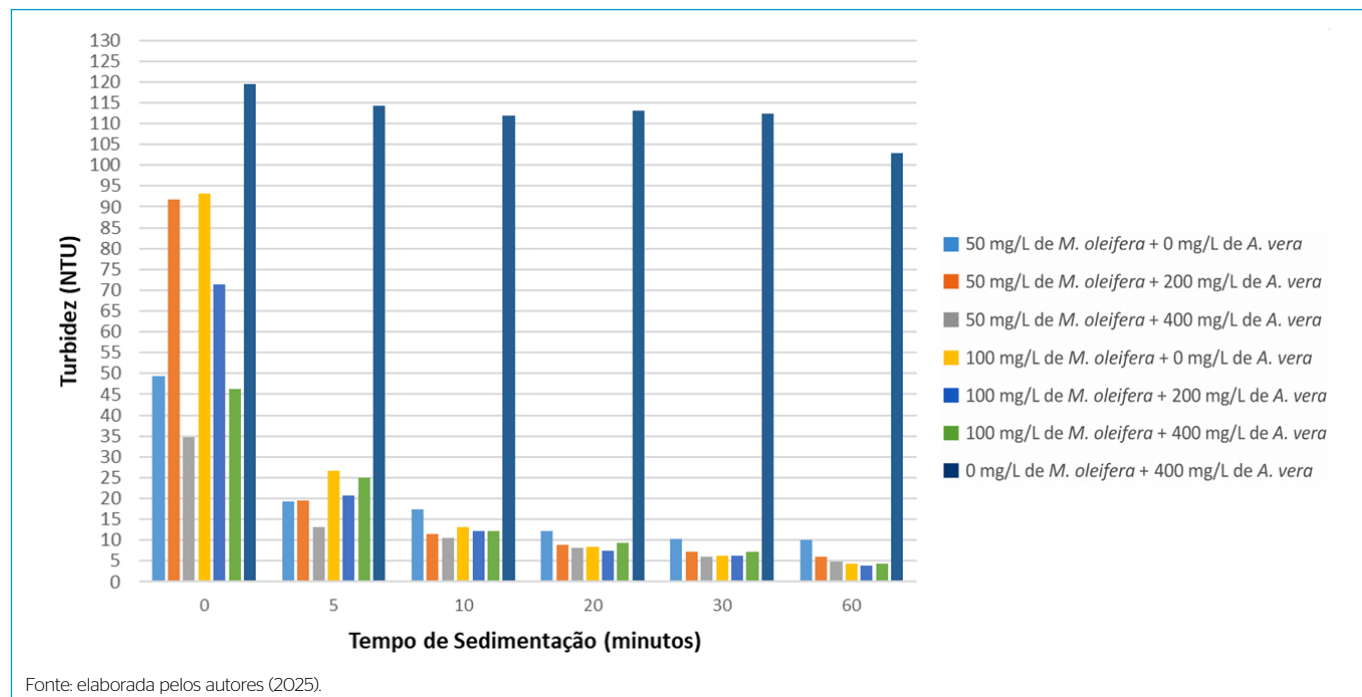


Figura 3 - Valores de turbidez (NTU) para as diferentes dosagens ao longo da sedimentação nos tratamentos realizados com água bruta na faixa de 200 a 254 NTU

