Universidade do Estado do Pará
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
Curso de Doutorado em Ciências Ambientais



Carlos José Capela Bispo

Análise de Metais Pesados em Águas Amazônicas na Região Insular de Belém-PA

Belém
2025

Universidade do Estado do Pará
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
Curso de Doutorado em Ciências Ambientais



Carlos José Capela Bispo

Análise de Metais Pesados em Águas Amazônicas na Região Insular de Belém-PA

Belém
2025

Carlos José Capela Bispo

Análise de Metais Pesados em Águas Amazônicas na Região Insular de Belém-PA

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.
Universidade do Estado do Pará.
Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Hebe Morganne Campos Ribeiro

Belém
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP),
Biblioteca do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, UEPA, Belém - PA.

B622a Bispo, Carlos José Capela

Análise de metais pesados em águas amazônicas na região insular de Belém-PA. / Carlos José Capela Bispo; Orientadora Hebe Morganne Campos Ribeiro. -- Belém, 2025.
72 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Belém, 2025.

1. Água - Poluição - Ilha do Cumbu (PA). 2. Água - Impacto ambiental - Ilha do Cumbu (PA). 3. Água - Controle de qualidade. 4. Recursos hídricos - Desenvolvimento. I. Ribeiro, Hebe Morganne Campos. II. Título.

CDD 628.168

Carlos José Capela Bispo

Análise de Metais Pesados em Águas Amazônicas na Região Insular de Belém-PA

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.
Universidade do Estado do Pará.

Data da aprovação: 29/10/2025

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br
HEBE MORGANNE CAMPOS RIBEIRO
Data: 29/10/2025 21:40:34-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – Orientadora
Profa. Dra. Hebe Morganne Campos Ribeiro
Doutora em Engenharia Elétrica
Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br
EDER SILVA DE OLIVEIRA
Data: 30/10/2025 09:08:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – 1º Examinador
Prof. Dr. Eder Silva de Oliveira
Doutor em Agronomia
Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br
ELIANE DE CASTRO COUTINHO
Data: 29/10/2025 21:59:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – 2º Examinadora
Profa. Dra. Eliane de Castro Coutinho
Doutora em Ciências Ambientais
Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br
AILSON RENAN SANTOS PICANCO
Data: 30/10/2025 07:40:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – 3º Examinador
Prof. Dr. Ailson Renan Santos Picanço
Doutor em Pesquisa Operacional
Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br
ELANE CRISTINA MELO LEMOS
Data: 30/10/2025 10:26:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – 4º Examinadora
Profa. Dra. Elane Cristina Melo Lemos
Doutora em Ciências Ambientais
Centro Universitário UNIFAMAZ

Aos meus pais, José Carlos e Maria de Fátima, pelo apoio durante todos os anos de minha vida. A minha irmã, Cláudia e meus sobrinhos, Vinícius e Victor, razão de toda essa vitória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e a Nossa Senhora, pelo dom da vida, por sempre guiar meus caminhos e pelas bençãos concedidas;

Agradeço aos meus pais, José e Fátima, pelo amor, cuidado, apoio, paciência e educação e por entender as escolhas de vida. São os motivos dessa vitória;

Agradeço a minha irmã Cláudia, meu cunhado Flávio e aos meus sobrinhos Vinícius e Victor, por acompanharem esse trajeto e por entenderem muito da minha ausência;

Agradeço a "irmã", Magali Rosário, pelo carinho e cuidado com meus (nossos) pais, pessoa fundamental para que essa vitória se concretizasse;

Agradeço a minha Orientadora e amiga, Profa. Hebe Morganne, pela coragem, por entender, apoiar e contribuir com os ensinamentos para que esta pesquisa fosse possível, assim como a frente da coordenação do LabÁgua;

Agradeço ao Prof. Eder Oliveira, pelo aprendizado na validação dos dados e nas discussões enriquecedoras na construção dos artigos;

Agradeço aos amigos(as), me permitam chamar assim, que me ajudaram direta e indiretamente na finalização desta pesquisa, Vera Palácios, Valdete Garcia, Renata Loureiro, Èrika Gonçalves, Elisabete Barata; Gleicy Paes, Rayanne Oliveira, Hyago Souza, Elane Lemos, Silvia Silva, Simone Galdino, Antônio Pereira, Eliane Coutinho, Rosângela Gouveia, Maria Boulhosa;

Agradeço a todos(as) os(as) professores(as) e servidores(as) do PPGCA-UEPA, pelas orientações, ensinamentos em sala de aula, e aos que participaram das bancas de seminários e qualificação;

Agradeço aos servidores(as) e estagiários(as) do Laboratório de Qualidade de Água da Amazônia (LabÁgua), pela estrutura, ensinamentos e parcerias de trabalho;

Agradeço ao Corpo de Bombeiros Militar do Pará, pelo apoio logístico nas campanhas de coleta de águas na ilha do Combu;

Agradeço a Universidade do Estado do Pará (UEPA), pela infraestrutura oferecida e bolsa de pesquisa concedida.

Muito Obrigado!

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King

Análise de Metais Pesados em Águas Amazônicas na Região Insular de Belém-PA

RESUMO

A crescente pressão antrópica sobre os ecossistemas aquáticos amazônicos tem comprometido a qualidade das águas superficiais, especialmente em regiões urbanas e de transição entre áreas naturais e antropizadas, como a Área de Proteção Ambiental (APA) Ilha do Combu, no município de Belém (PA). Na perspectiva de conhecer o cenário na região, realizou-se uma revisão sistemática da literatura sobre a presença de metais pesados em rios da Amazônia paraense, com o intuito de entender a evolução da contaminação por metais e seus impactos sobre a qualidade da água, os ecossistemas e a saúde pública. Para um melhor entendimento do atual cenário foi implementado uma abordagem descritiva e qualiquantitativa, analisando artigos publicados entre 2005 e 2023 que apresentavam evidências sólidas conforme as Resoluções CONAMA nº 274/2000 e 357/2005 e a Portaria nº 888/2021. Os resultados demonstraram elevadas concentrações de Pb, Cu, As, Cd, Cr e Hg, com destaque para Pb e Hg, identificados em 60% dos estudos. Considerando a necessidade de avaliar as concentrações de metais pesados nas águas superficiais do rio Guamá, na APA Ilha do Combu, em Belém (PA), uma região sujeita a pressões urbanas e turísticas, foram coletadas amostras de água (triplicata) em 9 (nove) pontos distintos em toda ilha, durante um período de mais chuvas (junho/2023) e outro de menos precipitações (maio/2024), sendo analisadas por espectrometria de emissão atômica com plasma induzido (ICP-OES) para 9 (nove) metais (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn). A qualidade da água (sete parâmetros físico-químicos) foi avaliada pelo Índice de Qualidade da Água do CCME, adaptado à Resolução CONAMA nº 357/2005. Analisando os parâmetros físico-químicos conjuntamente com teores de metais, baseado nos protocolos da CETESB e APHA. Os resultados revelaram variações temporais significativas, com aumento da concentração de metais no período menos chuvoso (2024), e os parâmetros físico-químicos fora dos limites da Resolução CONAMA nº 357/2005. As análises estatísticas indicaram correlações fortes entre turbidez, cor, condutividade e metais, e correlações negativas com oxigênio dissolvido. Todos os pontos apresentaram qualidade classificada como “ruim”, com Al, Fe e Mn, acima dos limites legais, especialmente no período menos chuvoso. A contaminação foi atribuída a fatores naturais e antrópicos, como saneamento precário e turismo não regulamentado. Os resultados indicam risco ecológico e necessidade de gestão e monitoramento ambiental contínuos. A pesquisa evidencia a influência de fatores temporais e antrópicos na qualidade da água, destacando o furo do Combu (Ponto 3) como o trecho mais impactado. O estudo é original ao relacionar parâmetros físico-químicos e teores de metais a variações hidrológicas na região amazônica. Observou-se que o desenvolvimento industrial, agrícola e urbano tem intensificado a degradação dos recursos hídricos. O trabalho reforça a importância socioambiental do monitoramento contínuo e contribui para o entendimento da relação entre o uso do solo e a contaminação das águas superficiais por metais pesados.

Palavras-chave: Qualidade da água; Águas Superficiais; Ilha do Combu; Metais Traços; Monitoramento ambiental.

Analysis of Heavy Metals in Amazonian Waters in the Insular Region of Belém, Pará

ABSTRACT

The increasing anthropogenic pressure on Amazonian aquatic ecosystems has compromised the quality of surface waters, particularly in urban and transitional areas between natural and human-modified environments, such as the Environmental Protection Area (APA) Ilha do Combu, in the municipality of Belém (PA), northern Brazil. To understand the environmental scenario in this region, a systematic literature review was conducted on the occurrence of heavy metals in rivers of the Pará Amazon, aiming to assess the evolution of metal contamination and its impacts on water quality, ecosystems, and public health. To better characterize the current situation, a descriptive and quali-quantitative approach was implemented, analyzing studies published between 2005 and 2023 that presented robust evidence according to CONAMA Resolutions No. 274/2000 and 357/2005, and Ordinance No. 888/2021. The results revealed high concentrations of Pb, Cu, As, Cd, Cr, and Hg, with Pb and Hg identified in 60% of the reviewed studies. Considering the need to assess heavy metal concentrations in the surface waters of the Guamá River within the APA Ilha do Combu, a region subject to urban and tourism pressures, water samples (in triplicate) were collected from nine (9) distinct points across the island during the rainy (June 2023) and dry (May 2024) seasons. The samples were analyzed for nine (9) metals (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn) using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Water quality (seven physicochemical parameters) was evaluated using the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME-WQI), adapted to CONAMA Resolution No. 357/2005. The integration of physicochemical parameters with metal concentrations, based on CETESB and APHA. The results revealed significant temporal variations, with increased metal concentrations during the dry period (2024) and several physicochemical parameters exceeding the limits established by CONAMA Resolution No. 357/2005. Statistical analyses indicated strong correlations between turbidity, color, conductivity, and metal concentrations, and negative correlations with dissolved oxygen. All sampling points were classified as having “poor” water quality, with Al, Fe, and Mn exceeding legal limits, particularly during the dry season. Contamination sources were attributed to both natural and anthropogenic factors, such as inadequate sanitation and unregulated tourism. The results indicate ecological risks and highlight the urgent need for continuous environmental monitoring and management. The research demonstrates the influence of temporal and anthropogenic factors on water quality, identifying the Combu Channel. (Sampling Point 3) as the most impacted area. This study is original in correlating physicochemical parameters and metal concentrations with hydrological variations in the Amazon region. It was observed that industrial, agricultural, and urban development have intensified the degradation of water resources. The findings reinforce the socio-environmental importance of continuous monitoring and contribute to understanding the relationship between land use and surface water contamination by heavy metals.

Keywords: Water Quality; Surface Waters; Combu Island; Trace Metals; Environmental Monitoring.

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO (GERAL)**	11
1.2	REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO (GERAL)	13
2	**ARTIGO 1**	15
	Metais Pesados em Águas Superficiais em um Estado da Amazônia Brasileira: Uma Revisão Integrativa	
	RESUMO	16
	ABSTRACT	17
2.2	INTRODUÇÃO	18
2.3	MATERIAL E MÉTODOS	19
2.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
2.5	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS	29
3	**ARTIGO 2**	34
	Análise de Concentrações de Metais Pesados em uma Unidade de Conserva da Região Amazônica, em Região Insular de Belém, Pará, Brasil	
	RESUMO	36
	ABSTRACT	37
3.2	INTRODUÇÃO	38
3.3	MATERIAL E MÉTODOS	39
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
3.5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	48
4	**ARTIGO 3**	52
	Águas da Amazônia Oriental: Análise Físico-Química e de Metais no Rio Guamá, APA Ilha do Combu (Belém, Pará, Brasil)	
	RESUMO	53
	ABSTRACT	53
4.2	INTRODUÇÃO	54
4.3	MATERIAL E MÉTODOS	55
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.5	CONCLUSÃO	66
4.6	REFERÊNCIAS	67
5	**CONCLUSÃO GERAL**	71

1 INTRODUÇÃO GERAL

A água doce é um recurso natural indispensável para a manutenção da vida e o equilíbrio ecológico, sendo vital para os ecossistemas aquáticos, o bem-estar humano e o desenvolvimento das sociedades (Bawra, Pawar, 2023). No entanto, sua qualidade tem sido gravemente impactada pelas crescentes pressões antropogênicas, como o aumento da população, a urbanização, a industrialização e as mudanças nos padrões de uso da terra (Mukherjee, 2023).

No Brasil, a Amazônia se caracteriza como uma região que se destaca no contexto da disponibilidade hídrica mundial, abrigando uma das maiores reservas de água doce do planeta (Duarte, Val, 2020; Cardozo, Diniz, Szlafsztein, 2022). Entretanto, esse patrimônio encontra-se ameaçado por atividades humanas que modificam a dinâmica natural dos corpos d'água, especialmente em áreas periurbanas (Mikkola, 2024).

Considerando a função de suporte que a água doce fornece na sustentação de ecossistemas, agricultura, indústria, dessedentação de animais e do consumo humano, a gestão sustentável dos recursos hídricos é indispensável tanto para o meio ambiente, quanto para a economia e para a sociedade (Srivastava, Sahgal, 2023). Para que a água esteja em condições adequadas, é fundamental que os parâmetros se enquadrem dentro dos critérios da legislação (Collares, 2021)

O monitoramento contínuo da qualidade da água e a adoção de práticas de manejo sustentável deste recurso se tornam ações fundamentais para identificar os níveis e fontes de poluição, permitindo intervenções oportunas e mitigando os impactos causados (Sudan et al., 2024; Silva, Correia, Correia, 2025). O monitoramento permite identificar, entre outros aspectos, os níveis de poluição e a presença de metais pesados nos recursos hídricos (Sbai et al., 2024).

O monitoramento da qualidade da água auxilia ainda na avaliação da contaminação causada pela urbanização, industrialização e atividades antrópicas, permitindo a verificação da conformidade com os limites permitidos estabelecidos por legislações ambientais (Roy, Bhunia e Bandyopadhyay, 2024). A avaliação da qualidade da água pode ser realizada por meio de parâmetros físico-químicos que fornecem informações sobre o estado ambiental dos corpos hídricos (Chaudhary, Dwivedi, 2024).

Entre os poluentes que podem causar alterações na qualidade da água, destaca-se os metais pesados que não são facilmente degradáveis, se acumulam no meio ambiente e podem

atingir níveis tóxicos nos organismos vivos (Raghav et al., 2022). Elementos metálicos como o arsênio (As), o cádmio (Cd), o chumbo (Pb), o mercúrio (Hg), o crómio (Cr) e o níquel (Ni), possuem elevada densidade, e mesmo em baixas concentrações, podem gerar efeitos tóxicos significativos, interferindo em funções vitais de organismos e entrando na cadeia alimentar humana (Angon et al., 2024; Goswami, 2024). As fontes de poluição incluem descargas industriais, escoamento agrícola, mineração e esgoto não tratado (Singh, 2022).

A região metropolitana de Belém, no estado do Pará, representa um exemplo desse cenário, em que rios e igarapés sofrem influência tanto das condições naturais de sazonalidade quanto da pressão demográfica e econômica (Dutra et al., 2022). Apesar de estar em uma região rica em água doce, o processo de urbanização ameaça a disponibilidade e a qualidade desses recursos hídricos (Carvalho, Rocha, 2020). Com isso, áreas protegidas adquirem relevância por funcionarem como espaços de uso sustentável e de conservação ambiental, como é o caso da Ilha do Combu, situada às margens do rio Guamá (Virtanen, 2020; Nogueira et al., 2023).

A Ilha do Combu, está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) Combu e apresenta um ambiente de várzea característico da Amazônia, onde comunidades ribeirinhas mantêm uma estreita relação com a água (Figueredo, 2023).

Dessa forma, a pesquisa tem como objetivo geral, avaliar a qualidade da água a partir de parâmetros físico-químicos, e investigar a presença de metais pesados potencialmente tóxicos, em relação aos limites estabelecidos pelas Resolução de nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), nas águas superficiais no trecho do rio Guamá inserido na APA ilha do Combu, uma Unidade de Conservação (UC) classificada como de Uso Sustentável.

Considerando os objetivos específicos, foi realizado uma revisão sistemática da literatura sobre a ocorrência de metais pesados e traços em rios da Amazônia paraense, abrangendo o período de 2005 a 2023, de modo a sintetizar o conhecimento disponível nos principais acervos científicos; assim como, analisar as concentrações desses metais nas águas superficiais do rio Guamá, em trecho inserido na Área de Proteção Ambiental (APA) da Ilha do Combu, no estado do Pará, onde vivem diversas comunidades ribeirinhas; e, por fim, avaliar a qualidade da água nessa região com base em parâmetros físico-químicos e nos teores de metais determinados.

1.2 REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO (GERAL)

ANGON, P. B.; ISLAM, M. S.; KC, S.; DAS, A.; ANJUM, N.; POUDEL, A.; SUCHI, S. A. *Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. Heliyon*, 2024.

BAWRA, B.; PAWAR, M. *Mudanças na gestão e governança de sistemas de água doce.* In: IGI GLOBAL. *[S.l.]: IGI Global*, 2023. p. 1–21.

CARDOZO, M. L.; DINIZ, M. B.; SZLAFSZTEIN, C. F. *Os serviços ecossistêmicos dos recursos hídricos da Bacia Amazônica como bens públicos globais. Agua y Territorio*, n. 21, 24 jun. 2022.

CARVALHO, A. C. L.; ROCHA, G. de M. *Análise dos riscos e da vulnerabilidade socioambiental urbana, face ao desenvolvimento desordenado e à pressão aos recursos hídricos em Belém – PA / Analysis of urban socio-environmental risks and vulnerability, in the face of disordered development and pressure on water resources in Belém-PA*. v. 6, n. 4, p. 18127–18142, 2020.

CHAUDHARY, A.; DWIVEDI, A. *Instrumental testing of quality of water. [S.l.: s.n.]*, 2024. p. 417–439.

COLLARES, M. F. A.; SILVA, L. F.; BARBOSA, R. B. G.; DOURADO, A. C. C.; REZENDE, B. N.; NASCIMENTO, J. A. C. Avaliação da qualidade da água do Rio Pardo (MG) com base em parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 10, n. 5, 2021.

DUARTE, R. M.; VAL, A. L. *Water-related problem with special reference to global climate change in Brazil.* In: *Water Conservation and Wastewater Treatment in BRICS Nations.* [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 3–21.

DUTRA, V. A. B. et al. *Anthropogenic environmental pressures in urban conservation units: a case study in Belém, Brazilian eastern Amazon. International Journal of Hydrology*, v. 6, n. 3, p. 131–139, 27 jun. 2022.

FIGUEREDO, N. *Marges i moviment: entre l'urbà i el ribeirinho en una ciutat amazònica. Etnografia i arquitectures de mobilitat a l'illa de Combu (Belém). Quaderns-e. Quaderns de l'Institut Català d'Antropologia*, 24 out. 2023.

GOSWAMI, B. *Heavy metals in soil and their impact on plant health: a contamination study. International Journal of Agrochemistry*, v. 10, n. 2, p. 7–12, 2024.

MIKKOLA, H. (Ed.). *Amazon Ecosystem—Past Discoveries and Future Prospects.* [S.l.]: BoD – Books on Demand, 2024.

MUKHERJEE, S. et al. *Aquatic eco-systems under influence of climate change and anthropogenic activities: potential threats and its mitigation strategies.* In: *Hydrogeochemistry of Aquatic Ecosystems. [S.l.: s.n.]*, 2023. p. 307–331.

NOGUEIRA, L. F. O. et al. *Paisagens fluviais na cidade de Belém-Pará-Brasil: uma análise da dinâmica hidrográfica. Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 2023.

RAGHAV, N.; SHARMA, S.; SINGH, P. et al. *A comprehensive case review of microbial remediation of heavy metals and pesticides in Yamuna River. The Applied Biology & Chemistry Journal*, p. 11–33, 2022. Disponível em: http://www.theabcjournal.com/index.php/tabcj/article/download/36/30. Acesso em: 11 jun. 2025.

ROY, B.; BHUNIA, B.; BANDYOPADHYAY, T. K. et al. *Water pollution by heavy metals and their impact on human health. [S.l.: s.n.]*, 2024. p. 333–352.

SBAI, K. et al. *Assessment of heavy metal pollution in groundwater using a multivariate analysis approach. Journal of Water and Land Development*, p. 175–182, 12 jun. 2024.