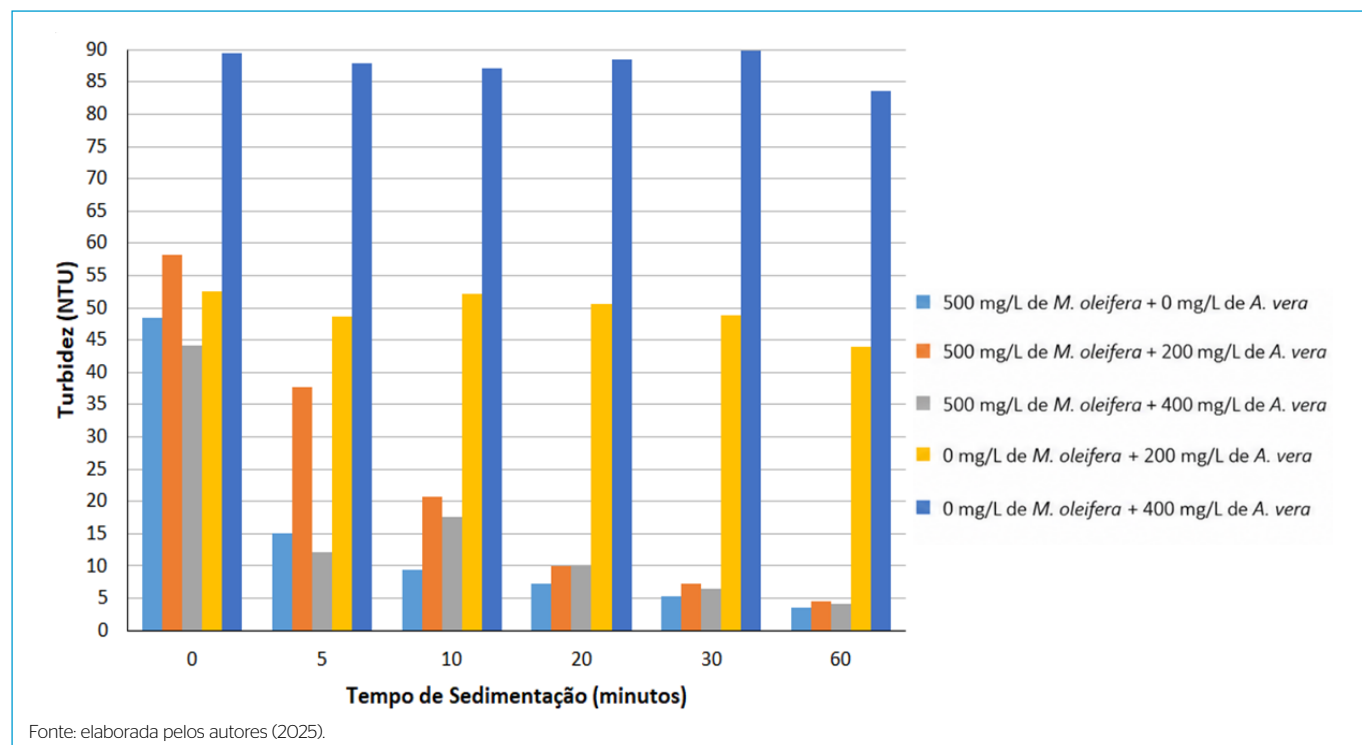


Figura 4 - Valores de turbidez (NTU) para as diferentes dosagens ao longo da sedimentação nos tratamentos realizados com água bruta na faixa de 40 a 100 NTU

Já com a aplicação apenas da *A. vera*, mesmo após 60 minutos de sedimentação, os valores de turbidez observados ficaram acima de 60 NTU. Em tais ensaios, notou-se dificuldade para selecionar as dosagens ótimas dos coagulantes, com melhor desempenho no tratamento com 500 mg/L de *M. oleifera*. Trata-se de uma dosagem elevada, e embora os valores de turbidez estivessem mais reduzidos, os valores de cor aparente da água bruta permaneceram elevados, variando entre 200 e 220 mg Pt-Co/L. Por essa razão, durante os ensaios de otimização, os melhores desempenhos foram com dosagem elevada de *M. oleifera* diante dessa condição sazonal.

Tanto o uso isolado de *M. oleifera* quanto sua combinação com *A. vera* apresentaram eficiência de remoção de turbidez acima de 90% (Tabela 2). A *M. oleifera* usada isoladamente apresentou desempenho semelhante ao uso combinado com *A. vera*, com ligeira redução na eficiência em algumas combinações de dosagens dos dois coagulantes na faixa mais reduzida de turbidez. Kenea *et al.* (2023) obtiveram eficiências próximas de 80% no uso combinado de *M. oleifera* com *A. vera*. O uso isolado da *A. vera* não apresentou bom desempenho, com eficiências de remoção de turbidez de 48,6 e 32% para água bruta nas duas faixas de turbidez, respectivamente.

Gaikwad e Munavalli (2019) constataram que o uso apenas da *A. vera* também não resultou em elevadas reduções de turbidez, com remoções na faixa de 20%. Borri, Freire e Boina (2014) verificaram baixa eficiência do coagulante derivado de *A. vera* em pH 4,0, desempenho satisfatório em pH 7,0 apenas com dosagens elevadas e melhores resultados em pH 10,0.

Por outro lado, Hadadi *et al.* (2022) observaram elevadas remoções de turbidez em ampla faixa de pH (2,0–8,0), com leve redução no desempenho em valores de pH superiores a 8,0. Segundo esses autores, a atuação da *A. vera* está associada à presença de polissacarídeos e proteínas que promovem neutralização de cargas e formação de pontes. A maior eficiência em meio ácido foi atribuída à protonação de grupos hidroxila e carboxila, favorecendo a adsorção dos coloides, enquanto o aumento da carga negativa em meio alcalino poderia reduzir a eficiência por intensificação da repulsão eletrostática. Ainda, Benalia *et al.* (2024) observaram elevado desempenho em pH 2,0, 7,0 e 12,0 ao avaliar *A. vera* em água bruta.

Esses resultados indicam que a influência do pH no desempenho do coagulante derivado de *A. vera* ainda não está clara, podendo depender de fatores como turbidez, alcalinidade, natureza da água bruta (natural ou preparada em laboratório), método de extração do coagulante e dosagem utilizada. A água bruta do Rio Solimões apresentou valores de pH entre 7,0 e 7,5 durante este estudo, situando-se justamente na faixa em que parte da literatura aponta maior variabilidade de desempenho. A faixa de pH adotada corresponde ao pH natural do corpo hídrico estudado, sendo sua utilização também justificada por estudos que indicam bom desempenho da *M. oleifera* em faixas de pH próximas à neutralidade (Murray; Rose; Osborne, 2022; Ndabigengesere; Narasiah, 2010; Trigueros *et al.*, 2023). Outro aspecto considerado neste estudo para a não correção do pH é a possibilidade de uso de coagulantes em comunidades isoladas, localidades nas quais tal operação pode não ser operacionalmente

Tabela 2 – Eficiência da remoção da turbidez (%) após 60 minutos de sedimentação.

Turbidez água bruta = 200 a 254 NTU		Turbidez água bruta = 40 a 100 NTU	
<i>M. oleifera</i> + <i>A. vera</i> (mg L ⁻¹)	Eficiência (%)	<i>M. oleifera</i> + <i>A. vera</i> (mg L ⁻¹)	Eficiência (%)
50 + 0	95,0	500 + 0	93,5
50 + 200	97,7	500 + 200	92,6
50 + 400	97,6	500 + 400	89,8
100 + 0	98,0	0 + 200	32,3
100 + 200	98,4	0 + 400	32,0
100 + 400	98,1		
0 + 400	48,6		

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

viável pela indisponibilidade de reagentes, custos e limitações técnicas.

Porém, considerando que com o uso apenas da *A. vera* Hadadi *et al.* (2022) obtiveram bons resultados nessa faixa de pH com água sintética, mas Borri, Freire e Boina (2014) observaram limitações em pH neutro com água natural, é possível que características específicas da água do Rio Solimões tenham contribuído para a limitação do desempenho observado. Assim, sugere-se que estudos futuros avaliem o ajuste do pH para faixas mais alcalinas e/ou mais ácidas, bem como a otimização da dosagem, acompanhados de caracterização físico-química da água e medições de potencial zeta para elucidar os mecanismos de coagulação para essa matriz.

Redução de cor aparente

Os valores da cor aparente da água bruta permaneceram entre 194 e 212 mg Pt-Co/L para os ensaios com água bruta com turbidez entre 200 e 254 NTU. Nos ensaios com água bruta com valores de turbidez em faixas mais elevadas, a dosagem de 50 mg/L de *M. oleifera* isolada e combinada

com 200 mg/L de *A. vera* resultaram em residuais de cor aparente de 36,1 e 30,4 mg Pt-Co/L, respectivamente, após 60 minutos de sedimentação (Figura 5).

Já a combinação de 50 mg/L de *M. oleifera* e 400 mg/L de *A. vera* resultou no menor valor de cor aparente (15,4 mg Pt-Co/L), com desempenho melhor do que o observado para a dosagem de 100 mg/L de *M. oleifera* isolada ou combinada com *A. vera*, cujos valores de cor aparente permaneceram entre 17,5 e 19,6 mg Pt-Co/L. Com o uso da *A. vera* isolada, o valor médio observado para cor aparente após 60 minutos de sedimentação foi de 204,5 mg Pt-Co/L, o que demonstra que tal coagulante não foi capaz de promover a coagulação e formação de flocos.