SILVA, N. J. A.; CORREIA, V. M. S.; CORREIA, M. L. V. *Impacts of anthropogenic actions on Açude do Saco: diagnosis for environmental preservation and recovery. RGSA: Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 19, n. 1, p. e010870, 21 jan. 2025.

SINGH, A. et al. *Heavy metal contamination of water and their toxic effect on living organisms. [S.l.]: IntechOpen eBooks*, 2022. Disponível em: https://www.intechopen.com/citation-pdf-url/82246. Acesso em: 8 jun. 2025.

SRIVASTAVA, P. S.; SAHGAL, M. *Freshwater pollution: overview, prevention, and control. [S.l.: s.n.]*, 2023. p. 359–365.

SUDAN, A. et al. *Impact of water pollution & perspective techniques to mitigate it. [S.l.: s.n.]*, 2024. p. 29–64.

VIRTANEN, K. *Áreas protegidas e urbanização: o caso da APA da Ilha do Combu, Belém (PA)*. v. 35, n. 2, 30 dez. 2020.

ARTIGO 1

METAIS PESADOS EM ÁGUAS SUPERFICIAIS EM UM ESTADO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

HEAVY METALS IN SURFACE WATERS IN A STATE OF THE BRAZILIAN AMAZON: AN INTEGRATIVE REVIEW

RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental
ISSN: 1981-982X
Submission date: 02/27/2024
Acceptance date: 04/26/2024
DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n6-102
Organization: Interinstitutional Scientific Committee
Chief Editor: Éverton Hillig
Assessment: Double Blind Review pelo SEER/OJS

METAIS PESADOS EM ÁGUAS SUPERFICIAIS EM UM ESTADO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

Carlos José Capela Bispo[1]
Hebe Morganne Campos Ribeiro[2]
Eder Silva de Oliveira[3]
Hyago Elias Nascimento Souza[4]
Elane Cristina Melo Lemos[5]
Marcelo Coelho Simões[6]

RESUMO

Objetivo: Buscou-se realizar uma revisão sistemática de literatura sobre estudos de metais pesados (traços) em rios da Amazônia paraense.

Referencial Teórico: Dispor do entendimento cronológico da situação da possível contaminação por metais traços, afetando a qualidade da água da Amazônia, impactando ecossistemas e a saúde pública. O desenvolvimento industrial, agrícola e urbano tem impactado negativamente os rios paraenses, contribuindo para a degradação dos recursos hídricos.

Método: Trata-se de uma investigação de revisão, de abordagem descritiva, qualiquantitativa, por meio de buscas literárias (descritores) de pesquisas realizadas no Estado do Pará, publicados entre 2005 e 2023. Foi considerado artigos com evidências sólidas, de acordo com os parâmetros preconizados pelas resoluções 274/2000 e 357/2005 e a portaria 888/2021 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, expressando os resultados através estatística descritiva.

Resultados e Discussão: Foi possível demonstrar os principais impactos ambientais de fontes poluentes e contaminantes em rios da Amazônia paraense, como grandes concentrações de Pb, Cu, As, Cd, Cr, e Hg, com destaque para Pb e Hg, presente em 60% dos estudos realizados em diferentes ambientes aquáticos nos últimos 20 anos no estado do Pará.

Implicações da Pesquisa: Contribui para visualizar as poucas pesquisas realizadas na Amazônia paraense, assim como possibilita um melhor entendimento do uso do solo da região correlacionando com a contaminação das águas superficiais por metais pesados.

Originalidade/Valor: Apresenta importância socioambiental e científico, por proporcionar um maior entendimento do nível de contaminação e frequência de metais pesados nas águas superficiais do estado do Pará.

Palavras-chave: Qualidade da Água, Recursos Hídricos, Metais Traços, Contaminação, Amazônia.

[1] Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: capela@uepa.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2399-3140
[2] Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: hebemcr@uepa.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7154-9947
[3] Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: ederso@uepa.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2560-2214
[4] Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
E-mail: eng.hyagosouza@gmail.com Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8765-2981
[5] Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: derriseliptica@yahoo.com.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4468-7276
[6] Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: marcelo.uepa14@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6764-1126

HEAVY METALS IN SURFACE WATERS IN A STATE OF THE BRAZILIAN AMAZON: AN INTEGRATIVE REVIEW

ABSTRACT

Objective: The aim was to carry out a systematic literature review on studies and research into heavy metals (traces) in rivers in the Amazon region of Pará.

Theoretical Framework: To have a chronological understanding of the situation of possible contamination by trace metals, affecting the quality of water in the Amazon, impacting ecosystems and public health. Industrial, agricultural and urban development has had a negative impact on rivers in Pará, contributing to the degradation of water resources.

Method: This is a review, with a descriptive, qualitative and quantitative approach, using literature searches (descriptors) of research carried out in the state of Pará, published between 2005 and 2023. Articles with solid evidence were considered, in accordance with the parameters recommended by resolutions 274/2000 and 357/2005 and ordinance 888/2021 of the National Environment Council - CONAMA, expressing the results through descriptive statistics.

Results and Discussion: It was possible to demonstrate the main environmental impacts of pollutant and contaminant sources in rivers in the Amazon region of Pará, such as high concentrations of Pb, Cu, As, Cd, Cr and Hg, especially Pb and Hg, which were present in 60% of the studies carried out in different aquatic environments over the last 20 years in the state of Pará.

Research Implications: It helps to visualize the little research carried out in the Pará Amazon, as well as providing a better understanding of land use in the region, correlating it with the contamination of surface water by heavy metals.

Originality/Value: It is of socio-environmental and scientific importance, as it provides a better understanding of the level of contamination and frequency of heavy metals in the surface waters of the state of Pará.

Keywords: Water Quality, Water Resources, Trace Metals, Contamination, Amazon.

METALES PESADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES DE UN ESTADO DE LA AMAZONIA BRASILEÑA: UNA REVISIÓN INTEGRADORA

RESUMEN

Objetivo: Realizar una revisión sistemática de la literatura sobre estudios de metales pesados (metales traza) en ríos de la región amazónica de Pará.

Marco Teórico: Conocer cronológicamente la situación de la posible contaminación por metales traza, que afecta la calidad del agua en la Amazonia, repercutiendo en los ecosistemas y la salud pública. El desarrollo industrial, agrícola y urbano ha tenido un impacto negativo en los ríos de Pará, contribuyendo a la degradación de los recursos hídricos.

Método: Se trata de una revisión, con abordaje descriptivo, cualitativo y cuantitativo, utilizando búsquedas bibliográficas (descriptores) de investigaciones realizadas en estado de Pará, publicadas entre 2005 y 2023. Se consideraron artículos con evidencia sólida, de acuerdo con los parámetros recomendados por las resoluciones 274/2000 y 357/2005 y la ordenanza 888/2021 del Consejo Nacional del Medio Ambiente - CONAMA, expresando los resultados a través de estadística descriptiva.

Resultados y Discusión: Fue posible demostrar los principales impactos ambientales de las fuentes contaminantes y polucionantes en los ríos de la Amazonia Paranaense, tales como las altas concentraciones de Pb, Cu, As, Cd, Cr y Hg, destacándose el Pb y el Hg en el 60% de los estudios realizados en diferentes ambientes acuáticos en los últimos 20 años en estado de Pará.

Implicaciones de la investigación: Ayuda a visualizar la escasa investigación que se ha llevado a cabo en la Amazonia del Pará, así como a comprender mejor el uso del suelo la región, correlacionándolo con la contaminación de las aguas superficiales por metales pesados.

Originalidad/Valor: Es de importancia socioambiental y científica, ya que proporciona una mejor comprensión del nivel de contaminación y frecuencia de metales pesados en aguas superficiales del estado de Pará.

Palabras clave: Calidad del agua, recursos hídricos, metales traza, contaminación, Amazonia.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1 INTRODUÇÃO

Os metais, em relação a sua essencialidade para os organismos aquáticos podem ser classificados em essenciais e não essenciais (Rodrigues *et al.,* 2016). Os essenciais como cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) são aqueles que possuem função biológica conhecida e são constituintes obrigatórios do metabolismo dos indivíduos, participando de processos envolvendo compostos enzimáticos, mas dependendo da quantidade assimilada podem se tornar tóxicos (Costa *et al.,* 2020). Por outro lado, os elementos não essenciais, como crômio (Cr), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb), por exemplo, geralmente não possuem uma função biológica conhecida para o metabolismo, e os cofatores da SOD – Superóxido dismutase, enzima que previne a liberação de peroxido de hidrogênio e radicais livres, como zinco (Zn), cobre (Cu) e Manganês (Mn) (Rodrigues *et al.,* 2016).

O ser humano necessita somente de doses pequenas de alguns poucos metais, são os chamados de micronutrientes, como no caso do Cu e Fe (Cozzolino, 1997). A ingestão direta de metais pesados dissolvidos na água ou indiretamente acumulados em frutos do mar, acima do limite, é uma das principais fontes danosas para o ser humano, e que provoca distúrbios no metabolism, além de atividade carcinogênica (Cozzolino, 1997; Galarza *et al.,* 2023).

A água é um recurso essencial para as formas de vida, correlacionando-se com os sistemas ecológicos, de importância vital para a sobrevivência de organismos vivos, além de influenciar diretamente na economia, lazer, cultura e meio social (Almeida & Souza, 2019; Simões *et al.,* 2020) Em países socioeconomicamente pobres ou mesmo emergentes, como o Brasil, os níveis de potabilidade deste recurso por vezes são comprometidos devido, em parte, às deficitárias condições sanitárias, falha entre gestão das águas e gestão ambiental e ao crescimento desordenado das grandes cidades (Oliveira *et al.,* 2017; Simões *et al.,* 2020).

Ao discutir recurso hídrico na Amazônia há uma percepção errônea, na qual se confunde quantidade com qualidade da água disponível, o que acaba mascarando os problemas relacionados à degradação dos rios e mananciais da região, uma vez que dejetos antrópicos

podem estar sendo lançadas de modo irregular e sem tratamento, incapacitando o poder de autodepuração do sistema, afetando diretamente a salubridade das espécies biológicas e aumento de doenças de veiculação hídrica (Teixeira *et al.,* 2017; Costa *et al.,* 2020). Além disso, nos rios amazônicos observa-se uma sazonalidade com período chuvoso e seco bem definido que se reflete nas propriedades físico-químicas das águas (Lopes *et al.,* 2021).

Em um contexto geral, nas últimas duas décadas, rios e mananciais paraenses vêm sofrendo forte impacto e degradação devido ao desenvolvimento industrial, crescimento da área urbana desordenada, falta de políticas públicas e uso intensivo das terras agricultáveis, as quais utilizam altas quantidades de insumos, afetando a qualidade dos recursos naturais (Teixeira *et al.,* 2017; Moura *et al.,* 2020).

A presença de contaminantes químicos antropogênicos pode não ser considerada como poluição, a menos que afete o ambiente ou biota. Segundo Galarza *et al.* (2023), contaminação ocorre quando a introdução direta ou indireta de matéria ou energia dentro dos ambientes aquáticos transpassa concentrações cujos efeitos prejudiciais são manifestados, isto é, resulta em impactos mensuráveis em organismos individuais, populações ou comunidades biológicas. A poluição, por sua vez, ocorre quando essas concentrações na água, sedimento, ou organismos excedem os níveis de base da área, sem causar mensuráveis efeitos prejudiciais (Pereira *et al.,* 2019).

Mediante o exposto, buscou-se dados precisos para avaliar a atual situação dos rios e efluentes da região, nos últimos anos. Assim, o presente estudo objetivou realizar uma revisão sistemática de literatura sobre estudos e pesquisas de metais pesados/traços em rios da Amazônia paraense, proporcionando a síntese de conhecimento, por meio dos principais acervos periódicos no período de 2005 a 2023.

2 METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

As buscas literárias foram de pesquisas realizadas no âmbito do Estado do Pará, uma das 27 unidades federativas do Brasil, ocupando uma área de 1.245.870,704 km². De acordo com censo de 2022, possui 8.116.132 milhões de habitantes, com densidade demográfica 6,51 hab/m2 distribuídos em 144 municípios. O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) local é de 0,646, ocupando a 24 posição no país; rendimento nominal mensal domiciliar per capita de

R$1.061. A capital Belém, juntamente com outros cinco municípios engloba a região metropolitana com cerca de 2,6 milhões de habitantes (Ibge, 2022).

A região possui clima quente e úmido, com umidade relativa do ar média anual de 86,8 ± 3,05%, precipitação média anual de 2.921,7 ± 122,145 mm e temperatura média anual de 25,9 ± 0,33 ºC (Inmet, 2014).

2.2 TIPO DE ESTUDO

Trata-se de uma pesquisa de revisão, de abordagem descritiva, de natureza quali-quantitativa, por meio da análise de conteúdo proposta por Bardin (2016).

Realizou-se um levantamento bibliográfico nas seguintes bases de dados: Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS), *Google Scholar, Scielo, Medline* (PUBMED), publicados entre o período de 2005 a 2023, para análise e discussão do estudo final, disponíveis *online* em texto completo, nas línguas: português e inglês, relacionados com a temática proposta.

Foram selecionados artigos cuja temática estivesse relacionada com o questionamento cerne da pesquisa e que ofereceram evidências sólidas acerca dos dados levantados, de acordo com os parâmetros preconizados pelas resoluções 274/2000 e 357/2005 e a portaria 888/2021 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, considerando as publicações da literatura em inglês e português no período definido.

A utilização de diferentes bases de dados ocorreu no intuito de expandir a fundamentação da pesquisa, eliminando possíveis vieses durante a seleção de artigos.

2.3 COLETA DE DADOS

Foi realizada uma busca *online* nos periódicos supracitados por meio dos descritores estabelecidos para seleção dos artigos, sendo eles: Estuário amazônico; rios paraenses; contaminação por metais pesados; águas superficiais amazônicas; índice de qualidade da água; impactos ambientais nas águas da Amazônia; *Metals and water*; *Metals in the Amazon*; *Amazon and metals*; *River and amazon*.

Os dados extraídos dos artigos contemplaram os seguintes itens: título, periódico, autores/ ano/ país, delineamento do estudo e nível de evidência.

2.4 ANÁLISE DE DADOS

Organizou-se em um banco de dados no *software Microsoft Office Excel* 2021, através do qual se selecionaram os resultados pertinentes com a questão norteadora da revisão integrativa, além da construção de figura e tabela para expressar melhor os resultados, utilizando estatística descritiva com valores percentuais (%).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mediante busca realizada através dos cruzamentos dos descritores, foram encontrados vinte e três (23) estudos sobre a temática abordada. Depois de estabelecido o período desejado da pesquisa, os trabalhos pré-selecionados foram tabulados e organizados, no qual correspondeu aos anos de 2005 a 2023, onde foram encontrados dez (10) trabalhos na base Pubmed, sete (7) na base Scielo, três (4) na Google scholar e demais.

Após uma leitura minuciosa dos artigos, os 23 compuseram o banco de dados para análise e discussão, pois responderam às questões de pesquisa (Tabela 1). Os artigos selecionados foram caracterizados por base de dados, ano de publicação, autor (s) e principais resultados.

Tabela 1

Caracterização dos artigos de acordo com metadados atribuídos na revisão, entre 2005 e 2023.

Nº	Base de dados	Ano de publicação	Autor (es)	Principais resultados
1	*Scielo*	2012	Santos *et al.*	Análises de chumbo (Pb) em sedimentos de fundo do sistema hidrográfico de Belém indicaram baixos teores desse metal nos sedimentos do rio Guamá, sem contribuição antropogênica significativa. Teores de Pb nos sedimentos da baía de Guajará, juntamente com a diminuição das relações 206Pb/207Pb apontam para uma contribuição antropogênica de metal, pelas atividades industriais e urbanas da cidade de Belém.
2	*Scielo*	2016	Oliveira *et al.*	Assinaturas isotópicas do material em suspensão nas margens oriental (206Pb/207Pb=1,188) e ocidental (206Pb/207Pb=1,174) da baía do Guajará mostram que o material em suspensão é um mecanismo eficiente de transporte do Pb proveniente dos efluentes domésticos e industriais da cidade de Belém para margem oeste.
3	*Pubmed*	2022	Guimarães *et al.*	Foram analisados Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Ba, V, Li, Fe e Al na baía do Guajará e rio Maguari, em Belém do Pará. As concentrações médias de Cu encontradas no sedimento em dois estaleiros: 28,3 mg kg e 41,0 mg kg. As maiores concentrações de metais encontradas em fragmentos de tinta de embarcações abandonadas foram 29.588 mg kgde Ba, 9.350 mg kg de Zn, 1.097 mg kg de Pb e 548 mg kg de Cr, valores muito acima dos estipulados pela legislação federal.
4	Google Scholar	2015	Oliveira *et al.*	As concentrações trocáveis de Cu, Cr, Ni, Pb e Zn abaixo do valor de referência indicam que os metais não causam efeitos danosos à biota.

				A comparação com os teores dos mesmos metais nos sedimentos da orla de Belém aponta para uma contribuição maior, nesses últimos, dos efluentes domésticos e rejeitos industriais para Pb e Ni, seguido pelo Cr e praticamente inexistente para o Cu e Zn, margem oeste da baía do Guajará.
5	*Scielo*	2018	Oliveira *et al.*	Objetivaram avaliar as concentrações de nutrientes e metais pesados nos sedimentos do fundo do lago Água Preta, Belém, Pará. Os metais que apresentaram maior concentração foram o cromo (245 $mg.Kg^{-1}$) e o níquel (97 $mg.Kg^{-1}$), os quais estiveram acima do índice que determina o nível de efeito provável (*Probable Effect Level* - PEL).
6	Google scholar	2014	Lima	O Furo da Laura é o principal curso d'água do município de Vigia (PA), com grande extensão, fluxo diário de embarcações e acentuada urbanização na margem direita, despejando diariamente esgotos domésticos nesse estuário, podendo levar a deterioração da qualidade da água e sedimento. Quanto aos metais pesados, os sedimentos mostraram-se impactados por Cd, Cr, Ni e Fe acima do recomendado pelo CONAMA.
7	*Scielo*	2013	Pio *et al.*	As amostras de água foram coletadas por 800 horas em intervalos de 48 horas em um rio do nordeste paraense. Os resultados mostram que a presença de metais pesados na seguinte ordem Cr > Ni > Cu > Fe > Zn > Mn, assim como baixo pH e condutividade elétrica, com mudanças significativas no decorrer dos anos.
8	*Medline*	2007	Nascimento	As análises mostraram concentrações totais e parciais nas amostras da margem direita do rio Guamá: Pb total (11 – 23 mg Kg-1); Pb parcial (9 - 18 mg Kg-1); Cr total (26 - 69 mg Kg-1); Cr parcial (11 - 33 mg Kg-1); Ni total (7 - 29 mg Kg-1); Ni parcial (6 - 26 mg Kg-1); Cu total (7 - 23 mg Kg-1); Cu parcial (6 - 17 mg Kg-1). Para as 7 amostras da margem esquerda, as concentrações totais e parciais foram: Pb total (16 -20 mg Kg-1), Pb parcial (13 - 19 mg Kg-1); Cr total (34 - 56 mg Kg-1), Cr parcial (16 - 26 mg Kg-1); Ni total (12 - 21 mg Kg-1), Ni Parcial (12 - 16 mg Kg-1), Cutotal (9 - 14 mg Kg-1) e Cu parcial (7 - 12 mg Kg-1). Dessa forma, os sedimentos do rio Guamá, embora estejam em contato com efluentes domésticos, não representam nenhum risco, para o ecossistema aquático, no caso dos metais Pb e Cu. Os teores totais de Cr (69 e 56 $mg.Kg^{-1}$) e Ni (29 e 21 $mg\ Kg^{-1}$) dos sedimentos das margens direita e esquerda, encontram-se superior ou igual aos respectivos valores do TEL de 37 e 18 mg Kg-1, e podem representar um risco possível para os organismos aquáticos deste rio.
9	Google scholar	2005	Siqueira *et al.*	Amostras de sedimentos de fundo foram coletadas no rio Amazonas, no trecho que compreende ao cabo Maguari (PA) e analisadas com relação à ocorrência de metais selecionados (Li, Sr, Ba, V, Cr, Co, Ni, As, Zn, Pb e As). Os metais dominantes Fe, Mn e Al também foram analisados e utilizados como suporte ao estudo geoquímico. Observou-se correlações importantes entre o Al a maioria dos metais selecionados, justificando a ocorrência desses metais em matriz mineralógica.
10	*Lilacs*	2009	Miranda *et al.*	Foram avaliados no rio Tapajós Ca, Mg, Al, Fe, Ba, Mn, Sr, Ti, Ag, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb e Zn e determinados usando a espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES), o As foi determinado por ICP-AES com geração de hidretos, Hg foi determinado por absorção atômica com vapor frio e os parâmetros físico-químicos, apresentando não conformidade para Al e Fe, com média de 280,01±294,69 µg/L e 564,89±326,5 µg/L, respectivamente.
11	Scielo	2013	Siqueira & Aprile	A bacia do Rio Aurá está situada na região metropolitana de Belém do Pará. Os resultados demonstraram que a principal contribuição de íons Al e Fe foi o aterro sanitário; Mn e Ni vieram principalmente dos solos adjacentes; Cr foi modificado (III/VI) por processo alobioquímico e Cu por processo bioinduzido.
12	*Pubmed*	2007	Pereira *et al.*	O rio Murucupi localiza-se na região amazônica próximo a uma planta de produção de alumínio (Al). Foram selecionados 13 pontos ao longo do rio. Analisou-se os macroelementos, microelementos, elementos traço (Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Ba, Mn, Sr, Zn, Ni, Pb e Cu) e os parâmetros físico-químicos,