Embora a turbidez da água bruta estivesse na faixa de 40 a 100 NTU, os valores de cor aparente observados para a água bruta permaneceram entre 203 e 218 mg Pt-Co/L. Mesmo com dosagem mais elevada de *M. oleifera* isolada ou combinada com *A. vera*, os valores residuais de cor aparente permaneceram entre 25,2 e 27,4 mg Pt-Co/L (Figura 6), o que corresponde a eficiências na faixa de 87% (Tabela 3). Eficiências ligeiramente superiores foram

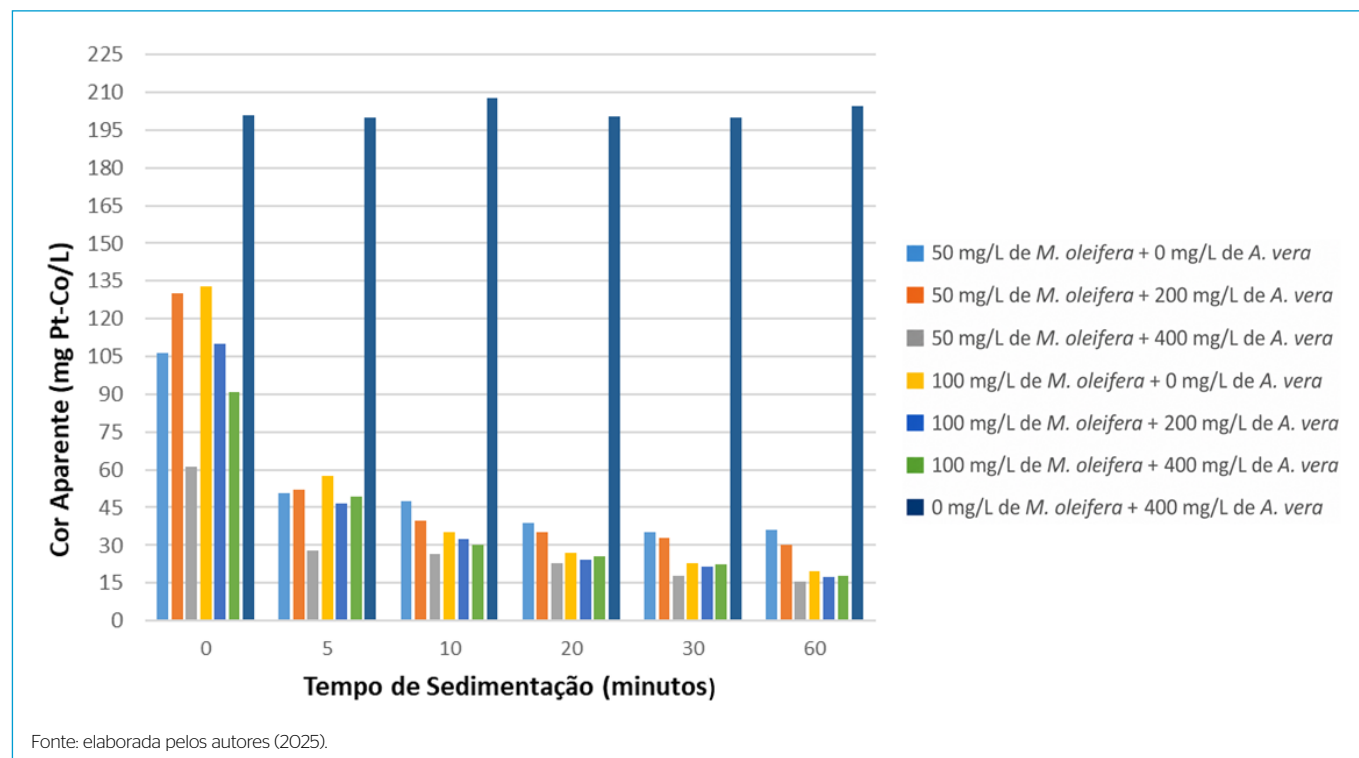


Figura 5 – Valores de cor aparente (mg Pt-Co/L) para as diferentes dosagens ao longo da sedimentação nos tratamentos realizados com água bruta na faixa de 200 a 254 NTU

observadas com dosagem de 100 mg/L de *M. oleifera* com e sem *A. vera* para a água bruta com valores de turbidez mais elevados, conforme a Tabela 3.

Já o uso isolado da *A. vera* resultou em elevados valores de cor aparente residual, 121 e 199 mg Pt-Co/L para as dosagens 200 e 400 mg/L, respectivamente. Para a dosagem de 200 mg/L a eficiência foi de 43,5%, enquanto na maior dosagem foi observada apenas 5,2% de eficiência.

Os resultados indicam que, embora a etapa de clarificação (coagulação, floculação e decantação) promova

reduções significativas de cor e turbidez, determinados valores residuais neste estudo permaneceram acima dos limites estabelecidos pela Portaria nº 888/2021 (Brasil, 2021) para água destinada ao consumo humano. Esse comportamento também foi observado por Bongiovani *et al.* (2016), que, ao utilizarem coagulante natural à base de tanino, obtiveram após a coagulação/floculação valores de cor aparente e turbidez superiores aos padrões de potabilidade. Somente após a etapa de filtração os autores verificaram a adequação da água tratada, com valores

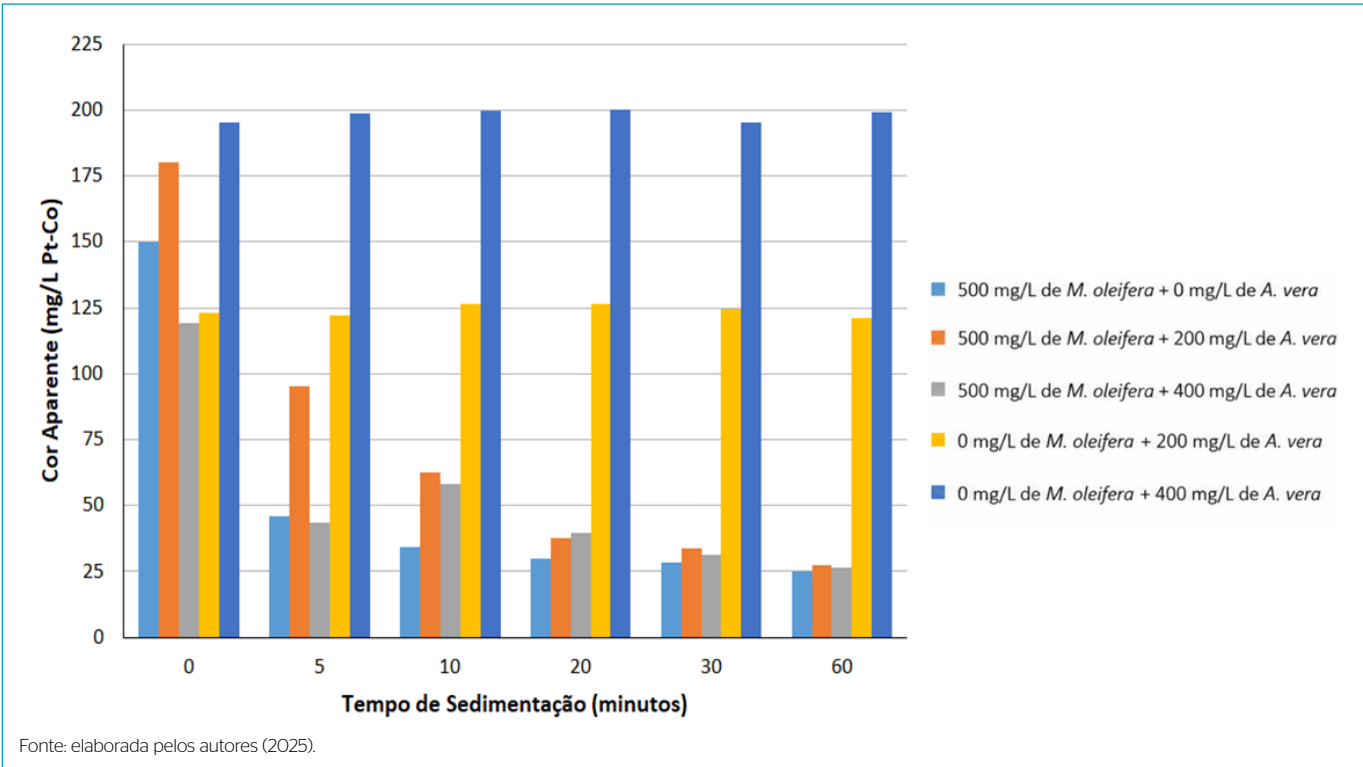


Figura 6 – Valores de cor aparente (mg Pt-Co/L) para as diferentes dosagens ao longo da sedimentação nos tratamentos realizados com água bruta na faixa de 40 a 100 NTU

Tabela 3 – Eficiência da remoção da cor aparente (%) após 60 minutos de sedimentação.