				acidez, alcalinidade total, matéria orgânica, pH, turbidez, temperatura, condutividade, oxigênio dissolvido (OD) e dureza total. Quanto aos elementos químicos somente Al: 356,04 µg/L e o ferro (Fe: 1080,80 µg/L), estiveram em não conformidade com a legislação.
13	Scielo	2006	Siqueira *et al.*	Pesquisa desenvolvida no rio Maguari (PA), para determinar os teores de Zn, Co e Ni nos sedimentos superficiais, identificando o papel dos sedimentos como fonte ou reserva de elementos-traço. A concentração dos metálicos apresentou a seguinte associação: Zn > Ni > Co. Os sedimentos localizados na PCA podem ser considerados como sítio de ocorrência natural dos elementos metálicos, não havendo influência de fontes poluidoras na liberação destes para o sistema.
14	Scielo	2017	Pereira *et al.*	As amostras foram coletadas em Canal Sul e rio Pará (PA). A espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICPAES) foi utilizada para avaliar teores de Al, Mn e Pb e a espectrofotometria de absorção atômica com geração de hidretos (HGAAS) foi usada para a análise do As. O As variou de <0,35 a 50,60 µg/L, Al de <1,88 a 3347,70 µg/L, Mn de 0,13 a 403,39 µg/L e Pb de <0,18 a 57,78 µg/L. Em média As (canal Sul), Al (todas as regiões), Mn (canal Norte e Sul) e Pb (canal Norte e Sul) se encontraram em valores acima do permitido pela legislação brasileira.
15	*Pubmed*	2023	Santos *et al.*	As concentrações de metais (Al, Cr, Pb, Ba, Ni e Mn) na água e os biomarcadores bioquímicos (capacidade antioxidante total, ACAP e peroxidação lipídica, LPO) foram analisados ao longo 5 pontos no rio Pará com diferentes distâncias de um centro de atividade antropogênica, em três períodos sazonais (chuvoso, transição e seco). As concentrações de metais foram semelhantes entre os locais em cada período sazonal, mas o alumínio (Al) apresentou as maiores concentrações entre todos os metais analisados em todos os pontos e períodos sazonais.
16	*Pubmed*	2022	Sousa *et al.*	Ao avaliar os usos da terra na bacia hidrográfica e determinar a qualidade da água por meio de medições de turbidez, sólidos totais e metais (Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn e Hg) no Rio Xingu, Pará, observou que as entradas do rio Fresco impactaram a qualidade da água do rio Xingu, levando a reduções na biodiversidade local devido a fatores antrópicos.
17	*Pubmed*	2017	Ribeiro *et al.*	As concentrações de As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg e Ni foram analisadas durante as estações chuvosa e seca na água do rio Xingu. A concentração total de As (>0,14µg/L) foi maior do que os valores de referência locais em todos os pontos de amostragem e em ambas as estações. A análise de ordenação (PCA) destacou os elementos As e Cu na água principalmente em regiões da mineração.
18	*Pubmed*	2019	Lino *et al.*	A distribuição de mercúrio total (THg) e metil (MeHg) foi avaliada em água não filtrada (n = 47), material particulado em suspensão (SPM, n = 30), sedimento superficial (BS, n = 29) da bacia do rio Tapajós. As partículas em suspensão foram o principal transportador de Hg na coluna d'água e no sedimento. O aumento da erosão, provocado por atividades antrópicas, levou a concentrações mais altas de Hg na água das áreas mais impactadas.
19	*Pubmed*	2020	Lino *et al.*	Ao avaliar redes alimentares da bacia do rio Tapajós e sua relação com o mercúrio, observaram que as concentrações de Selênio (Se) no sedimento foram significativamente maiores no Taplow (345-664 µg kg^{-1}) do que no Tapup/mi (60-424 µg $kg^{-1)}$. A inundação sazonal do rio Amazonas provavelmente ajuda a transportar sedimentos ricos em selênio para a foz do Tapajós (trecho do Taplow). Sugerimos que o Se no sedimento poderia diminuir a biodisponibilidade do Hg, resultando em concentrações mais baixas de MeHg nos peixes, conforme Taplow (45-934 µg kg^{-1}).
20	*Pubmed*	2006	Telmer *et al.*	Análise de mercúrio na bacia do rio Tapajós. O Hg ligado ao sedimento suspenso foi aproximadamente 600 e 200 vezes a concentração de Hg dissolvido por litro de água, em áreas impactadas e intocadas. Os sedimentos suspensos representam a principal via de Hg transportado pelo rio. As concentrações médias de Hg na carga suspensa das águas impactadas e intocadas foram de 134 ppb, e 80% das amostras estavam abaixo de 300 ppb - na faixa de materiais superficiais de ocorrência natural nos trópicos.

21	*Pubmed*	2015	Faial *et al.*	Avaliou os níveis de mercúrio (Hg) e Selênio (Se) em águas superficiais no rio Tapajós, PA. As variáveis de qualidade da água superficial nos pontos de amostragem apresentaram valores de acordo com a faixa estabelecida pela legislação.
22	*Pubmed*	2023	Cantanhêde	As amostragens foram feitas nos períodos pós-chuva e pós-seca e em três pontos, localizados em dois rios: um nos arredores da área de mineração (P1) e outro dentro da área de mineração, a montante (P2) e a jusante (P3). As amostras de água eram ácidas, com concentrações de Al dissolvido acima dos valores estabelecidos pela legislação federal em todos os pontos.
3	*Google scholar*	2018	Santos *et al.*	No sedimento total, o Cádmio Cd apresentou valores acima do permitido pelo PEL e CONAMA nº 454/2012. Na fase lixiviada, todos os metais ficaram dentro do permitido pela legislação, apresentando de baixa a moderada contaminação.

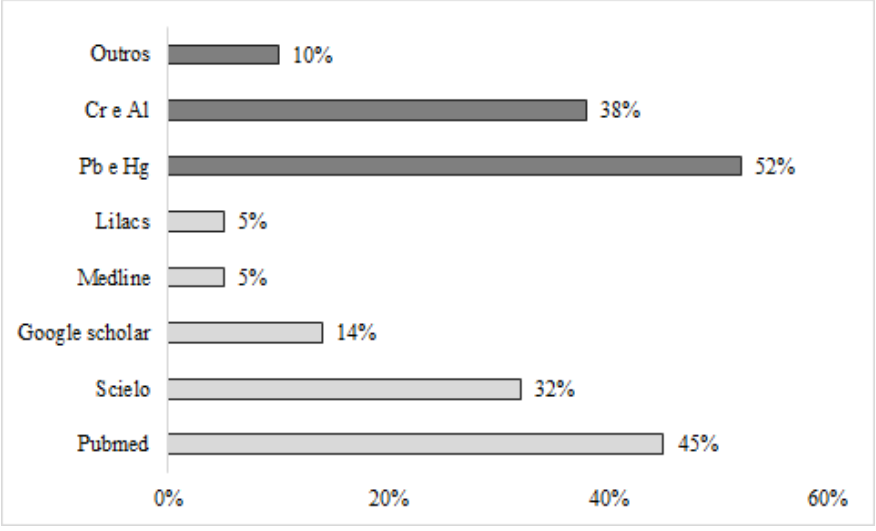
Fonte: protocolo de pesquisa

Considerando o total de acervos analisados, a base de dados *Pubmed* e *Scielo* tiveram maior evidência na busca, conforme critérios pré-estabelecidos, correspondendo juntas em 80% dos artigos, com distribuição homogênea das publicações entre os anos de 2005 e 2023.

Os principais compostos químicos discutidos pelos periódicos nos últimos anos no estado do Pará foram, Chumbo (Pb) e Mercúrio (Hg), seguido por Cromo (Cr) e Alumínio (Al), respectivamente (Figura 1).

Figura 1

Principais metais analisados nas bases de dados entre os anos de 2005 e 2023.



Fonte: protocolo de pesquisa.

Diante da atual realidade dos rios amazônicos, foi possível observar um padrão característico quanto aos principais metais mais pesquisados (Tabela 1), uma vez que conhecendo a realidade, os processos industriais/econômicos, áreas de garimpo, exploração dos recursos naturais para diversos fins. Como ressalta a Figura 1, nos últimos anos em rios da Amazônia paraense, a exposição ao chumbo e ao mercúrio foram mais prevalentes com base

na literatura cientifica, o que é amplamente reconhecida como um problema de saúde pública global, afetando particularmente as crianças dos países em desenvolvimento, como o Brasil (Brasil, 2012; Obregón *et al.,* 2021).

No Estado do Pará, a contaminação por mercúrio está ligada à mineração artesanal e em pequena escala de ouro, onde é utilizado no processo de purificação (Sacramento *et al.,* 2021). Em relação a contaminação por chumbo na região mais ampla é causada principalmente pela exposição a lixo eletrônico, reciclagem de baterias ou fabricação de cerâmica esmaltada, de acordo com os estudos de Freitas *et al.* (2018) e Sacramento *et al.* (2021).

Com base nessas análises, as concentrações de metais pesados como Pb, Hg, Al e Cr foram determinadas em amostras de sedimento de fundo em igarapés e rios e águas superficiais, presente no organismo de peixes e cabelo humano na maioria dos estudos, principalmente em municípios paraenses onde a base econômica está alicerçada em recursos minerais e garimpo, além de grandes usinas siderúrgicas e produção de couro, como o caso do Cr (Nevado *et al.,* 2010, Doimeadios *et al.,* 2014). Nos grandes centros urbanos, há a questão da ocupação desornada, má distribuição de redes de saneamento e industriais próximas a rios, combinada com o desmatamento e a construção de barragens, causa sérios impactos ambientais na região, aumentando o acúmulo de metais pesados nos solos e rios amazônicos (Arrifano *et al.,* 2018b, Lopes *et al.,* 2021).

Lopes *et al.* (2021) destacam que, o consumo de pescados contaminados pelos garimpos ilegais, do alto e médio rio Tapajós, por exemplo, é apontado como origem da presença de altos índices de mercúrio no sangue da população de cerca de 306 mil habitantes do município de Santarém, no Pará. Rios e igarapés foram contaminados e em torno de 40 mil cidadãos de comunidades indígenas, ribeirinhas e quilombolas tiveram a saúde e o modo de vida afetados pela produção de alumínio em Barcarena e Abaetetuba, nordeste do estado (Arrifano *et al.,* 2018a). Outro exemplo, o rio Amazonas e seus afluentes sofrem com a presença da contaminação química, por agrotóxicos, microplásticos, produtos farmacêuticos e outros tipos de contaminantes (Lopes *et al.,* 2021).

Pesquisa publicada por Fabregat *et al.* (2021) na *Environment International*, mostra a primeira análise quantitativa de produtos farmacêuticos e outros contaminantes urbanos em ecossistemas de água doce da Amazônia quanto aos padrões de exposição em quatro grandes cidades da Amazônia brasileira, incluindo Belém e Santarém, onde a carga química criada pela emissão de águas residuais não tratadas de áreas urbanas representa riscos significativos de longo prazo para os ecossistemas de água doce, com misturas químicas que podem afetar até 50-80% das espécies.

A exposição a metais ou a misturas de metaloides tem particular interesse na qualidade ambiental, saúde humana e animal; e de um ponto de vista de saúde pública a presença de Pb, Hg e As, por exemplo, continuam a ser alvo de atenção, pois são compostos que se encontram em 95% dos resíduos e estão difundidos em rios amazônicos (Sousa *et al.,* 2022), corroborando com as informações destacadas na pesquisa.

Carvalho *et al.* (2017), relatam que a intoxicação por Pb (saturnismo) parece afetar com maior intensidade a fauna aquática e a população ribeirinha, visto que consomem direta ou indiretamente esses animais e água. Quanto às principais formas e agentes contaminantes, de acordo com os resultados literários, os rios da Amazônia sofrem forte assoreamento, desmatamento das margens e a grande quantidade de material de origem antropogênica despejado em seus leitos (Sandin *et al.,* 2018).

Assim, os metais podem ser introduzidos nos ecossistemas aquáticos de maneira natural ou artificial, onde Santos *et al.* (2012), destacam que naturalmente, por meio do aporte atmosférico e chuvas, processos de lixiviação devido alto índice pluviométrico e topografia favorável, pela liberação e transporte a partir da rocha matriz ou outros compartimentos do solo. De modo artificial, por fontes antropogênicas de diversos ramos: esgoto in natura de áreas urbanas, efluentes de indústrias, atividades agrícolas, e rejeitos de áreas de mineração e garimpos, minérios e reservas muito abundante nos solos da região, bem como raspagem de embarcações e acidentes industriais (Pereira *et al.,* 2023; Teixeira *et al.,* 2017).

A agricultura, por exemplo, constitui uma das mais importantes fontes não pontuais de poluição por metais em corpos d'água. As principais fontes liberadoras são os fertilizantes (Cd, Cr, Pb, Zn), os que compõe princípios ativos (Cu, Pb, Mn, Zn) e dejetos de produção intensiva de bovinos, suínos e aves (Cu, As e Zn). Além disso, os metais lançados no solo, a partir desta atividade são carreados para os rios pelo escoamento de águas superficiais provenientes das chuvas, persistindo no meio aquático por apresentar forma livre, ou iônica, o que facilita sua acumulação na biota (Santos *et al.,* 2023).

Os principais resultados evidenciados na Tabela 1, considerando os metadados da revisão demonstram o citado por Barreto *et al.* (2023), em que os problemas gerados por altas concentrações de metais são inúmeros. Além de prejudicar o meio ambiente, esses elementos influenciam negativamente na vida humana. Muitas vezes, o ser humano interfere como potencializador da concentração destes materiais na natureza, o que causa alterações significativas ao meio, decorrentes, principalmente, da degradação dos recursos naturais.

As observações de Santos *et al.* (2012), como demonstrado na Tabela 1, relatam que as águas dos rios, lagos e mares podem ser poluídas diretamente pela descarga de efluentes

industriais ou domésticos, bem como na obra de Botle *et al.* (2023), que ao avaliarem os níveis de metais pesados na água de superfície dos rios indianos de 1991 a 2021, confirmaram que os índices de Fe, Cr, Pb, Ni, Cd, Mn, Hg, Co excederam em muito os limites permitidos estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde e pelo Bureau of Indian Standards, indicando um alto risco de desenvolvimento de câncer em adultos e crianças pela via da ingestão para Cr, Pb, Ni, Cd e As, resultados reforçado também por Alaboudi *et al.* (2018).

A água pode também ser poluída por substâncias presentes no solo, tais como pesticidas e fertilizantes utilizados na agricultura e transportados pela chuva até os rios, lagos e eventualmente até o mar (Bernstein *et al.,* 2022). Assim como demonstram Qin *et al.* (2021), a chuva acumula e transporta substâncias da atmosfera para as águas. Além disso, ao final os processos tradicionais de tratamento e purificação das águas não são eficientes quando falamos em contaminações por metais pesados como o chumbo (Pb), o arsénio (As) ou o mercúrio (Hg) (Faial *et al.,* 2015), com frequência, como observado na Figura 1.

A presença do mercúrio (Hg) em vários compartimentos dos rios e águas superficiais da região norte constitui um problema cada vez mais preocupante na bacia amazônica. Os primeiros estudos sobre essa problemática datam de mais ou menos duas décadas, e desde então, é possível verificar uma correlação entre as regiões de extração de garimpo de ouro e de minas como sendo as principais fontes responsáveis pela contaminação desses compostos, como pode ser observado nas pesquisas de Siqueira *et al.* (2005); Miranda *et al.* (2009); Ribeiro *et al.* (2017); Pereira *et al.* (2022) e (2023); Teixeira *et al.* (2017) (Tabela 1).

Além disso, ao avaliar a distribuição de mercúrio total (THg) e metil (MeHg) na bacia do rio Tapajós, descrito na Tabela 1, Lino *et al.* (2019) observaram, que partículas em suspensão foram o principal transportador de Hg na coluna d'água e no sedimento, e que, tais valores estiveram muito acima do recomendado pelo CONAMA/2006. No contexto, foi possível concluir que o aumento da erosão, provocado por atividades antrópicas, levou a concentrações mais altas de Hg na água das áreas mais impactadas. O Hg é transportado principalmente em material particulado; portanto, os distúrbios antrópicos influenciam as concentrações de Hg a jusante, sendo componente ubíquo de diferentes efluentes industriais, agrícolas e que apresenta níveis naturais elevados em diversas regiões da Amazônia, seja sequestrado pela floresta Amazônia e concentrado nos solos e posteriormente erodido e as mudanças climáticas e o input de Hg nas florestas. Os parâmetros limnológicos, como o teor de matéria orgânica, muito presentes em solos do Pará influenciaram as concentrações de MeHg na água bacia do Tapajós (Fostier *et al.,* 2015).

Os perigos deste tipo de contaminações na água não se restringem apenas ao consumo direto dessa água contaminada mas também às consequências diretas na cadeia alimentar quando nos referimos a tóxicos bioacumulativos, a poluição das águas por mercúrio está associada especialmente à possibilidade de metilação no meio ambiente de sua forma inorgânica Hg^{2+} por bactérias e à complexação com compostos orgânicos dissolvidos que possibilita a manutenção de concentrações relativamente elevadas na coluna d'água e acesso preferencial à biota. Um caso exemplar é a presença de metilmercúrio nas águas, nos peixes e consequentemente em todos os níveis tróficos superiores, sendo os pescados, uma importante base alimentar e um dos principais meios econômicos da região amazônica, como afirmam Jesus *et al.* (2021) e Sousa *et al.* (2022).

Soares e Signor (2021), destacaram a preocupação sobre a escassez de recursos hídricos, contaminação de lençóis freáticos, redução da pluviosidade com consequente redução dos volumes de águas nos rios e aumento da poluição advinda do uso inadequado ou inconsciente do bem.

4 CONCLUSÃO

Por meio dos achados literários a respeito da temática abordada nos últimos anos, foi possível demonstrar os principais impactos ambientais de fontes poluentes e contaminantes em rios da Amazônia paraense, como grandes concentrações de Pb, Cu, As, Cd, Cr, e Hg, com destaque para Pb e Hg, presente em 60% dos estudos realizados em diferentes ambientes aquáticos nos últimos 20 anos no âmbito do estado do Pará, números esse subestimados, devido a grande abundância de efluentes.

A histórica problemática na região requer uma mudança prioritária, uma vez que se trata de uma vasta região que carece de políticas públicas de desenvolvimento socioambiental e fiscalização, para que possa mitigar tais efeitos negativos nesses ambientes aquáticos. Além disso, com o crescimento econômico local, rios do Estado têm sido alvo de carga elevada de efluentes e resíduos sólidos das mais variadas empresas, seja na fabricação de couro, comércio local, produção industrial, urbanização e dentre outras.

Há vários trabalhos referentes à composição biogeoquímica de acordo com a sazonalidade típica da região, diante disso é de importante relevância realizar cada vez mais estudos e pesquisas desta abrangência, no intuito de contribuir e difundir conhecimentos a respeito dos impactos socioambientais nas águas amazônicas devido ao despejo de

componentes químicos e esgoto sanitário livremente, acarretando maior vulnerabilidade na região.

REFERÊNCIAS

a. Arrifano, G. R., Doimeadios, D. C. R. M., Moreno, M. J.; Oliveira, M. (2018). Assessing mercury intoxication in isolated/remote populations: increased S100B mRNA in blood in exposed riverine inhabitants of the Amazon. *Neurotoxicology*, 68(2),151-158.

b. Arrifano, G. R., Doimeadios, M., Moreno, M. J., Mateos, V. R., Silva, J. Souza, M. N. da, Oliveira, M. A. (2018). Large-scale projects in the Amazon and human exposure to mercury: the case-study of the Tucurui. *Dam Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 147(1),299-305.

Alaboudi, K. A., Ahmed, B., Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (Helianthus annuus) plant. *Annals of Agricultural Sciences,* 63(1), 123-127.

Almeida, W. R. F., Souza, F. M. de. (2019). Análise Físico-Química da Qualidade da Água do Rio Pardo no Município de Cândido Sales –BA. *Id On Line Revista de Psicologia*, 13(43),353-378.

Bardin, L. (2016). *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70.

Barreto, M. A. G., Gonçalves, M. F., Bezerra, R. M., Braga, F. S., Braga, T. G. M., & Paiva, P. F. P. R. (2023). Heavy Metal Contamination in the Jandiá Canal, Municipality of Macapá-AP, Brazilian Amazon. *Revista De Gestão Social E Ambiental*, *18*(2), e04404.

Bernstein, A. (2022). Contaminantes emergentes na água. *Revista Educação Pública*, 22(34),1-10.

Botle, A., Salgaonkar, S., Tiwari, R., Ambadekar, S., Barabde, G. R. (2023). Brief status of contamination in surface water of rivers of India by heavy metals: a review with pollution indices and health risk assessment. *Environ Geochem Health*, 45(6), 2779-2801.

Brasil (2012). *Resolução CONAMA n° 454***,** de 1º de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional.

Cantanhêde, S. M., Carvalho, I. S., C. de, Adolfo, F. R., Leal, G., Reis, G. M.; Carvalho, L. M. de, Montag, L. F. de A., Amado, L. L. (2023). Distribution of metals in different environmental compartments and oxidative stress biomarkers in Bryconops caudomaculatus (Osteichthyes: Characiformes) from a bauxite mining area in the Eastern Amazon. *Environmental Research*, 216(1),114391.

Carvalho, M. S. de et al. (2017). Concentração de metais no rio Doce em Mariana, Minas Gerais, Brasil. *Acta Brasiliensis*, 1(3), 37-41.

Costa, K. A. D., Benjamim, J. K. F., Aguiar Neto, S. A., Ferreira, T. M. C., et al. (2020). Avaliação da qualidade das Águas da Baia do Guajará para consumo humano. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, 11(6),150-159.

Cozzolino, S. M. (1997). Franciscato. Mineral biovailability. Artigo Especial. *Rev. Nutr. V.*, 10(2), 7-17.

Doimeadios, R. R. M. J., Nevado, B. F., Moreno, M. J., Herculano, G. A., Nascimento, J., Lopes, M. C. (2014). Comparative study of mercury speciation in commercial fishes of the Brazilian Amazon. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*., 21(12), 7466-7479.

Fabregat-Safont, D., Ibáñez, M., Bijlsma, L., Hernández, F., Waichman, A.V., de Oliveira, R. and Rico, A. (2021). Wide-scope screening of pharmaceuticals, illicit drugs and their metabolites in the Amazon River. *Water Research*, 200(1), 117251.

Faial, K., Deus, R., Deus, S., Neves, R., Jesus, I., Santos, E., Alves, C. N., Brasil, D. (2015). Mercury levels assessment in hair of riverside inhabitants of the Tapajós River, Pará State, Amazon, Brazil: fish consumption as a possible route of exposure. *J Trace Elem Med Biol*., 30(2), 66-76.

Fostier, A. H., Melendez-Perez, J. J., Richter, L. (2015). Litter mercury deposition in the Amazonian rainforest. *Environmental Pollution*, 206(2), 605-610.

Freitas, J. S., Lacerda, E. M. da C. B., Martins, I. C. V. da S., et al. (2018). Cross-sectional study to assess the association of color vision with mercury hair concentration in children from Brazilian Amazonian riverine communities. *Neurotoxicology*, 65(2), 60-67.

Galarza, E., Moulatlet, G. M., Rico, A., Cabrera, M., Pinos-Velez, V., Gonzáles, A. P., Capparelli, M. V. (2023). Human health risk assessment of metals and metalloids in mining areas of the Northeast Andean foothills of the Ecuadorian Amazon. *Integr Environ Assess Manag*, 19(3), 706-716.

Guimarães, R. H. E., Kersanach, M. W., Correa, J. A. M. (2022). Assessment of anthropogenic metals in shipyard sediment in the Amazon delta estuary in Northern Brazil. *Environ Sci Pollut Res Int*., 29(51), 77007-77025.

Ibge - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Estimativa populacional para o ano de 2022, cidades*. Brasília-DF. https://cidades.ibge.gov.br/

Inmet – Instituto Nacional de Meteorologia. (2014). *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa*, Brasília-DF.

Jesus, W. B., et al. (2021). Biomarkers and occurrences of heavy metals in sediment and the bioaccumulation of metals in crabs (Ucides cordatus) in impacted mangroves on the Amazon coast, Brazil. *Chemosphere*, 271(4), 129444.

Lima, M. W. de. (2014). *Avaliação da distribuição sazonal e espacial dos metais pesados nos sedimentos superficiais do furo da Laura, Amazônia oriental, Brasil*. 97 f. Dissertação (Mestrado em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém.

Lino, A. S., Kasper, D., Guida, Y. S., Thomaz, J. R., Malm, O. (2019). Total and methyl mercury distribution in water, sediment, plankton and fish along the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Chemosphere,* 235(2), 690-700.

Lino, A. S., Kasper, D., Guida, Y. S., Thomaz, J. R., Malm, O. (2020). Selenium in sediment and food webs of the Tapajós River basin (Brazilian Amazon) and its relation to Mercury. *J Trace Elem Med Biol.,* 62(1), 126620.

Lopes, C. M. E. L., Oliveira, M. A., Araújo, A. L., et al. (2021). Mercury: what can be learn from the Amazon? *Environ. Int.,* 146(1), 1-10.

Moura, L. S., Lopes, R. B., Ribeiro, J. S., Fernandes, G. S. T., Almeida, R. M., Melo, S. G. (2020). A Influência da Sazonalidade sobre a qualidade de água para microbacia do Urumari, Santarém/Pará. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, 11(6), 346-357.

Nascimento, S. M. (2007). *Caracterização da assinatura isotópica de Pb atual e da concentração de metais pesados em sedimentos de fundo da foz do rio Guamá e da Baía do Guajará (Belém - Pará).* 104 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

Nevado, J. J. B., Doimeadios, R. C. R. M., Bernardo, F. J. G., Moreno, M. J., Herculano, A. M., Nascimentos, J. L., Lopez, M. E. C. (2010). Mercury in the Tapajos River basin, Brazilian Amazon: a review. *Environ. Int.,* 36(6), 593-608.

Obregón, P. L., Quiñones, F. R. E., Oliveira, L. G. O. (2021). Intoxicações de mercúrio e chumbo com maior prevalência em crianças e trabalhadores no Paraná. *Cad. saúde colet.,* 29(1), 1-12.

Oliveira, E. C., Lafon, J. M., Corrêa, J. A. M., Carvalho, J. H. S., Dias, F. F., Taddei, M. H. T. (2015). Distribuição dos metais traços em sedimentos de fundo do sistema hidrográfico da região de Belém, PA (margem oeste da baía do Guajará e rio Carnapijó). *Geochimica Brasiliensis,* 29(2), 139-153.

Oliveira, E. C.; Lafon, J. M., Corrêa, J. A. M., Carvalho, J. H. S. (2016). Distribution and isotopic composition of lead in bottom sediments from the hydrographic system of Belém, Pará (western margin of Guajará Bay and Carnapijó River). *Brazilian Journal of Geology*, 46(Suppl 1), 197-208.

Oliveira, G. M. T. S., Oliveira, E. S., Santos, M. de L. S., Melo, N. F. A. C., Krag, M. N. (2018). Concentrações de metais pesados nos sedimentos do lago Água Preta (Pará, Brasil). *Eng. Sanit. Ambient.,* 23(03), 1-15.

Pereira, L. T., Siqueira, L. S., Correa, V. A. C., Araújo, L. S., Folha, O. A. A. C. (2019). Caracterização das ocupações de moradores de uma comunidade ribeirinha na Amazônia brasileira. *Colégio Colombiano de Terapia Ocupacional*, 18(2), 5-19.

Pereira, S. F., Lima, M. A., Freitas, K. H., Mescouto, C. S., Saraiva, A. F. (2007). Estudo químico ambiental do rio Murucupi – Barcarena, PA, Brasil, área impactada pela produção

de alumínio. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 2(3), 1-20.

Pereira, S., Pires, O. O., Saraiva, A. C. F. (2017). Distribuição de elementos tóxicos no estuário do rio Amazonas. *Ecletica Quimica*, 36(1), 46, 2017.

Pio, M. C. da S., Souza, K. dos S., Santana, G. P. (2013). Capacidade da *Lemna aequinoctialis* para acumular metais pesados de água contaminada. *Química Acta Amaz,* 43 (2), 20-30.

Qin, W., et al. (2021). Sources and migration of heavy metals in a karst water system under the threats of an abandoned Pb-Zn mine, Southwest China. *Environ Pollut.,* 15(277), 116774.

Ribeiro, D. R. G., Faccin, H., Molin, T. R. D., Carvalho, L. M., Amado, L. L. (2017). Metal and metalloid distribution in different environmental compartments of the middle Xingu River in the Amazon, Brazil. *Sci Total Environ,* 15(2), 605-606:66-74.

Rodrigues, A. C. D., Santos, A. M., Santos, F. S., Pereira, A. C. C, Sobrinho, N. M. B. A. (2016). Mecanismos de Respostas das Plantas à Poluição por Metais Pesados: Possibilidade de Uso de Macrófitas para Remediação de Ambientes Aquáticos Contaminados. *Rev. Virtual Quim,* 8(1), 2622-276.

Sacramento, L. S., Arrifano, G. P., Araújo, A. L., Oliveira, M. A. (2021). Human neurotoxicity of mercury in the Amazon: A scoping review with insights and critical considerations. *Ecotoxicol Environ Saf,* 15(208), 111686.

Sandin, M. et al. (2018). Spatial and temporal patterns of pesticide concentrations in streamflow, drainage and runoff in a small Swedish agricultural catchment. *Science of the Total Environment,* 610(611), 623-634.

Santos, C. C. M., Nauar, A. R., Ferreira, J. A., Montes, C. S. (2023). Multiple anthropogenic influences in the Pará River (Amazonia, Brazil): A spatial-temporal ecotoxicological monitoring in abiotic and biotic compartments. *Chemosphere,* 323(1), 138090.

Santos, L. F., Sousa, A. M. L., et al. (2018). Análise de metais no sedimento na baía do Guajará Belém/PA. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais,* 9(4), 314-325.

Santos, S. N., Lafon, J. M., Corrêa, J. A. M. (2012). Distribuição e Assinatura Isotópica de Pb Em Sedimentos de Fundo da Foz do Rio Guamá e da Baía do Guajará (Belém - Pará). *Quim. Nova,* 35(2), 249-256.

Simões, M. C., Morales, G. P., Sarmento, P. S. M., Ferreira, I. P., Domingues, R. J., Bichara, C. N. C. (2020). Avaliação da qualidade da água de poços domésticos em comunidades rurais no Arquipélago de Marajó- PA. *Revista Brasileira de Geografia Física,* 13(5), 2462-2475.

Siqueira, G. W., Aprile, F. (2013). Avaliação de risco ambiental por contaminação metálica e material orgânico em sedimentos da bacia do Rio Aurá, Região Metropolitana de Belém – PA. *Limnologia Acta Amaz,* 43(1), 1-12.

Siqueira, G. W., Pereira, S. F. P., Aprile, F. M. (2006). Determinação dos elementos-traço (Zn, Co e Ni) em sedimentos da Plataforma Continental Amazônica sob influência da descarga do rio Amazonas. *Acta Amazônica,* 36(3), 321-326.

Soares, S. C., Signor, A. (2021). Água um bem de todos: Interfaces desenvolvimento e sustentabilidade. *Research, Society and Development*, 10(9), e1310917728-e1310917728.

Sousa, R. S. de, Silva, G. C., Bazzan, T. B., Torre, F. (2022). Connections among Land Use, Water Quality, Biodiversity of Aquatic Invertebrates, and Fish Behavior in Amazon Rivers. *Toxics,* 10(4): 182.

Teixeira, T. H., Ferreira Neto, J. A., Aparecida, R. M., Aragão, N. F. (2017). As Unidades de Conservação de Uso Sustentável no Bioma Amazônico: Dilemas e Perspectivas Para o Desenvolvimento Sustentável. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais,* 46(1), 71-89.

Telmer, K., et al. (2006). The source and fate of sediment and mercury in the Tapajós River, Pará, Brazilian Amazon: Ground-and space-based evidence. *Journal of environmental management*, 81(2), 101-113.

ARTIGO 2

ANÁLISE DE CONCENTRAÇÕES DE METAIS PESADOS EM UMA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO DA REGIÃO AMAZÔNICA, EM REGIÃO INSULAR DE BELÉM, PARÁ, BRASIL

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

ANÁLISE DE CONCENTRAÇÕES DE METAIS PESADOS EM UMA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO DA REGIÃO AMAZÔNICA, EM REGIÃO INSULAR DE BELÉM, PARÁ, BRASIL

ANALYSIS OF HEAVY METAL CONCENTRATIONS IN A CONSERVATION UNIT IN THE AMAZON REGION, IN THE INSULAR REGION OF BELÉM, PARÁ, BRAZIL

ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN UNA UNIDAD DE CONSERVACIÓN DE LA REGIÓN AMAZÓNICA, EN LA REGIÓN INSULAR DE BELÉM, PARÁ, BRASIL

https://doi.org/10.56238/arev7n8-126

Data de submissão: 12/07/2025 **Data de publicação:** 12/08/2025

Carlos José Capela Bispo
Doutorando em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade do Estado do Pará
E-mail: capela@uepa.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2399-3140
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1082753191579268

Hebe Morganne Campos Ribeiro
Doutora em Engenharia Elétrica
Instituição: Universidade do Estado do Pará
E-mail: hebemcr@uepa.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7154-9947
Lattes: http://lattes.cnpq.br/2399134205919272

Eder Silva de Oliveira
Doutor em Agronomia
Instituição: Universidade do Estado do Pará
E-mail: ederso@uepa.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2560-2214
Lattes: http://lattes.cnpq.br/2581670135236908

Elane Cristina Melo Lemos
Doutoranda em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade do Estado do Pará
E-mail: derriseliptica@yahoo.com.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4468-7276
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6274223064540335

Heloiza Santos Borges
Doutoranda em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade do Estado do Pará
E-mail: santosheloiza@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6846-419X
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6289753068734772

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Lucas Mateus Coelho Nunes
Doutorando em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade do Estado do Pará
E-mail: lucasmateusnunes13@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2978-0624
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9071005514566104

RESUMO
A ilha do Combú, pertence a capital do estado do Pará, na cidade de Belém, é uma Área de Proteção Ambiental (APA), habitada por comunidades ribeirinhas e sujeita a pressões ambientais urbanas e turísticas. Com o objetivo de analisar as concentrações de metais pesados em águas superficiais do rio Guamá em toda a ilha, as amostras de água foram coletadas em nove pontos distintos, durante os períodos chuvoso (junho/2023) e menos chuvoso (maio/2024), sendo analisadas quanto à concentração de nove metais, Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, utilizando espectrometria de emissão atômica com plasma induzido (ICP-OES). A qualidade da água foi avaliada por meio do Índice de Qualidade da Água do CCME (IQA-CCME), adaptado para metais pesados, com base nos limites da Resolução CONAMA n.º 357/2005. Os resultados revelaram que todos os pontos foram classificados como de "qualidade ruins", com predomínio de Al, Fe e Mn acima dos limites legais. Observou-se que as concentrações foram significativamente maiores no período menos chuvoso ($p < 0,05$), indicando influência sazonal. Os fatores naturais, como o pH ácido e a geologia local (latossolos com óxidos de ferro e alumínio), associados à decomposição de matéria orgânica e à maior interação entre sedimento e coluna d'água, explicam parte da contaminação observada. Fatores antrópicos, como o deficiente saneamento básico de Belém, o crescimento urbano desordenado e o turismo não regulamentado, intensificam a degradação ambiental, contribuindo para a contaminação das águas. A presença contínua desses metais, mesmo em concentrações variáveis, indica um quadro preocupante de poluição por metais pesados, representando risco ecológico, comprometendo a fauna aquática e potencialmente afetando a saúde humana, exigindo ações urgentes de gestão ambiental, com fiscalização e monitoramento contínuo para a proteção da biodiversidade local e da saúde das comunidades ribeirinhas.

Palavras-chave: Qualidade da Água. Contaminação. Ilha do Combú. Águas Superficiais.

ABSTRACT
The island of Combú, which belongs to the capital of the state of Pará, in the city of Belém, is an Environmental Protection Area (APA), inhabited by riverside communities and subject to urban and tourist environmental pressures. In order to analyze the concentrations of heavy metals in the surface waters of the Guamá River throughout the island, water samples were collected at nine different points, during the rainy (June/2023) and less rainy (May/2024) periods, and analyzed for the concentration of nine metals, Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn, using induced plasma atomic emission spectrometry (ICP-OES). Water quality was assessed using the CCME Water Quality Index (IQA-CCME), adapted for heavy metals, based on the limits of CONAMA Resolution 357/2005. The results showed that all the points were classified as "poor quality", with a predominance of Al, Fe and Mn above the legal limits. It was observed that concentrations were significantly higher in the less rainy period ($p < 0.05$), indicating a seasonal influence. Natural factors, such as the acidic pH and the local geology (latosols with iron and aluminum oxides), associated with the decomposition of organic matter and the greater interaction between sediment and the water column, explain part of the contamination observed. Anthropogenic factors, such as Belém's poor basic sanitation, disorderly urban growth and unregulated tourism, intensify environmental degradation, contributing to water contamination. The

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

continued presence of these metals, even in varying concentrations, indicates a worrying picture of heavy metal pollution, representing an ecological risk, compromising aquatic fauna and potentially affecting human health, requiring urgent environmental management actions, with inspection and continuous monitoring to protect local biodiversity and the health of riverside communities.

Keywords: Water Quality. Contamination. Combú Island. Surface Water.

RESUMEN
La isla de Combú, perteneciente a la capital del estado de Pará, en la ciudad de Belém, es un Área de Protección Ambiental (APA), habitada por comunidades ribereñas y sometida a presiones ambientales urbanas y turísticas. Para analizar las concentraciones de metales pesados en las aguas superficiales del río Guamá en toda la isla, se recogieron muestras de agua en nueve puntos diferentes, durante los períodos lluvioso (junio/2023) y menos lluvioso (mayo/2024), y se analizaron para la concentración de nueve metales, Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn, utilizando espectrometría de emisión atómica de plasma inducido (ICP-OES). La calidad del agua se evaluó mediante el Índice de Calidad del Agua CCME (IQA-CCME), adaptado para metales pesados, basado en los límites de la Resolución 357/2005 de la CONAMA. Los resultados mostraron que todos los puntos fueron clasificados como de "mala calidad", con predominio de Al, Fe y Mn por encima de los límites legales. Las concentraciones fueron significativamente mayores en el período menos lluvioso ($p < 0,05$), indicando una influencia estacional. Factores naturales, como el pH ácido y la geología local (latosoles con óxidos de hierro y aluminio), asociados a la descomposición de la materia orgánica y a una mayor interacción entre el sedimento y la columna de agua, explican parte de la contaminación observada. Factores antropogénicos, como el deficiente saneamiento básico de Belém, el crecimiento urbano desordenado y el turismo no regulado, intensifican la degradación ambiental, contribuyendo a la contaminación del agua. La presencia continua de estos metales, incluso en concentraciones variables, indica un cuadro preocupante de contaminación por metales pesados, representando un riesgo ecológico, comprometiendo la fauna acuática y afectando potencialmente la salud humana, requiriendo acciones urgentes de gestión ambiental, con inspección y monitoreo continuo para proteger la biodiversidad local y la salud de las comunidades ribereñas.

Palabras clave: Calidad del Agua. Contaminación. Isla de Combú. Aguas Superficiales.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

1 INTRODUÇÃO

A água doce pode ser definida como um recurso natural vital que deve ser protegido para que esteja disponível em quantidade e qualidade adequada a seus respectivos tipos de uso (Pradinaud *et al.*, 2018). Apesar de essencial à vida, a água doce encontra-se vulnerável à perda de suas características naturais e à degradação de sua qualidade devido a fatores como superexploração, poluição e mudanças no uso da terra (Pereira & Santos, 2021).