Turbidez água bruta = 200 a 254 NTU		Turbidez água bruta = 40 a 100 NTU	
M. oleifera + A. vera (mg L ⁻¹)	Eficiência (%)	M. oleifera + A. vera (mg L ⁻¹)	Eficiência (%)
50 + 0	82,9	500 + 0	87,9
50 + 200	84,9	500 + 200	87,2
50 + 400	92,7	500 + 400	86,9
100 + 0	90,6	0 + 200	43,5
100 + 200	91,1	0 + 400	5,2
100 + 400	90,9		
0 + 400	3,3		

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

reduzidos para 2,62 mg Pt-Co/L de cor e 0,46 NTU de turbidez. Esses resultados reforçam que a clarificação isolada nem sempre é suficiente para assegurar a conformidade com os padrões legais, sendo a filtração uma etapa fundamental para a garantia da qualidade final da água.

A partir dos dados analisados, foi possível notar que a *A. vera* não atuou como coagulante, visto que usada isoladamente, as eficiências foram baixas tanto para remoção de turbidez como de cor aparente. Entretanto, a atuação conjunta com a *M. oleifera* em algumas combinações de dosagens foi responsável por discretas reduções de turbidez e cor aparente ao longo da sedimentação, sugerindo atuação da *A. vera* como um polímero auxiliar. Gaikwad e Munavalli (2019) constataram que a *A. vera* atua como agente auxiliar no processo de coagulação.

Enquanto a literatura atribui a capacidade coagulante da *M. oleifera* à presença de proteínas catiônicas hidrossolúveis (Al-Jadabi *et al.*, 2023; Gassenschmidt *et al.*, 1995; Santos *et al.*, 2009), com o principal mecanismo de coagulação sendo adsorção e neutralização de cargas (Ndabigengesere; Narasiah; Talbot, 1995), para a *A. vera* ainda há lacunas nesse sentido. Grupos funcionais responsáveis por ligações de hidrogênio intermoleculares e presença de grupos CH₃, responsáveis pela adsorção, podem ser responsáveis pela capacidade coagulante da *A. vera* (Benalia *et al.*, 2022). A presença de polissacarídeos e de ácidos poligalacturônicos na *A. vera* contribui para a formação e o crescimento dos flocos (Darkun *et al.*,

2024), reforçando a possibilidade de que a ação da *A. vera* é como um polímero auxiliar.

Além de uma melhor compreensão dos mecanismos de coagulação, considerando os resultados desta pesquisa, sugere-se mais investigações para compreender a influência do pH da água bruta e do método de preparo da solução de *A. vera*, como secagem da planta e obtenção de pó ou obtenção direta por processamento da planta *in natura*, no desempenho de tal coagulante.

CONCLUSÕES

A *M. oleifera*, utilizada isoladamente ou combinada com *A. vera*, apresentou elevado desempenho nos processos de coagulação e floculação, resultando em eficiência de remoção de turbidez superior a 90%. A associação entre os coagulantes proporcionou algum ganho em relação ao uso isolado da *M. oleifera* apenas em determinadas combinações de dosagens. Já a aplicação isolada de *A. vera* não apresentou desempenho satisfatório na formação de flocos e na clarificação da água. Assim, os dados deste estudo sugerem que, em determinadas combinações de dosagem, a *A. vera* atuou como um polímero auxiliar. É possível que os valores de pH da água bruta tenham desfavorecido o uso da *A. vera*. Assim, recomendam-se investigações que avaliem influência do pH, além da contribuição da etapa de filtração e dos métodos de preparo do extrato de *A. vera*, de modo a otimizar o uso combinado desses coagulantes naturais em diferentes condições sazonais do Rio Solimões.