Nesse sentido, dada a função de suporte que a água doce fornece na sustentação de ecossistemas, agricultura, indústria, dessedentação de animais e do consumo humano, a gestão sustentável dos recursos hídricos é indispensável tanto para o meio ambiente, quanto para a economia e para a sociedade (Mishra, 2015; Srivastava & Sahgal, 2023).

Entre os instrumentos de gestão sustentável da água, há o monitoramento que permite identificar, entre outros aspectos, os níveis de poluição e a presença de metais pesados nos recursos hídricos (Sbai *et al.*, 2024). O monitoramento da qualidade da água auxilia ainda na avaliação da contaminação causada pela urbanização, industrialização e atividades antrópicas, permitindo a verificação da conformidade com os limites permitidos estabelecidos por legislações ambientais (Roy, Bhunia & Bandyopadhyay, 2024).

As legislações que versam sobre índices e parâmetros de qualidade de água são de grande relevância visto que a poluição dos corpos d'água pode causar sérios riscos aos seres vivos (Singh, 2023). Estudos recentes demonstram que a flora e fauna aquática são significativamente afetadas pelos poluentes presentes na água e que as consequências não se limitam a organismos que habitam nesses ambientes, mas também se estendem aos ecossistemas terrestres o que, consequentemente, afeta toda a cadeia alimentar, incluindo a saúde humana (Shekhar, 2024; Dhanara, 2024; Sahoo, Sahu & Baitharu, 2024).

Entre os poluentes que podem causar alterações na qualidade da água, pode-se destacar os metais pesados que não são facilmente degradáveis, se acumulam no meio ambiente e podem atingir níveis tóxicos nos organismos vivos (Raghav *et al.*, 2022). As fontes de poluição por metais pesados incluem descargas industriais, escoamento agrícola, mineração e esgoto não tratado (Singh, 2022).

Esses metais podem interromper as funções biológicas e causar problemas de saúde, como distúrbios gastrointestinais, problemas neurológicos e câncer (Dhiman, 2024; Ingole *et al.*, 2021).
Em países onde não há um gerenciamento sustentável de todas as bacias hidrográficas, como é o caso do Brasil, as comunidades estão mais vulneráveis aos impactos ambientais decorrentes da poluição hídrica, sobretudo àquelas que possuem contato mais próximo com a água, devido à cultura e ao modo de vida, como ocorre com as populações tradicionais da Amazônia (Cardoso, Santos & Lobato, 2023).

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar as concentrações de metais pesados em águas superficiais do rio Guamá, em região correspondente à Área de Proteção Ambiental (APA) da Ilha do Combú, no estado do Pará, local onde residem muitas comunidades ribeirinhas.

2 METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na Área de Proteção Ambiental Ilha do Combú, unidade de conservação de uso sustentável instituída em 1991, situada no município de Belém, capital do Estado do Pará (IBGE, 2019). Localizada a aproximadamente 1,5 km ao sul do centro urbano de Belém, às margens do rio Guamá, a Ilha do Combú constitui a quarta maior ilha do município, com uma extensão territorial estimada em 16 km².

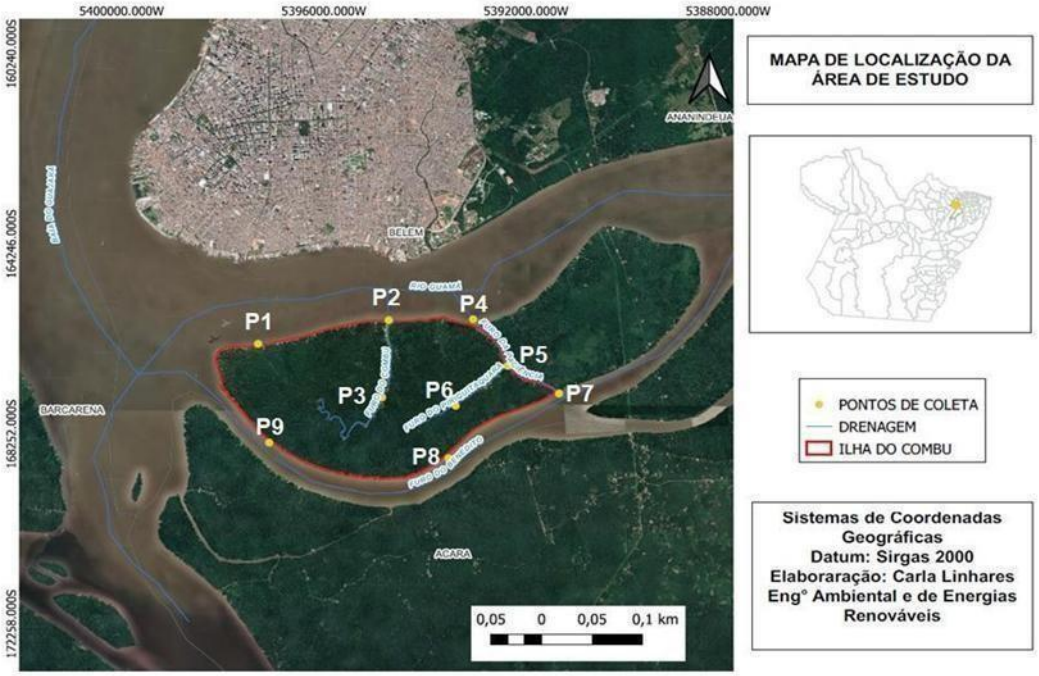
A área é caracterizada por ecossistemas típicos de várzea, apresentando um mosaico ecológico composto por formações florestais e corpos hídricos interligados. A população residente na ilha é estimada em cerca de 1.500 habitantes, distribuídos, em sua maioria, em comunidades ribeirinhas (IDEFLOR-BIO, 2018)

2.2 COLETA DE DADOS

Os locais de amostragem, pontos de coletas (Figura 1), foram posicionados estrategicamente nas águas adjacentes à ilha do Combú, estabelecidos em nove pontos geograficamente distintos e amostrados em triplicata (A, B, C). Os pontos foram georreferenciados através do sistema de posicionamento de satélite Global Position System (GPS) e identificados (Tabela 1) sendo, rio guamá, furo da Paciência, furo do Benedito, igarapé Combu e igarapé Piriquitaquara.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Figura 1- Localização da área de estudo no Área de Proteção Ambiental Ilha do Combú, Belém.



Fonte: Carla Linhares, 2025

Tabela 1- Descrição dos pontos de coleta de águas superficiais na ilha do Combu.

Pontos	Coordenadas Geográficas	Descrição
P1	1°29'38.7"S 48°29'13.5"W	Em frente a cidade de Belém, no rio Guamá
P2	1°29'22.5"S 48°27'41.9"W	Em frente a cidade de Belém, no rio Guamá, entrada do furo do Combu
P3	1°30'15.5"S 48°27'45.9"W	No interior do furo do Combu
P4	1°29'25.9"S 48°26'44.4"W	No rio Guamá, entrada do furo da paciência
P5	1°29'53.9"S 48°26'25.7"W	Furo da paciência, entrada do furo do piriquitaquara
P6	1°30'21.3"S 48°26'59.0"W	No interior do furo do piriquitaquara
P7	1°30'12.0"S 48°25'53.2"W	Na confluência do furo da paciência com furo do benedito
P8	1°30'57.4"S 48°27'04.7"W	Furo do benedito, em frente para o município do Acará
P9	1°30'28.0"S 48°29'14.7"W	Furo do benedito, se aproximando do município de Barcarena

Fonte: Autores, 2025.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

As coletas ocorreram em dois períodos sazonais distintos, em junho de 2023 e maio de 2024, correspondendo a períodos de maior e menor precipitação, respectivamente (INMET, 2024). A escolha dos momentos de coleta considerou a Tábua de Marés da Marinha do Brasil, com amostragens realizadas durante a baixa-mar/vazante para considerar a influência das atividades antrópicas na qualidade da água. Os procedimentos seguiram o Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras da CETESB (2011), com apoio logístico do Corpo de Bombeiros Militar do Pará (CBMPA).

As amostras de água foram coletadas a 20–30 cm da superfície, utilizando balde plástico, e acondicionadas em frascos de 500 mL devidamente identificados. Posteriormente, foram armazenadas em caixas térmicas com gelo reciclável e transportadas ao Laboratório de Qualidade de Água da Amazônia – LabÁgua, da Universidade do Estado do Pará (UEPA), no Parque de Ciência e Tecnologia Guamá, para análise dos metais pesados.

2.3 ANÁLISE DE DADOS

2.3.1 Determinação dos metais pesados

Para a preservação e técnica de amostragem, seguiram-se os procedimentos estabelecidos na norma NBR 9898 (ABNT, 1987). As análises laboratoriais foram conduzidas conforme os padrões internacionais definidos pelo Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater (APHA, 2017). Foram determinados nove elementos metálicos por meio da técnica de espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), utilizando o equipamento Agilent Technologies, modelo ICP OES-5800.

A quantificação dos metais pesados nas amostras de água envolveu a digestão em micro-ondas, realizada no digestor Milestone Easy Ethos, conforme o método EPA 3515A. Para isso, foram retiradas alíquotas de 45 mL de cada amostra, às quais foram adicionados 5 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3) em tubos de Teflon. Após repouso, as amostras passaram pelo processo de digestão completo, com uma rampa térmica programada em três etapas: aquecimento de 0 a 150ºC em 10 minutos a 1800 W, aumento de 150ºC a 175ºC em 15 minutos a 1800 W, manutenção de 175ºC por 10 minutos e ventilação por 50 minutos.

A determinação final dos metais pesados foi realizada no espectrômetro ICP-OES, com quantificação baseada em curvas de calibração externas de três pontos, utilizando padrão multielementar contendo todos os analitos a serem quantificados nas amostras (Selmi *et al.*, 2021).

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

2.3.2 Análise do Índice de Qualidade da Água

A avaliação da qualidade da água com base na presença de metais pesados foi realizada por meio do Índice de Qualidade da Água do Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (CCME WQI – Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index), metodologia amplamente aceita pela comunidade científica nacional e internacional e que, neste estudo, foi adaptada para avaliar a presença metais no corpo hídrico estudado (Chabuk, *et al.*, 2023; Silveira, 2018; Almeida, 2014).

As concentrações medidas em diferentes pontos de amostragem foram comparadas aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, Classe 2 (Tabela 2), destinada à proteção da biota aquática e à recreação de contato primário, classe a que pertence a porção do Rio Guamá que se encontra nos limites da Área de Proteção Ambiental Ilha do Combú.

A metodologia do IQA-CCME baseia-se em três fatores principais: escopo (F1), que representa a proporção de parâmetros que excedem os padrões de qualidade; frequência (F2), que indica a quantidade de medições que violam os limites; e amplitude (F3), que mensura a severidade das violações em relação ao valor de referência. A equação combinada desses fatores resulta em um valor entre 0 e 100, permitindo classificar a qualidade da água em cinco categorias: excelente, boa, regular, marginal ou ruim (Tabela 2).

Tabela 2- Categorização da qualidade da água de acordo com o IQA - CCME

Classificação	Faixa de Valor	Descrição
Excelente	95-100	Protegida com uma ausência virtual de ameaça ou comprometimento, condições muito próximas dos níveis naturais ou primitivos.
Boa	80-94	Protegida com apenas um menor grau de ameaça ou comprometimento, as condições raramente se afastam dos níveis naturais desejáveis.
Regular	65-79	Protegida, mas ocasionalmente ameaçada ou prejudicada, as condições às vezes se afastam dos níveis naturais ou desejáveis.
Marginal	45-64	Frequentemente ameaçada ou prejudicada, as condições geralmente se afastam dos níveis naturais ou desejáveis.
Ruim	0-44	Quase sempre ameaçada ou prejudicada, as condições geralmente se afastam de níveis naturais ou desejáveis.

Fonte: Adaptado do CCME, 2001

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os resultados do IQA-CCME indicaram que em todos os pontos de amostragem a água foi classificada como ruim, tanto no período chuvoso, como no menos chuvoso. O menor valor para esse índice foi encontrado no ponto de amostragem 3, IQA-CCME=16,309 no período menos chuvoso. O maior valor do IQA-CCME foi mensurado no ponto 8, durante o período chuvoso, IQA-CCME= 22,967. Três parâmetros foram identificados como fora do limite estabelecido pela resolução do CONAMA nº 357/2005: Alumínio, Ferro e Manganês.

A presença destes metais está intimamente relacionada às características geológicas/pedológicas locais, pois o rio Guamá atravessa latossolos amarelo distróficos com presença de caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Associada presença destes minerais, o pH ácido das águas do rio Guamá, favorece a solubilização e a mobilização desses metais do sedimento para a coluna d'água (Silva *et al*, 2021). Além das fontes naturais, destaca-se que atividades antrópicas, como o despejo de esgotos urbanos não tratados, o avanço da ocupação desordenada e o turismo não regulamentado, contribuem significativamente para a carga poluente na região (Santos et al., 2012).

De acordo com Saraiva (2007), sedimentos de fundo podem influenciar na contaminação por metais pesados, pois eles podem liberar metais para a coluna d'água em função de mudanças nas condições ambientais, como pH e presença de quelantes orgânicos. O autor também menciona que a matéria orgânica tem capacidade de adsorção para metais pesados e que essa afinidade pode tanto concentrar metais quanto auxiliar na sua remoção, dependendo das condições ambientais.

Do ponto de vista antrópico, o fato da cidade de Belém estar entre as capitais do Brasil que possuem menores índices de saneamento básico, tendo apenas 19,88% do seu esgoto coletado e apenas 2,38% tratado, pode contribuir para a classificação da água como "ruim" quando aplicado o IQA - CCME (Instituto Trata Brasil, 2023). Isso porque, a descarga contínua de esgoto doméstico e resíduos orgânicos oriundos da própria Ilha, como também da cidade de Belém, pode intensificar os processos de redução química no ambiente aquático, liberando manganês e ferro particulados ou adsorvidos no sedimento (Lee, Bennett, 1998; Zhai *et al.*, 2021).

A pressão antrópica associada à ocupação desordenada e à navegação fluvial, que ocorre diariamente no local, também contribui consideravelmente para a ressuspensão de sedimentos contaminados. A intensificação da navegação fluvial, com grande fluxo de lanchas, jet-skis e embarcações turísticas, provoca instabilidade do solo, erosão das margens e assoreamento dos cursos d'água, favorecendo a ressuspensão de sedimentos e potenciais contaminantes (Cirilo, 2013; Roumié, 2023).

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

A Área de Proteção Ambiental da Ilha do Combú foi criada com o objetivo, entre outros, de conter os efeitos da expansão urbana e da ação antrópica sobre a área, contudo, observa-se que o avanço da atividade turística e o aumento da ocupação sem controle, intensificaram os processos de degradação ambiental e a pressão sobre os recursos naturais que, atualmente, encontram-se ameaçados (Souza, 2020; Roumié, 2023).

Tabela 3- Resultados do IQA-CCME

Período	Ponto de Amostragem	Parâmetros fora do limite	Nº de parâmetros fora do limite	IQA-CCME	Classificação
Chuvoso	**Ponto 1**	Alumínio e Ferro	2	22,841	Ruim
	Ponto 2	Alumínio e Ferro	2	22,145	Ruim
	Ponto 3	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,910	Ruim
	Ponto 4	Alumínio e Ferro	2	21,753	Ruim
	Ponto 5	Alumínio e Ferro	2	22,182	Ruim
	Ponto 6	Alumínio e Ferro	2	21,673	Ruim
	Ponto 7	Alumínio e Ferro	2	22,693	Ruim
	Ponto 8	Alumínio e Ferro	2	22,967	Ruim
	Ponto 9	Alumínio e Ferro	3	21,907	Ruim
Menos Chuvoso	**Ponto 1**	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,589	Ruim
	Ponto 2	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,694	Ruim
	Ponto 3	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,309	Ruim
	Ponto 4	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,634	Ruim
	Ponto 5	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,509	Ruim
	Ponto 6	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,518	Ruim
	Ponto 7	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,366	Ruim
	Ponto 8	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,495	Ruim
	Ponto 9	Alumínio, Ferro e Manganês	3	16,578	Ruim

Fonte: Autores, 2025.

Na tabela 3, com exceção do ponto 3, todos os pontos analisados no período chuvoso tiveram dois parâmetros fora do limite: Alumínio e Ferro. No período menos chuvoso, além destes elementos, o Manganês também foi identificado como fora do padrão estabelecido pelo CONAMA.

Conforme destacado por Cirilo (2013) & Roumié (2023); Monjardin, Power & Senoro (2023), destacam que a forma do canal do rio influencia o acúmulo de manganês (Mn) devido ao seu efeito na deposição de sedimentos ao longo do rio e ao seu potencial de adsorver e/ou dissolver metais. Também, relatam que a água ácida promove a liberação de metais dos sedimentos para as águas superficiais.

A presença de Manganês em níveis elevados durante o período menos chuvoso pode ser explicada pela maior interação entre a coluna d'água e o sedimento de fundo, um fenômeno que tende a se intensificar em épocas de seca devido à redução da lâmina d'água. Conforme Lin et al. (2024), os fluxos de Manganês estão diretamente relacionados à decomposição da matéria orgânica, e os processos anaeróbios que ocorrem em sedimentos ricos nesse material favorecem a liberação de Mn

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

para a coluna d'água, especialmente quando há maior contato e troca entre os sedimentos e o ambiente aquático.

Altos níveis de Manganês na água podem afetar suas propriedades organolépticas, contribuir para sabores desagradáveis, descoloração da água e gerar depósitos escuros em tubulações e reservatórios (Aind & Mukherjee, 2024; Hill & Lemieux, 2022). Metais pesados como ferro e alumínio, são tóxicos mesmo em baixas concentrações, causando estresse oxidativo e danos ao DNA em espécies aquáticas (Banaee, 2024).

A presença de Alumínio (Al) e Ferro (Fe) em todos os pontos e períodos, considerando-se maior do que outros metais, pode ser compreendido como elementos principais na crosta terrestre, podendo vir de processos de intemperismo do material litológico do rio (Balkis et al., 2010). Indicam assim, que eles se originam das mesmas fontes, de origem semelhantes, como fontes naturais como material da crosta terrestre, mostrando uma boa correlação positiva nas amostras de água (Fadlillah et al., 2023).

Ao se acumularem nos organismos aquáticos, esses metais podem provocar efeitos tóxicos que comprometem o crescimento, a reprodução e a sobrevivência das espécies, gerando impactos significativos para o equilíbrio dos ecossistemas e riscos para toda a cadeia alimentar (Wang, 2021; Saravanan, 2024).

Além disso, a presença desses elementos em excesso contribui para alterações nos habitats bentônicos, uma vez que podem se precipitar na forma de compostos insolúveis, modificando as características físico-químicas do sedimento e reduzindo a disponibilidade de micro-habitats indispensáveis para o desenvolvimento fauna aquática (Ngole-Jeme; Ndava, 2023; Paschaliori *et al*., 2023).

3.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para a comparação estatística entre os períodos chuvoso e menos chuvoso, foi aplicado o teste t pareado exclusivamente para o Alumínio (Al), uma vez que os dados atenderam aos pressupostos de normalidade e homocedasticidade ($p > 0,05$). Para os demais metais, tais premissas não foram verificadas, motivo pelo qual se utilizou o teste de Wilcoxon para amostras pareadas, apropriado para dados não paramétricos.

Conforme apresentado na Tabela 4, a maioria dos metais analisados apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os dois períodos ($p < 0,05$), evidenciando influência da sazonalidade na concentração dos elementos. Apenas o Níquel (Ni) e o Zinco (Zn) não demonstraram variação significativa, com valores de p superiores a 0,05.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Tabela 4- Concentrações de metais no período chuvoso e menos chuvoso.

Metal	Concentração período chuvoso	Concentração período menos chuvoso	Limite Máximo Permitido (mg/L)
Alumínio (Al)*	31,31 ± 12,42	59,64 ± 22,47	0,10
Cádmio (Cd) *	0,00019 (0,00017–0,00031)	0,00000 (0,00000–0,00001)	0,001
Cromo (Cr) *	0,00782 (0,00754–0,00786)	0,03069 (0,02943–0,03313)	0,05
Cobre (Cu) *	0,00670 (0,00653–0,00687)	0,02678 (0,02620–0,02833)	0,009
Ferro (Fe) *	21,90 (21,37–24,60)	178,67 (173,67–183,00)	0,30
Manganês (Mn) *	0,04483 (0,03800–0,05403)	0,55600 (0,54233–0,57333)	0,10
Níquel (Ni) **	0,00066 (0,00044–0,00082)	0,00004 (0,00000–0,00009)	0,025
Chumbo (Pb) *	0,00087 (0,00000–0,00157)	0,00000 (0,00000–0,00000)	0,01
Zinco (Zn)**	0,01537 (0,01463–0,01573)	0,00000 (0,00000–0,00000)	0,18

Fonte: Autores, 2025

Nota: Os valores do Alumínio (Al) são apresentados como média ± desvio padrão, pois os dados apresentaram distribuição normal e foram analisados com teste t pareado. Os demais metais são apresentados como mediana (Q1–Q9), conforme análise pelo teste de Wilcoxon para dados não paramétricos. Diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) são indicadas com * e não significativas com **.

Os resultados estatísticos são semelhantes aos encontrados na literatura, onde as concentrações de metais tendem a ser mais elevadas durante a estação seca, quando há redução do volume de água e, consequentemente, menor capacidade de diluição dos elementos presentes na coluna d'água (Gongden&Lohdip, 2015; Gómez-Álvarez et al., 2014; Adejuwon; Odusote, 2023).

Durante os períodos de seca, a redução do fluxo de água pode levar ao acúmulo de metais nos sedimentos, aumentando potencialmente sua biodisponibilidade e impacto ecológico. Isso destaca a necessidade de estratégias abrangentes de monitoramento e gerenciamento que considerem as influências sazonais e antropogênicas na poluição por metais pesados em sistemas fluviais (Mião et al., 2022).

Essa condição hidrológica favorece o aumento relativo das concentrações de metais dissolvidos, intensificando seus potenciais efeitos ecotoxicológicos e os riscos à qualidade da água. Além disso, durante o período de estiagem, a interação entre a coluna d'água e o sedimento de fundo se intensifica, promovendo a liberação de metais anteriormente retidos no sedimento, especialmente sob condições redox favoráveis à solubilização de elementos como manganês (LIN et al., 2024).

A região paraense enfrenta uma problemática histórica que demanda intervenção prioritária, considerando sua ampla extensão e a carência de políticas públicas efetivas voltadas ao desenvolvimento socioambiental e à fiscalização ambiental. A ausência dessas medidas tem contribuído para a intensificação dos impactos negativos sobre os ecossistemas aquáticos. Ademais, o crescimento econômico local tem resultado no aumento da carga de efluentes e resíduos sólidos lançados nos rios do Estado, provenientes de diferentes atividades, como a indústria coureira, o

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

comércio, a produção industrial, a expansão urbana, entre outras fontes (BISPO et al., 2024; BORGES et al., 2021; BAIA et al., 2021).

4 CONCLUSÃO

A análise das concentrações de metais pesados nas águas superficiais do rio Guamá, no trecho correspondente à Ilha do Combú, revelou níveis elevados de metais pesados, ultrapassando os limites estipulados pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para Classe 2, excetuando o Ni e Zn. Essa contaminação refletiu-se na classificação ruim do Índice de Qualidade da Água (IQA-CCME) em todos os pontos e períodos amostrados, demonstrando impacto negativo persistente na qualidade do corpo hídrico. A variação sazonal das concentrações, confirmada por testes estatísticos, indica influência direta das condições climáticas sobre a mobilização e dispersão dos metais.

Fatores antrópicos, como o baixo índice de saneamento básico da cidade de Belém e o descarte inadequado de esgotos domésticos, bem como a ocupação desordenada e a intensa navegação fluvial, podem contribuir para a ressuspensão de sedimentos contaminados e a liberação dos metais para a coluna d'água. Adicionalmente, as características naturais do rio Guamá, incluindo o pH levemente ácido e o perfil geológico da bacia, favorecem a solubilização desses elementos metálicos. Assim, os resultados obtidos podem evidenciar riscos ambientais relevantes para o ecossistema local e para as comunidades ribeirinhas que dependem desses recursos.

Dessa forma, este estudo reforça a urgência da implementação de medidas integradas de gestão e monitoramento ambiental, com ênfase no saneamento básico, controle da ocupação territorial, regulação das atividades humanas e práticas sustentáveis de uso dos recursos hídricos, a fim de conservar a qualidade da água e proteger a biodiversidade da unidade de conservação e a segurança das populações tradicionais da ilha.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

REFERÊNCIAS

ADEJUWON, Joseph Omoniyi; ODUSOTE, Ayobami Akintunde. Physicochemical characteristics and heavy metals of groundwater during the wet and dry seasons at the Lafarge cement factory environment, Sagamu, Ogun State, Nigeria. World Water Policy, v. 9, n. 2, p. 178-203, 2023.

AIND, David Anand; MUKHERJEE, Abhijit. High Iron and Manganese in Groundwater of Brahmaputra River Plains: concerns for drinking water quality and remediation. Copernicus Meetings, 2024.

ALMEIDA, Geane Silva de. Avaliação da aplicação do IQA-CCME na divulgação da qualidade de água de bacias hidrográficas. Estudo de caso: Bacia hidrográfica do Rio Joanes. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2014.

BANAEE, Mahdi. Perspective Chapter: Exploring the Toxicity Effect of Heavy Metals on Aquatic Organisms–A Comprehensive Analysis. In: Heavy Metals in the Environment-Contamination, Risk, and Remediation. IntechOpen, 2024.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT - CCME. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, Technical Report. Canada, 2001. 13f.

BAIA, Raymundo David Pinheiro Fernandes et al. Qualidade de saneamento básico e saúde de moradores do entorno de áreas alagaveis no município de Belém/PA/Quality of sanitation and health of residents around floodable areas in the municipality of Belém/PA. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 4, p. 41267-41280, 2021.

BISPO, Carlos José Capela et al. Heavy Metals in Surface Waters in a State of the Brazilian Amazon: an integrative review. Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA, [S.l.], v. 18, n. 6, p. 1-17, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n6-102. Disponível em: https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/6952/3006. Acesso em: 1 ago. 2025.

BORGES, Heloiza Santos et al. Diagnóstico Quali-Quantitativo dos Resíduos Sólidos Gerados no Campus V da Universidade do Estado do Pará. Research, Society and Development, v. 10, n. 11, p. e576101119827-e576101119827, 2021.

CARDOSO, Raiane Ribeiro; SANTOS, Pamela Farias; LOBATO, Renan Guimarães. Análise da qualidade de água em comunidades ribeirinhas na Amazônia Paraense e suas implicações para a saúde pública e ambiental. Contribuciones a las ciencias sociales, v. 16, n. 7, p. 5709–5730, 2023. Disponível em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/download/1109/664. Acesso em: 13 jun. 2025.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

CHABUK, Ali; JAHAD, Udai A.; MAJDI, Ali; MAJDI, Hasan SH.; HADI, Aya Alaa; HADI, Hassan; AL-ANSARI, Nadhir; ISAM, Mubeen. Integrating WQI and GIS to assess water quality in Shatt Al-Hillah River, Iraq using physicochemical and heavy metal elements. Applied Water Science, [S.l.], v. 13, n. 147, p. 1–15, 2023. DOI: 10.1007/s13201-023-01933-2.

CIRILO, Brenda Batista. O processo de criação e implementação de unidades de conservação e sua influência na gestão local: o estudo de caso da área de proteção ambiental da Ilha do Combu, em Belém/PA. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido) – Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

DHANARAJ, C. Justin. Harmful effects of water pollution. In: Handbook of Water Pollution, 2024. p. 123–148.

DHIMAN, Varun. Heavy metal toxicity and their effects on environment. In: Heavy metal toxicity: human health impact and mitigation strategies. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 1–23.

GÓMEZ-ÁLVAREZ, A. et al. Behavior of Metals Under Different Seasonal Conditions: Effects on the Quality of a Mexico–USA Border River. Water Air and Soil Pollution, v. 225, n. 10, p. 2138, 10 set. 2014.

GONGDEN, J. J.; LOHDIP, Y. N. Seasonal Variation Of The Surface Water Quality Of Two Dams In Plateau State, North Central Nigeria. v. 196, p. 291–298, 15 jun. 2015.

HILL, A.; LEMIEUX, F. Beware of Legacy Manganese Issues in Distribution Systems. Opflow, v. 48, n. 1, p. 16–21. 2022.

INGOLE, Akruti Amol; MUKHERJEE, Anirban Goutam; BALGOTE, Piyush Jagdish; et al. A review on carcinogenic heavy metals. International Journal of Engineering Research and Technology, v. 10, n. 3, 2021. Disponível em: https://www.ijert.org/research/a-review-on-carcinogenic-heavy-metals-IJERTV10IS030216.pdf. Acesso em: 13 jun. 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL. 202. Ranking do saneamento do Instituto Trata Brasil de 2024. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento-2024/. Acesso em: 11 ago. 2025.

LEE, R. W.; BENNETT, P. C. Reductive dissolution and reactive solute transport in a sewage-contaminated glacial outwash aquifer. Ground Water, v. 36, n. 4, p. 583–595, 1 jul. 1998.

LIN, Z.; LIU, L.; LIAN, E.; ZHAO, W. Q.; JIANG, X. Regeneration of sedimentary manganese in coastal sediments deciphered by 224Ra/228Th disequilibria. Science of The Total Environment, p. 172493, 1 abr. 2024.

MISHRA, Santosh Kumar. Strategies for sustainable management of freshwater resources. Journal of Water Sustainability, v. 5, n. 2, p. 31, 2015.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

NGOLE-JEME, V. M.; NDAVA, J. The Implications of AMD Induced Acidity, High Metal Concentrations and Ochre Precipitation on Aquatic Organisms. Polish Journal of Environmental Studies, v. 32, n. 4, p. 2959–2980, 16 maio 2023.

PASCHALIORI, Christina et al. The Biogeochemical Behavior of Heavy Metals in the Aquatic Environment and Their Effects on Health. Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences (MJBAS), v. 7, n. 4, p. 114-126, 2023.

PEREIRA, Laura Amorim; DOS SANTOS, Mariana Rodrigues Ribeiro. Plano de bacias hidrográficas como ferramenta para o delineamento de infraestruturas verdes. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 12, p. 106054–116070, 2021.

PRADINAUD, Charlotte; et al. Definindo a água doce como um recurso natural: uma estrutura que vincula o uso da água à área de proteção de recursos naturais. Revista Internacional de Avaliação do Ciclo de Vida, v. 23, n. 1, p. 1–15, 2018. DOI: 10.1007/s11367-018-1543-8.

RAGHAV, Nupur; SHARMA, Shweta; SINGH, Parul; et al. A comprehensive case review of microbial remediation of heavy metals and pesticides in Yamuna River. The Applied Biology & Chemistry Journal, p. 11–33, 2022. Disponível em: http://www.theabcjournal.com/index.php/tabcj/article/download/36/30. Acesso em: 11 jun. 2025.

ROY, Biplab; BHUNIA, Biswanath; BANDYOPADHYAY, Tarun Kanti; et al. Water pollution by heavy metals and their impact on human health. In: [S.l.: s.n.], 2024. p. 333–352.

ROUMIÉ, Indara Martins Aguilar. Gestão ambiental e o desenvolvimento local na zona costeira paraense: o caso da ilha do Combu/PA. Orientadora: Marise Teles Condurú .2023. 96 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local na Amazônia) - Núcleo de Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Disponível em: . Acesso em: 11 jul. 2025.

SAHOO, Santosh Kumar; SAHU, Ashish Kumar; BAITHARU, Iswar. Environmental and health risks assessment of chemical pollutants in drinking water and wastewaters. In: [S.l.]: Elsevier BV, 2024. p. 291–311.

SARAIVA, André Luis de Lima. Estudo sedimentológico e geoquímico em sedimentos de fundo na Baía de Guajará-Belém (PA). Orientador: Werner Truckenbrodt. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

SARAVANAN, Panchamoorthy et al. Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system: sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment. Environmental Research, v. 258, p. 119440, 2024.

SBAI, K.; et al. Assessment of heavy metal pollution in groundwater using a multivariate analysis approach. Journal of Water and Land Development, p. 175–182, 12 jun. 2024.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

SHEKHAR, C.; et al. A systematic review on health risks of water pollutants: classification, effects and innovative solutions for conservation. Toxicology Research, v. 14, n. 1, 31 dez. 2024.

SILVA, Daniel Clemente Vieira Rêgo da; QUEIROZ, Lucas Gonçalves; GOMES, Luiz Eduardo Thans; MARASSI, Rodrigo José; POMPÊO, Marcelo Luiz Martins (orgs.). Recurso água: tecnologias e pesquisas para o uso e a conservação de ecossistemas aquáticos. 1. ed. São Carlos: Editora Cubo, 2021. E-book. ISBN 978-65-86819-07-6. DOI: https://doi.org/10.4322/978-65-86819-07-6.

SILVEIRA, Livia Garcia. Estudo comparativo da utilização do IQA-NSF e IQA-CCME para análise da qualidade da água no Estado do Rio De Janeiro. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SINGH, Anubhav; et al. Heavy metal contamination of water and their toxic effect on living organisms. In: [S.l.]: IntechOpen eBooks, 2022. Disponível em: https://www.intechopen.com/citation-pdf-url/82246. Acesso em: 8 jun. 2025.

SINGH, Vir. Water pollution. In: Textbook of Environment and Ecology. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 253–266.

SOUZA, Bruna Amaral. Gestão de áreas protegidas e a conservação da biodiversidade: uma análise da área de proteção ambiental Ilha do Combu, Belém-Pará-Amazônia-Brasil. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

SRIVASTAVA, Prem S.; SAHGAL, Manvika. Freshwater pollution: overview, prevention, and control. In: [S.l.: s.n.], 2023. p. 359–365.

ZHAI, Y. et al. Anthropogenic Organic Pollutants in Groundwater Increase Releases of Fe and Mn from Aquifer Sediments: Impacts of Pollution Degree, Mineral Content, and pH. Water, v. 13, n. 14, p. 1920. 2021.

WANG, J. A review on the ecotoxicological effects of heavy metals on aquatic organisms-siftdesk. SDRP journal of Earth sciences & environmental studies, p. 148–161. 2022.

ARTIGO 3

ÁGUAS DA AMAZÔNIA ORIENTAL: ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA E DE METAIS NO RIO GUAMÁ, APA ILHA DO COMBU (BELÉM, PARÁ, BRASIL)

Águas da Amazônia Oriental: Análise físico-química e de metais no Rio Guamá, APA Ilha do Combu (Belém, Pará, Brasil)

Waters of the Eastern Amazon: Physicochemical and Metal Analysis in the Guamá River, Combu Island EPA (Belém, Pará, Brazil)

Resumo

A crescente influência das atividades humanas sobre os ecossistemas aquáticos amazônicos evidencia a necessidade de compreender como as variações hidrológicas afetam a dinâmica da qualidade da água. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade da água no trecho do rio Guamá inserido na APA Ilha do Combu (PA), com base em parâmetros físico-químicos e teores de metais. As amostras foram coletadas em nove pontos durante os períodos mais e menos chuvosos e analisadas quanto aos parâmetros físico-químicos e teores de metais (alumínio, ferro e manganês). Os dados foram submetidos a testes estatísticos e análise de correlação. Os resultados mostraram que a maioria dos parâmetros físico-químicos permaneceu dentro dos limites estabelecidos pela legislação, no entanto, as concentrações de metais aumentaram no período menos chuvoso, ultrapassando os limites legais. Conclui-se que as águas da APA Ilha do Combu são diretamente afetadas por fatores hidrológicos e pressões antrópicas, sendo o furo do Combu o trecho mais impactado. Os resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo e da adoção de medidas de manejo sustentável voltadas à conservação dos recursos hídricos amazônicos.

Palavras-chave: Hidrologia. Meio ambiente. Impactos ambientais. Recursos hídricos. Conservação ambiental.

Abstract

The increasing influence of human activities on the aquatic ecosystems of the Amazon highlights the need to understand how hydrological variations affect water quality dynamics. In this context, this study aimed to evaluate the water quality in the section of the Guamá River located within the APA Ilha do Combu (PA), based on physicochemical parameters and metal concentrations. Samples were collected at nine points during the rainy and dry seasons and analyzed for physicochemical parameters and metal concentrations (aluminum, iron, and manganese). The data were subjected to statistical tests and correlation analysis. The results showed that most physicochemical parameters remained within the limits established by legislation; however, metal concentrations increased during the dry season, exceeding legal limits. It is concluded that the waters of APA Ilha do Combu are directly affected by hydrological factors and anthropogenic pressures, with the Furo do Combu stretch being the most impacted. The results emphasize the importance of continuous monitoring and the adoption of sustainable management measures aimed at conserving the Amazonian water resources.

Keywords: *Hydrology. Environment. Environmental impacts. Water resources. Environmental conservation.*

For Review

Introdução

A água doce é um recurso natural indispensável para a manutenção da vida e o equilíbrio ecológico, sendo vital para os ecossistemas aquáticos, o bem-estar humano e o desenvolvimento das sociedades (Bawra e Pawar, 2023). No entanto, sua qualidade tem sido gravemente impactada pelas crescentes pressões antropogênicas, como o aumento da população, a urbanização, a industrialização e as mudanças nos padrões de uso da terra (Mukherjee, 2023)

Esses fatores resultam na introdução de contaminantes e na alteração dos processos naturais que sustentam os ecossistemas de água doce, comprometendo a capacidade desses ambientes de fornecer serviços essenciais com qualidade, como abastecimento de água, regulação do clima e suporte à biodiversidade (Srivastava e Sahgal, 2022; Grizzetti e Poikāne, 2024).

Diante desse cenário, o monitoramento contínuo da qualidade da água e a adoção de práticas de manejo sustentável deste recurso se tornam ações fundamentais para identificar os níveis e fontes de poluição, permitindo intervenções oportunas e mitigando os impactos causados (Sudan et al., 2024; Silva; Correia; Correia, 2025).

No Brasil, a Amazônia se caracteriza como uma região que se destaca no contexto da disponibilidade hídrica mundial, abrigando uma das maiores reservas de água doce do planeta (Duarte; Val, 2020; Cardozo; Diniz; Szlafsztein, 2022). Entretanto, esse patrimônio encontra-se ameaçado por atividades humanas que modificam a dinâmica natural dos corpos d'água, especialmente em áreas periurbanas (Mikkola, 2024).

A região metropolitana de Belém, no estado do Pará, representa um exemplo desse cenário, em que rios e igarapés sofrem influência tanto das condições naturais de sazonalidade e fase hidrológica quanto da pressão demográfica e econômica (Dutra et al., 2022).

Apesar de estar em uma região rica em água doce, o processo de urbanização ameaça a disponibilidade e a qualidade desses recursos hídricos (Carvalho e Rocha, 2020). Com isso, áreas protegidas adquirem relevância por funcionarem como espaços de uso sustentável e de conservação ambiental, como é o caso da Ilha do Combu, situada às margens do rio Guamá (Virtanen, 2020; Nogueira et al., 2023).

A Ilha do Combu, está inserida na Área de Proteção Ambiental Combu e apresenta um ambiente de várzea característico da Amazônia, onde comunidades ribeirinhas mantêm uma estreita relação com a água (Figueredo, 2023). Os rios e igarapés locais são fundamentais para o transporte, o consumo, a pesca e diversas atividades de subsistência (Virtanen, 2020). Essa interação gera a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade da água, para garantir condições adequadas para a saúde ambiental e humana (Cardoso et al., 2023; Carneiro et al., 2022)

A avaliação da qualidade da água pode ser realizada por meio de parâmetros físico-químicos que fornecem informações sobre o estado ambiental dos corpos hídricos (Chaudhary e Dwivedi, 2024). Estudos demonstram que os metais têm o potencial de causar impactos adversos significativos nos ecossistemas aquáticos e na saúde pública (Rekha, 2023; Hameed et al., 2020). Nesse sentido, estuda-los permite identificar fontes de contaminação, avaliar a qualidade da água e entender os riscos associados à exposição prolongada a esses elementos (Roy et al., 2024; Singh; Babu, 2023).

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água no trecho do rio Guamá inserido na APA Ilha do Combu, com base em parâmetros físico-químicos e teores de metais.