REFERÊNCIAS

AL-JADABI, Naif; LAAOUAN, Mohamed; EL HAJJAJI, Souad; MABROUKI, Jamal; BENBOUZID, Maria; DHIBA, Driss. The dual performance of *M. oleifera* seeds as eco-friendly natural coagulant and as an antimicrobial for wastewater treatment: a review. *Sustainability*, v. 15, n. 5, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15054280>

AMORIM, Ana Clara Coli de; OLIVEIRA, Danieli Soares de. Utilização de Aloe vera para tratamento de água como alternativa ao uso de produtos químicos. In: IV Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia. *Anais...* Diamantina, 2023. <https://doi.org/10.29327/1298891.4-17>

ANG, Wei Lun; MOHAMMAD, Abdul Wahab. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, v. 262, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012. 1516 p.

BAPTISTA, Aline Takaoka Alves; COLDEBELLA, Priscila Ferri; CARDINES, Pedro Henrique Freitas; GOMES, Raquel Guttierres;

VIEIRA, Marcelo Fernandes; BERGAMASCO, Rosângela; VIEIRA, Angélica Marquetotti Salcedo. Coagulation-flocculation process with ultrafiltered saline extract of *Moringa oleifera* for the treatment of surface water. **Chemical Engineering Journal**, v. 276, p. 166-173, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.045>

BENALIA, Abderrezzaq; DERBAL, Kerroum; KHALFAOUI, Amel; PIZZI, Antonio; MEDJAHDI, Ghouti. The use of *Aloe Vera* as natural coagulant in Algerian drinking water treatment plant. **Journal of Renewable Materials**, v. 10, n. 3, p. 625-637, 2022. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017848>

BENALIA, Abderrezzaq; BAATACHE, Ouiem; DERBAL, Kerroum; KHALFAOUI, Amel; AMROUCI, Zahra; PIZZI, Antonio; PANICO, Antonio. The use of central composite design (CCD) to optimize and model the coagulation-flocculation process using a natural coagulant: Application in jar test and semi-industrial scale. **Journal of Water Process Engineering**, v. 57, 104704, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104704>

BONGIOVANI, Milene Carvalho; CAMACHO, Franciele Pereira; COLDEBELLA, Priscila Ferri; VALVERDE, Karina Cardoso; NISHI, Letícia; BERGAMASCO, Rosângela. Removal of natural organic matter and trihalomethane minimization by coagulation/flocculation/filtration using a natural tannin. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 12, p. 5406-5415, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1006260>

BORRI, Rodrigo Babora; FREIRE, Rosane; BOINA, Welliton Leandro de Oliveira. Remoção da turbidez da água usando Aloe vera como coagulante natural. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v.10, n. 12, 2014. <https://doi.org/10.17271/1980082710.122014857>

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece 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**: seção 1, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 10 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Programa Nacional de Saneamento Rural**. Brasília: Funasa, 2019. 260 p. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/MNL_PNSR_2019.pdf/08d94216-fb09-468e-ac98-afb4ed0483eb. Acesso em: 10 jan. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera as Leis nº 9.984/2000, nº 10.768/2003, nº 11.107/2005, e nº 11.445/2007. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 10 jan. 2025.

www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 10 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2021. Edição 85, p. 127.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Saúde Indígena. **Plano Distrital de Saúde Indígena - Distrito Sanitário Especial Indígena Vale do Javari - 2024-2027**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/sesai/planos-distritais-2024-2027/plano-distrital-vale-do-javari>. Acesso em: 10 jan. 2025.

CAMACHO, Franciele Pereira; SOUSA, Vânia Serrão; BERGAMASCO, Rosângela; TEIXEIRA, Margarida Ribau. The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 313, p. 226-237, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.031>

DENG, Yang. Making Waves: Principles for the Design of Sustainable Household Water Treatment. **Water Research**, v. 198, 117151, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117151>

DARKUN, Kholil; MULYAWATI, Ira; FEBRINA, Laila; PATULAK, Asriana. The Influence of Aloe Vera Biocoagulant and Mixing Time in Reducing Biological Oxygen Demand, Chemical Oxygen Demand and Total Suspended Solids Levels. **Environmental Research, Engineering and Management**, v. 80, n. 3, p. 149-161, 2024. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.80.3.35873>

GAIKWAD, Vitthal T.; MUNAVALLI, Guru. R. Turbidity removal by conventional and ballasted coagulation with natural coagulants. **Applied Water Science**, v. 9, n. 130, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1009-6>