For Review

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado na Área de Proteção Ambiental (APA) Ilha do Combu, instituída em 1991 como unidade de conservação de uso sustentável e localizada no município de Belém, capital do Estado do Pará (IBGE, 2019). A ilha situa-se a aproximadamente 1,5 km ao sul do centro urbano de Belém, às margens do rio Guamá, sendo a quarta maior ilha do município, com cerca de 16 km² de extensão territorial. Sua paisagem é marcada por ecossistemas típicos de várzea, formando um mosaico composto por florestas e corpos hídricos interligados. A população local é estimada em aproximadamente 1.500 habitantes, organizada, principalmente, em comunidades ribeirinhas (Ideflor-Bio, 2018).

A água do rio Guamá, na qual a Ilha do Combu está inserida, é classificada como Tipo 2 segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, sendo utilizada para recreação de contato primário e para a conservação da fauna aquática, incluindo a pesca. A área de estudo é caracterizada por um conjunto de influências naturais e antrópicas, entre elas destacam-se a proximidade da cidade de Belém, que exerce pressão urbana, e a presença de atividades econômicas diversas, como pesca, turismo e agricultura, que impactam diretamente os corpos hídricos da região (Sousa et al., 2019; Costa et al., 2015).

Coleta de Dados

As coletas foram realizadas em nove pontos georreferenciados (Figura 1; Tabela 1; Tabela 2), distribuídos estrategicamente em trechos representativos do rio Guamá e dos furos/igarapés adjacentes à Ilha do Combu. Em cada ponto, coletaram-se amostras em triplicata e as amostragens ocorreram durante a maré baixa/vazante, conforme a Tábua de Marés da Marinha do Brasil, a fim de maximizar a detecção de possíveis influências antrópicas.

Realizaram-se duas campanhas para representar variações hidrológicas distintas. A primeira coleta ocorreu em junho de 2023 (período mais chuvoso) e a segunda coleta foi realizada em maio de 2024 (período menos chuvoso), mantendo-se os pontos e protocolo de coleta. Como ocorreram em anos diferentes, não foi objetivo deste estudo demonstrar sazonalidade estrita nem dissociar efeitos interanuais, mas interpretar os dados como um contraste entre variações hidrológicas.

Dessa forma, os pontos amostrais foram comparados sob duas condições hidrológicas típicas da região amazônica (período mais e menos chuvoso) para identificar diferenças de concentração e conformidade normativa atribuíveis às variáveis analisadas, sem inferir sazonalidade anual no sentido estrito.

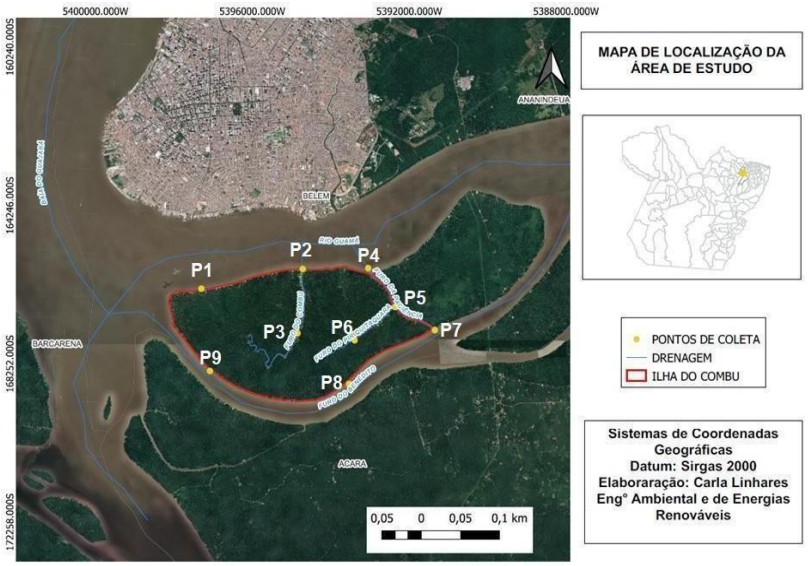


Figura 1 - Área de Estudo, APA ilha do Combu. Fonte: Elaborado por Carla Linhares (2023).

Em Review

Tabela 1 - Pontos de coleta de águas superficiais na ilha do Combu.

Pontos	Coordenadas Geográficas	Descrição
P1	1°29'38.7"S 48°29'13.5"W	Em frente a cidade de Belém, no rio Guamá
P2	1°29'22.5"S 48°27'41.9"W	Em frente a cidade de Belém, no rio Guamá, entrada do furo do Combu
P3	1°30'15.5"S 48°27'45.9"W	No interior do furo do Combu
P4	1°29'25.9"S 48°26'44.4"W	No rio Guamá, entrada do furo da paciência
P5	1°29'53.9"S 48°26'25.7"W	Furo da paciência, entrada do furo do piriquitaquara
P6	1°30'21.3"S 48°26'59.0"W	No interior do furo do piriquitaquara
P7	1°30'12.0"S 48°25'53.2"W	Na confluência do furo da paciência com furo do benedito
P8	1°30'57.4"S 48°27'04.7"W	Furo do benedito, em frente para o município do Acará
P9	1°30'28.0"S 48°29'14.7"W	Furo do benedito, se aproximando do município de Barcarena

Fonte: Autores (2018).

Tabela 2 - Descrição detalhada dos pontos de coleta de águas superficiais na APA ilha do Combu.

Pontos	Descrição
P1, P2 e P4	Localizados próximos à cidade de Belém, esses pontos são sujeitos a pressões urbanas, como o lançamento de esgoto doméstico e o escoamento de resíduos urbanos, além de poluição gerada pelo tráfego fluvial intenso e pela presença de atividades comerciais e industriais na área
P3, P5 e P6	Localizados dentro da Ilha do Combú, esses pontos são influenciados principalmente por atividades turísticas, como restaurantes e pousadas, além da navegação intensa nos furos do Combu e Piriquitaquara e atividades ribeirinhas.
P7, P8 e P9	Localizados na margem do rio Acará, esses pontos podem ser influenciados por práticas agrícolas nas áreas circundantes. A região é caracterizada por atividades como cultivo de açaí, cacau e outras culturas, além de ser um destino de turismo ribeirinho.

Fonte: Autores (2018).

For Review

As amostras de água foram coletadas a uma profundidade de 20 a 30 cm e armazenadas em caixas térmicas com gelo reciclável e encaminhadas ao Laboratório de Qualidade de Água da Amazônia (LabÁgua), localizado no Parque de Ciência e Tecnologia Guamá, para processamento e análise posterior, conforme os protocolos estabelecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2011) e pela NBR 9898 (ABNT, 1987).

Análise dos parâmetros físico-químicos

Foram determinados sete parâmetros físico-químicos. O pH, a condutividade elétrica (CE), o oxigênio dissolvido (OD), os sólidos dissolvidos totais (SDT) e a salinidade (SL) foram medidos por método eletrométrico utilizando sonda multiparamétrica portátil (Hach HQ040D, Gabinet USB/DC Buffers). A turbidez (NTU) foi determinada pelo método nefelométrico com turbidímetro TU430 (AKSO).

A cor aparente (COR) foi quantificada pelo método de platina-cobalto, utilizando espectrofotômetro Hach DR 3900. Todos os equipamentos foram previamente calibrados conforme especificações dos fabricantes, utilizando reagentes de grau analítico e os resultados obtidos foram comparados com a Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas de Classe 2.

Análise dos teores de metais

A determinação dos metais foi realizada seguindo os protocolos estabelecidos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), com amostras processadas no Laboratório LabÁgua/PCT Guamá, da Universidade do Estado do Pará. A digestão das amostras foi realizada por método ácido, com a quantificação dos metais utilizando espectrometria de absorção atômica e espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente, conforme as características específicas de cada elemento analisado, sendo estes Alumínio (Al), Ferro (Fe) e Manganês (Mn).

Na primeira coleta, realizada durante o período mais chuvoso, foram determinadas as concentrações da fração total dos metais. Já na segunda coleta, realizada no período menos chuvoso, foi analisada a fração dissolvida dos mesmos metais. Essa distinção nas abordagens ocorreu para possibilitar a captura de variações no comportamento dos metais considerando os diferentes processos de mobilização e transporte de contaminantes em função das condições hidrológicas.

Embora as coletas tenham sido realizadas de forma distinta, a metodologia do estudo se mostrou adequada para compreender os diferentes comportamentos dos metais em cada coleta, possibilitando a comparação com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para manganês na primeira coleta e para o alumínio e ferro na segunda.

Tratamento Estatístico

Para avaliar a diferença significativa entre os parâmetros físico-químicos analisados nos períodos, foi aplicado o Teste t para amostras dependentes. Quando as variáveis não atenderam aos pressupostos de normalidade (Shapiro-Wilk) e homoscedasticidade (Teste F), utilizou-se o teste de Wilcoxon para amostras dependentes. Os testes estatísticos foram realizados no Excel e no Bioestat.

Para compreender as relações entre as variáveis físico-químicas e os metais Al, Fe, e Mn, foi realizada a análise de matriz de correlação, permitindo identificar associações significativas entre os indicadores. Os coeficientes de correlação foram interpretados conforme a classificação de Callegari-Jacques (2011): 0,00 a 0,19 (muito fraca), 0,20 a 0,39 (fraca), 0,40 a 0,69 (moderada), 0,70 a 0,89 (forte), 0,90 a 1,0 (muito forte). Valores negativos indicam a mesma intensidade de correlação, porém inversa. A significância estatística foi considerada para valores de $p < 0,05$, e coeficientes próximos de 1 ou -1 indicaram correlações muito fortes.

Resultados e discussão

Análise dos parâmetros físico-químicos

pH

A variação do pH nas duas coletas (Figura 2) manteve-se dentro do intervalo da Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas de Classe 2 (6,0–9,0), com uma exceção pontual de 5,97 no período menos chuvoso (Figura 2). Durante a primeira coleta, realizada no período mais chuvoso, o pH variou entre 6,04 e 6,38 (média±DP=6,208±0,098), enquanto na segunda coleta, no período menos chuvoso, os valores estavam entre 5,97 e 6,21 (média±DP= 6,061±0,071).

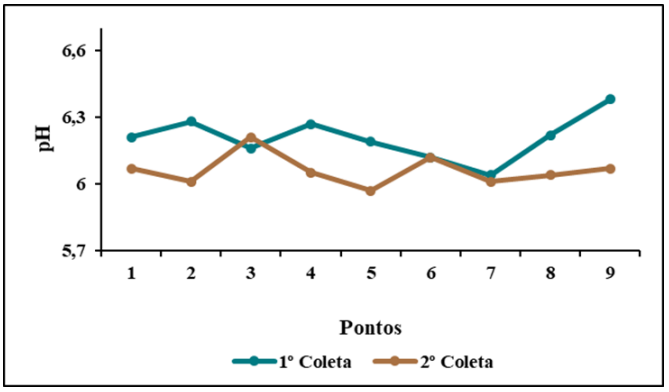


Figura 2 – pH das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas. Fonte: Elaboração Própria.

O teste t pareado mostrou que houve diferença significativa entre as duas coletas (p = 0,002). Durante o período chuvoso há maior contribuição de escoamento superficial e transporte de sedimentos e matéria orgânica, que intensificam a lixiviação de compostos ácidos do solo reduzindo moderadamente o pH (Placencia et al., 2023). No período menos chuvoso, a menor renovação da água favorece a decomposição do material orgânico e a liberação de CO_2 pelos sedimentos expostos, processo que contribui para a maior acidificação do meio (Rodríguez Gómez et al., 2023).

Os valores de pH mais ácidos em ambas as coletas são compatíveis com o disposto na literatura. De acordo com Marinho et al. (2020), as águas da Amazônia, principalmente em regiões de solo ácido, como o Rio Guamá, tendem a apresentar valores de pH abaixo da neutralidade, sobretudo em áreas de várzea, em função da decomposição de matéria orgânica e da interação com solos ricos em substâncias ácidas. As pequenas variações de pH observadas são típicas de rios amazônicos e refletem a interação entre clima, composição do solo e dinâmica hidrológica ao longo do ciclo de cheia e vazante (Aprile et al., 2023).

O impacto das atividades antrópicas nas variações de pH é mais evidente nos pontos próximos a fontes de poluição, como P3, P5 e P7, onde o pH foi menor, isso porque a combinação de práticas agrícolas (P7) e despejo de efluentes não tratados (P3 e P5) favorece a acidificação da água (Silva et al., 2012). O menor valor registrado no ponto P5 é consistente com outras bacias amazônicas em áreas de solos ácidos, onde se registram valores levemente ácidos, e demonstra a necessidade de medidas de manejo, como manutenção de vegetação ripária e conservação de margens, para atenuar flutuações e reduzir a influência de fontes difusas (Silva et al., 2012; Souza et al., 2015).

For Review

Oxigênio Dissolvido

Os resultados de oxigênio dissolvido (OD) variaram consideravelmente entre as coletas (Figura 3). Na primeira coleta, os valores de OD estiveram entre 4,52 mg/L e 6,97 mg/L (média±DP=6,327±0,981), enquanto na segunda coleta, os valores de OD variaram entre 5,06 mg/L e 6,48 mg/L (média±DP=6,140±0,418).

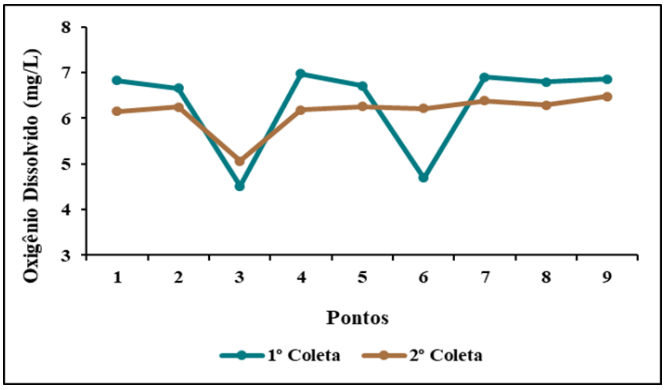


Figura 3 – Teores de Oxigênio Dissolvido das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas.
Fonte: Elaboração Própria.

Com exceção dos pontos P3 (4,52 mg/L) e P6 (4,69 mg/L), todos os valores de OD atenderam ao limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas de Classe 2 (≥ 5 mg/L). Esse padrão está de acordo com o encontrado por Marinho et al. (2020), que reportam correlações negativas entre OD e matéria orgânica em rios amazônicos, principalmente onde há escoamento de esgoto e resíduos, como ocorre nos pontos P3 e P6.

Nessas condições, a oxidação da matéria orgânica consome oxigênio dissolvido e favorece quedas pontuais. A decomposição de matéria orgânica aumenta a demanda por oxigênio e reduz suas concentrações, o que explica os resultados em P3 e P6 (Momin & Mohammed, 2020), essa reação também é descrita por Silva et al. (2012) e por Marcé et al. (2024).

Embora a média da 2ª coleta tenha sido menor que a da 1ª coleta, a diferença entre elas não foi estatisticamente significativa (Wilcoxon, p = 0,373). Ainda assim os resultados demonstram o comportamento do oxigênio dissolvido nas diferentes variações hidrológicas.

No período mais chuvoso, o OD tendeu a reduzir, em razão do maior aporte de matéria orgânica e da elevação da DBO (demanda bioquímica de oxigênio), além da maior turbidez que limita a fotossíntese (Mccabe et al., 2021; Marcheva et al., 2024). No período menos chuvoso, observaram-se valores relativamente mais constantes, assim como no trabalho de Moraes et al. (2023). Esses valores podem estar associados à menor carga orgânica alóctone e à maior transparência da água, que favorecem a produção fotossintética e a reaeração superficial (Maier et al., 2025).

For Review

Condutividade elétrica e Salinidade

Na primeira coleta, os valores de condutividade elétrica variaram entre 18,21 µS/cm e 31,90 µS/cm (média±DP=21,110±4,841). Na segunda coleta, a variação foi de 15,10 µS/cm a 25,80 µS/cm (média±DP=16,577±3,493) (Figura 4). Como a Resolução CONAMA nº 357/2005 não estabelece limites para condutividade elétrica em rios de Classe 2, os resultados foram interpretados com base em referências científicas e no comportamento hidrológico esperado para sistemas amazônicos.

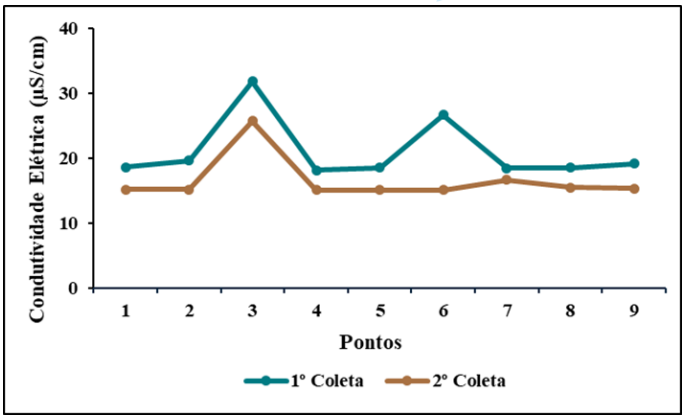


Figura 4 – Valores de Condutividade Elétrica das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas.
Fonte: Elaboração Própria.

O teste de Wilcoxon indicou que houve diferença significativa entre os resultados das duas coletas (p= 0,007). Os menores valores de condutividade elétrica na segunda coleta, período menos chuvoso, podem estar associados à menor diluição de sais e à intensificação da concentração de poluentes no corpo hídrico, comportamento também observado em estudo recente de Sultana (2025) sobre a variabilidade temporal da qualidade da água.

A condutividade elétrica está diretamente relacionada à concentração de íons dissolvidos na água, e essa concentração pode ser influenciada por fatores, como o regime de chuvas, as características geológicas da bacia e a presença de atividades humanas nas margens do rio (Ren & Liu, 2024). No caso do Rio Guamá, os valores de CE observados indicam que a água é de baixa salinidade, característica típica de corpos hídricos da região amazônica conforme constatado nos valores encontrados para a salinidade em ambas as coletas, todos com valor igual a 0,01.

Em consonância com a tipologia hidrogeoquímica regional, Aprile et al. (2023) identificaram condutividade elétrica baixa a moderada em rios de água clara, como Xingu e Tapajós. À semelhança do Guamá, esses rios têm condutividade elétrica baixa devido à reduzida carga de sólidos dissolvidos, reforçando que águas com poucos sais apresentam condutividade elétrica menor e são sensíveis às variações do ciclo hidrológico.

Concernente à influência das atividades antrópicas, na 1ª coleta o ponto P3 apresentou o maior valor de condutividade elétrica entre todos os pontos, seguido por P6, ambos localizados na Ilha do Combu. Na 2ª coleta houve tendência de redução geral, ainda assim, o ponto P3 permaneceu entre os pontos com CE mais elevada, indicando pressão antrópica contínua nesse trecho (Ren & Liu, 2024).

Turbidez

Na 1ª coleta, os valores de turbidez variaram de 26,50 NTU a 46,60 NTU (média±DP=37,189±5,599). Na 2ª coleta, os valores ficaram entre 23,40 NTU e 40,60 NTU (média±DP=29,933±5,262), indicando valores mais elevados no período mais chuvoso (Figura 5). O teste estatístico de Wilcoxon apontou diferença significativa entre as coletas (p = 0,021) e todos os valores permaneceram abaixo do limite para águas de Classe 2 estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (≤ 100 NTU).

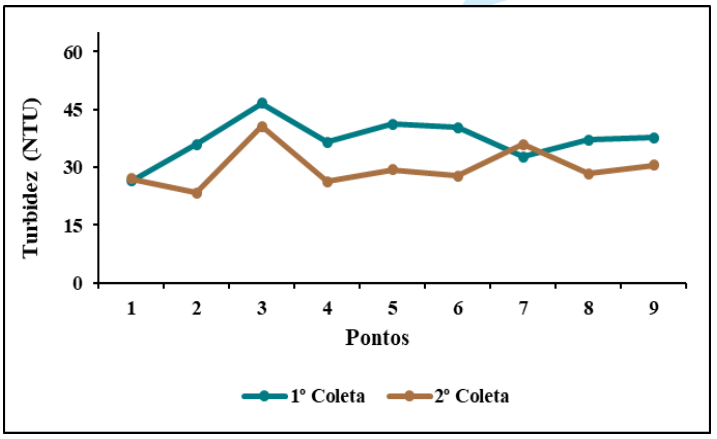


Figura 5 – Turbidez das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas. Fonte: Elaboração Própria.