GANDIWA, Bruce I.; MOYO, Langa Bright; NCUBE, Sokesimbone; MAMVURA, Tirivaviri Augustine; MGUNI, Liberty Lungisani; HLABANGANA, Nkosikhona. Optimisation of using a blend of plant-based natural and synthetic coagulants for water treatment: (*Moringa oleifera*-*Cactus Opuntia*-alum blend). **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 34, p. 158-164, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.07.005>

GASSENSCHMIDT, Ursula; JANY, Klaus D.; BERNHARD, Tauscher; NIEBERGALL, Heinz. Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects**, v. 1243, n. 3, p. 477-481, 1995. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(94\)00176-X](https://doi.org/10.1016/0304-4165(94)00176-X)

HADADI, Amina; IMESSAOUDENE, Ali; BOLLINGER, Jean-Claude; ASSADI, Aymen Amine; AMRANE, Abdeltif; MOUNI, Lotfi.

Comparison of four plant-based bio-coagulants performances against alum and ferric chloride in the turbidity improvement of bentonite synthetic water. **Water**, v. 14, n. 20, p. 3324, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14203324>

KENEA, Daniel; DENEKEW, Tibebe; BULTI, Rahel; OLANI, Bilise; TEMESGEN, Deme; SEFIW, Dawit; BEYENE, Dejene; EBBA, Million; MEKONIN, Wendesen. Investigation on surface water treatment using blended *Moringa oleifera* seed and *Aloe vera* plants as natural coagulants. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 45, p. 294-304, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.06.005>

MARTINS, Gabrielly Gomes; OLIVEIRA, Danieli Soares de. Avaliação do uso de coagulante natural à base de *Aloe vera* como alternativa no tratamento de água para remoção de turbidez. In: **Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SILUBESA)**, 2023.

MURRAY, Paul M.; ROSE, Shanomae; OSBORNE, Chetwynd. Exploring the coagulant capability of *Moringa oleifera* seed powder at reducing turbidity in gold mine tailings slurry. **Journal of Academic Research and Essays**. 2022. <https://doi.org/10.52377/TYBQ5506>

NDABIGENGESERE, Anselme; NARASIAH, K. Subba; TALBOT, Brian G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v. 29, n. 2, p. 703-710, 1995. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y)

NDABIGENGESERE, Anselme; NARASIAH, Subba. Influence of Operating Parameters on Turbidity Removal by Coagulation with *Moringa Oleifera* Seeds. **Environmental Technology**, v. 17, p. 1103-1112, 2010. <https://doi.org/10.1080/09593331708616479>

NHUT, Huynh Tan; HUNG, Tri Quang Hung; LAP, Bui Quoc; HAN, Le Thi Ngoc; TRI, Tran Quoc; BANG, Nguyen Hoang Kim; HIEP, Nguyen Thi; KY, Nguyen Minh. Use of *Moringa oleifera* seeds powder as bio-

coagulants for the surface water treatment. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 18, n. 8, p. 2173-218, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02935-2>

RODRIGUES, Andriane de Melo; AQUINO, Davi Santiago; CORDEIRO, Lilian Lopes. Avaliação de *Aloe arborescens* como coagulante para remoção de cor e turbidez em tratamento convencional de água. **Ingeniería del Agua**, v. 24, n. 2, p. 81-88, 2020. <https://doi.org/10.4995/ia.2020.11562>

SALEEM, Mussarat; BACHMANN, Robert Thomas. A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 72, p. 281-297, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.12.029>

SANTOS, Andréa F. S.; LUZ, Luciana A.; ARGOLO, Adriana C. C.; TEIXEIRA, José A.; PAIVA, Patrícia M. G.; COELHO, Luana C. B. B. Isolation of a seed coagulant *Moringa oleifera* lectin. **Process biochemistry**, v. 44, n. 4, p. 504-508, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.01.002>

SOUZA, H. K. S. **Utilização da semente, casca e vagem da *Moringa oleifera* Lam no processo de biossorção para remoção de Diuron de águas contaminadas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

TRIGUEROS, Daniela E. G.; HINTERHOLZ, Camila L.; FAGUNDES-KLEN, Márcia R.; VEIT, M.T.; FORMENTINI-SCHMITT, Dalila M. Statistical evaluation of the coagulation-flocculation process by using *Moringa oleifera* seeds extract to reduce dairy industry wastewater turbidity. **Bioresource Technology Reports**, v. 23, 101579, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101579>

YIN, Chun-Yang. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. **Process Biochemistry**, v. 45, n. 9, p. 1437-1444, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030>