Os maiores valores de turbidez observados no período mais chuvoso estão em consonância com outros estudos disponíveis na literatura, os quais apontam a precipitação como o principal fator condicionante desse parâmetro. As chuvas intensificam a desagregação e o carreamento de partículas do solo, além de promoverem aumento da vazão e da velocidade da água, o que eleva a quantidade de sólidos em suspensão nos cursos d'água (Penedo et al., 2023; De Arruda et al. 2020).

Com relação aos pontos de análise, o ponto P3 apresentou as maiores médias de turbidez em ambas as coletas. Esse ponto, localizado no furo do Combu, encontra-se sob influência direta de atividades antrópicas, como restaurantes, pousadas e navegação intensa nos furos do Combu e Piriquitaquara.

Essas atividades favorecem a ressuspensão de sedimentos e o aporte de partículas e efluentes, contribuindo para a elevação da turbidez. Em trechos próximos a áreas urbanas e periurbanas, a impermeabilização do solo e o lançamento de efluentes agravam esse processo, ao aumentar o escoamento superficial, o transporte de material particulado e a carga de poluentes, intensificando os impactos sobre a qualidade da água (Mallin, 2023).

For Review

O ponto P7 apresentou o segundo maior valor de turbidez durante o período menos chuvoso, resultado que pode estar relacionado à sua localização em trecho sujeito ao escoamento de sedimentos provenientes de áreas agrícolas nas margens do rio. As práticas de manejo do solo e o escoamento superficial favorecem o carreamento de partículas para o corpo hídrico, promovendo o aumento do material particulado em suspensão e, consequentemente, a elevação dos níveis de turbidez (Sipahutar et al., 2025).

Cor

Na 1ª coleta, os valores de cor variaram entre 180 U.C e 340 U.C (média±DP=237,333±50,374) e na 2ª coleta, os valores estiveram, entre 199 U.C e 334 U.C (média±DP=231,556±41,083), indicando valores mais elevados no período mais chuvoso (Figura 6). Entretanto, o teste de Wilcoxon indicou que não há diferença significativa entre as coletas (p = 0,635).

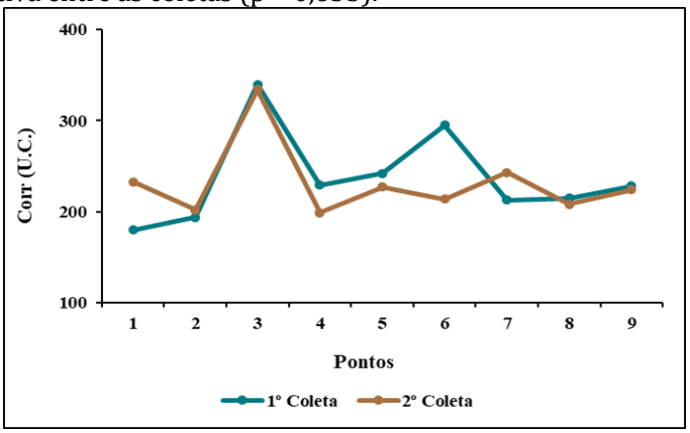


Figura 6 –Cor das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas. Fonte: Elaboração Própria.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece cor verdadeira ≤ 75 mg Pt-Co/L para águas de Classe 2. Neste estudo, foi mensurada a cor aparente (método Pt-Co, sem filtração), dessa forma, os valores não são diretamente comparáveis ao limite legal e foram interpretados por comparação com estudos dispostos na literatura.

Conforme Souza et al. (2023), a cor reflete a aparência da água em função de sólidos dissolvidos, variando por causas naturais (matéria orgânica, íons como Fe e Mn) e antrópicas (efluentes). Esse parâmetro é afetado por decomposição de matéria orgânica, lançamento de esgotos e proliferação de algas, entre outros processos que alteram a composição do sistema aquático.

Oliveira et al. (2025) avaliaram a qualidade da água nos pontos de captação do Rio Guamá e do Lago Bolonha durante cinco meses na estiagem e reportaram cor aparente média de 181,7 uC no Rio Guamá. Os autores demonstram que os valores de turbidez e cor aparente foram aproximadamente 80% maiores no Rio Guamá em relação ao Lago Bolonha e atribuem a redução no lago a processos de sedimentação. Também destacam pressões urbanas no entorno, com lançamentos difusos de esgoto e lacunas de coleta, como fatores que degradam a qualidade da água.

Concernente à análise dos trechos, o ponto P3 apresentou a maior cor em ambas as coletas, seguido do ponto P6 somente no período mais chuvoso. Conforme Zhang et al. (2022), esse padrão é compatível com a contribuição local de matéria orgânica dissolvida e nutrientes provenientes do lançamento de efluentes não tratados, que elevam as substâncias cromóforas e intensificam a coloração da água, frequentemente acompanhada por aumento da turbidez.

Sólidos dissolvidos totais

Na 1ª coleta, os sólidos dissolvidos totais (SDT) variaram de 8,26 a 14,46 mg/L (média±DP=9,562±2,164), na 2ª coleta de 7,76 a 13,25 mg/L (média±DP=8,603±1,749), indicando valores menores no período menos chuvoso (Figura 7). Todos os valores ficaram abaixo do padrão da CONAMA 357/2005 para rios de classe 2 (500 mg/L) e o teste estatístico de Wilcoxon indicou que houve diferença significativa entre os SDT das duas coletas (p=0,007).

For Review

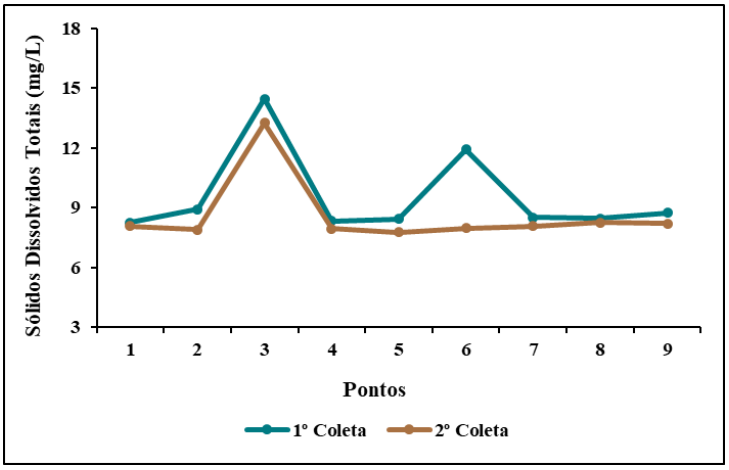


Figura 7 – Teores de Sólidos Dissolvidos Totais das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas. Fonte: Elaboração Própria.

Duncan & Fernandes (2010) encontraram valores médios de sólidos dissolvidos totais (SDT) de 23,9 ± 17,8 mg L^{-1} no rio Amazonas, 7,1 ± 6,7 mg L^{-1} no rio Negro e 7,7 ± 5,6 mg L^{-1} no rio Tapajós. Os valores obtidos neste estudo para o rio Guamá, na Ilha do Combu (9,56 mg L^{-1} no período mais chuvoso e 8,60 mg L^{-1} no menos chuvoso) situam-se no mesmo patamar de baixa mineralização descrito para os rios Negro e Tapajós, e abaixo dos níveis observados no rio Amazonas, indicando um ambiente de águas predominantemente diluídas e com reduzido teor de sais dissolvidos.

Essa proximidade em ordem de grandeza reforça que o trecho avaliado do Guamá apresenta águas pouco mineralizadas, coerentes com a dinâmica de várzea e com o efeito de diluição sazonal evidenciado nas coletas realizadas, ainda que existam diferenças de sítio e abordagem metodológica entre os estudos (Duncan & Fernandes, 2010).

Na análise dos pontos, o ponto P3 novamente apresentou maior criticidade, com maior valor de SDT em ambas as coletas. No período mais chuvoso o ponto P6 foi o segundo maior, assim como na análise da condutividade elétrica, o que está de acordo com estudos recentes que afirmam que os SDT, expressam o grau de mineralização da água e guardam relação direta com a condutividade elétrica, onde valores persistentemente elevados podem indicar salinização ou aporte de contaminantes dissolvidos, enquanto valores baixos sugerem baixa mineralização do corpo hídrico (Pushpalatha et al., 2022).

Metais

Alumínio

Na 1ª coleta (fração total, período mais chuvoso), o alumínio esteve entre 16,89 mg/L e 56,88 mg/L (média±DP=31,312±12,423). Na 2ª coleta (fração dissolvida, período menos chuvoso) os valores foram de 34,65 mg/L a 101,06 mg/L (média±DP =59,637±22,467), evidenciando aumento geral e maior variação entre os pontos (Figura 8). Todos os valores da segunda coleta, comparável com a legislação, ultrapassaram o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas de Classe 2 (0,1 mg/L de Al dissolvido).

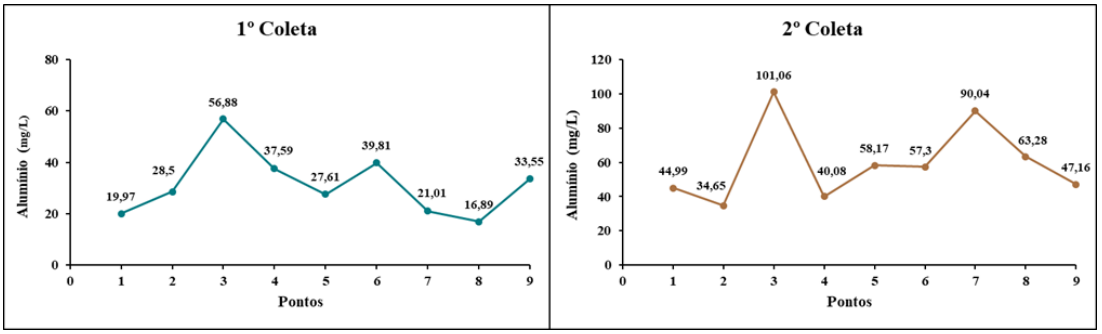


Figura 8 – Teores de Alumínio das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas. Fonte: Elaboração Própria.

Os valores de Alumínio nas diferentes coletas podem ser relacionados à leve queda do pH observada na coleta menos chuvosa, condição que tende a aumentar a solubilidade do alumínio em águas amazônicas levemente ácidas (Quaresma et al., 2022). Embora a 1ª coleta tenha mensurado Al total e a 2ª o Al dissolvido, ainda assim os valores cresceram de forma relevante no período de menos chuvas, sinal de mobilização efetivamente dissolvida de Al (não apenas particulada).

De acordo com Eid et al. (2025), o alumínio pode ser liberado em associação com a matéria orgânica, principalmente após o restabelecimento de condições de baixa força iônica. Nesse contexto, a complexação do alumínio com compostos orgânicos dissolvidos pode manter concentrações elevadas mesmo durante o período menos chuvoso, quando os valores de condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais tendem a diminuir.

Concernente às variações entre os pontos, nota-se que estes refletem o contexto de uso de cada trecho. Os pontos P3 e P6, pressionados por turismo, restaurantes e navegação, aparecem como pontos mais crítico no período mais chuvoso. Os pontos P3 e P7 foram os mais críticos na segunda coleta sendo que o P7 está localizado em áreas próximas a atividades agrícolas. Nesses pontos e coletas registraram-se maiores valores de cor e turbidez, indicadores de aporte de matéria orgânica dissolvida e de partículas finas associados a fontes poluidoras.

For Review

Ferro

Na 1ª coleta, o Ferro apresentou teores entre 16,46 mg/L e 29,96 mg/L (média±DP=22,633±4,046). Na 2ª coleta, os valores estiveram entre 158,33 mg/L e 283 mg/L (média±DP=191,444±39,332), indicando aumento dos teores de Ferro na segunda coleta, período menos chuvoso (Figura 9). Todos os valores da segunda coleta, comparável com a legislação ultrapassaram o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas de Classe 2 (0,3 mg/L de Fe dissolvido).

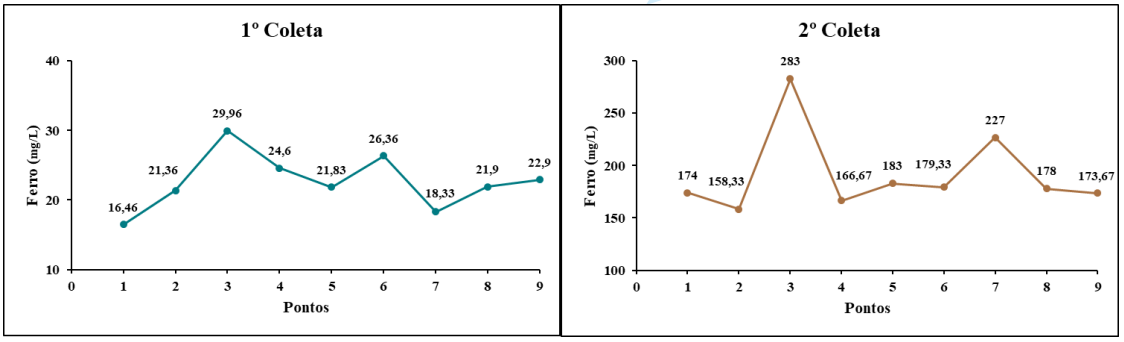


Figura 9 – Teores de Ferro das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas. Fonte: Elaboração Própria.

Segundo Keim et al. (2021), ambientes mais redutores em sedimentos de várzea (como na Ilha do Combu) favorecem a liberação de Fe (II) para a coluna d'água, uma vez que a presença de microrganismos redutores de ferro dissimilatórios promove a redução de Fe (III) para Fe (II). Assim, a leve queda de pH observada no período menos chuvoso também contribui para a maior mobilidade do ferro e para os teores mais elevados registrados nesse período. No período mais chuvoso, os valores, embora menores, também estiveram acima do adequado. Esse comportamento pode decorrer da complexação do metal pela matéria orgânica dissolvida, que o mantém em solução (Logozzo, 2023).

Com relação à distribuição dos teores de ferro entre os pontos de amostragem, observa-se que, assim como na análise dos teores de Alumínio, P3 manteve-se como aquele com os maiores valores em ambas as coletas, acompanhado de P6 na primeira coleta e P7 na segunda. Esse comportamento é compatível com a ressuspensão de sedimentos finos decorrente do tráfego fluvial intenso e do aporte orgânico local, fatores que favorecem a elevação do ferro em solução.

A maior cor e turbidez observadas nesses trechos corroboram esse padrão, o que está em consonância com o descrito por Agostini e Molnár (2025) e Gupta et al. (2023), que destacam que a mobilização e intrusão de sedimentos finos podem intensificar a turbidez e a cor da água.

Manganês

Na primeira coleta, os valores de Manganês estiveram entre 0,03 mg/L e 0,14 mg/L (média±DP=0,058±0,035), todos os valores excederam o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas de Classe 2 (0,01 mg/L de Mn total). Na segunda coleta, os valores foram mais elevados, de 0,51 mg/L a 1,2 mg/L (média±DP=0,629±0,216), demonstrando comportamento semelhante aos outros metais analisados (Figura 10).

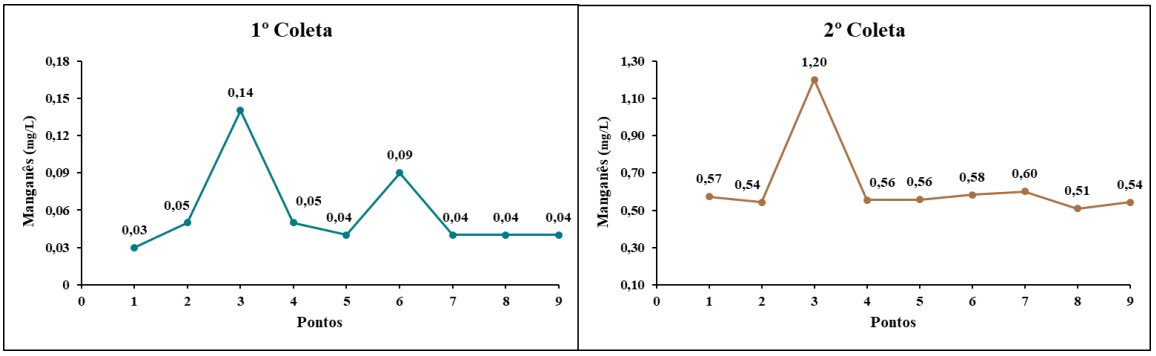


Figura 10 – Teores de Manganês das águas do Rio Guamá ao longo dos pontos analisados nas duas coletas. Fonte: Elaboração Própria.

O ponto P3 apresentou maior teor de manganês nas duas coletas, seguido pelo ponto P6 na primeira coleta. Na segunda coleta ocorreram incrementos consideráveis nos trechos internos da ilha (P4 a P6) e valores intermediários no setor do Acará P7–P9. Ao analisar o manganês nas diferentes variações hidrológicas, pode-se observar que houve aumento entre o período mais chuvoso e o menos chuvoso em todos os pontos.

O comportamento dos metais varia com o pH do solo, por exemplo, o alumínio (Al) e o manganês (Mn) são altamente solúveis e lixiviam mais em solos ácidos, representando maiores riscos (Zhang et al., 2022; Kicińska et al., 2022).

Esse aumento é coerente com rios de várzea amazônico onde há maior escoamento e lixiviação de solos ácidos, ressuspensão de sedimentos finos por variação de vazão e tráfego de embarcações e, principalmente, condições redutoras em sedimentos alagados que convertem manganês em forma mais solúvel e biodisponível, além disso, a leve queda de pH observada na 2ª coleta favorece essa mobilização (Monjardin et al., 2023).

As relações com outros parâmetros reforçam essa leitura. O ponto P3, que apresentou as maiores cor e turbidez e episódios de oxigênio dissolvido mais baixo, também concentrou os maiores teores de Mn, sugerindo participação de matéria orgânica dissolvida e de partículas finas na manutenção do metal em solução (via complexação e microflocos). De acordo com Skurlatov et al. (2020), concentrações elevadas de manganês podem favorecer a formação de espécies de valência mista (Mn^{3+} e Mn^{4+}), capazes de criar um ambiente com elevado potencial oxidante, o que representa risco tóxico para os ecossistemas aquáticos.

Análise da correlação entre parâmetros físico-químicos e metais

As correlações foram calculadas ponto a ponto (n=9) e as matrizes confirmam os resultados obtidos na pesquisa. O parâmetro de salinidade não foi adicionado à matriz de correlação por ausência de variação entre amostras. Em ambas as coletas a condutividade elétrica e os sólidos dissolvidos totais apresentaram correlação muito forte e positiva, assim como a correlação da condutividade elétrica e cor (Tabela 3 e Tabela 4). Esse padrão é coerente com as análises físico-químicas: quando a mineralização (SDT) e a força iônica (CE) aumentam, os valores de cor tendem a aumentar.

O oxigênio dissolvido mostrou, nas duas coletas, correlações fortes a muito fortes e negativas com condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais e cor. Esses resultados reforçam que, onde há maior cor e mineralização, o oxigênio dissolvido tende a reduzir, seja por consumo biogeoquímico (oxidação de matéria orgânica e espécies ferrosas), seja por menor reaeração local.

A turbidez atuou como indicador de partículas e metais. Na primeira e na segunda coleta, as correlações foram fortes a muito fortes e positivas. O alinhamento com os resultados descritos neste trabalho se confirma, pontos com maior turbidez (como P3) concentram mais metais e cor, compatível com ressuspensão de partículas finas e presença de matéria orgânica dissolvida e hidróxidos metálicos.

For Review

Os metais demonstraram forte associação com cor, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais nas duas coletas. Estatisticamente, confirma-se o padrão: mais cor/mineralização = mais metais. As relações inversas entre OD e metais reiteram o papel de carga orgânica/particulada e de reações redox consumindo oxigênio.

Tabela 3 - Matriz de correlação entre os parâmetros físico-químicos e metais da 1° coleta (n=9)

	pH	OD	CE	NTU	STD	COR	AL	FE	MN
pH	1								
OD	0.375	1							
CE	-0.305	-0.971*	1						
NTU	-0.023	-0.661	0.690	1					
STD	-0.309	-0.964*	0.999*	0.709*	1				
COR	-0.293	-0.901*	0.915*	0.860*	0.923*	1			
AL	0.020	-0.776*	0.844*	0.758*	0.853*	0.873*	1		
FE	0.035	-0.774*	0.804*	0.901*	0.816*	0.905*	0.904*	1	
MN	-0.283	-0.931*	0.980*	0.750*	0.987*	0.929*	0.893*	0.865*	1

*Correlações significativas

pH = potencial hidrogeniônico; OD = oxigênio dissolvido; CE = condutividade elétrica; SDT = sólidos dissolvidos totais; NTU = turbidez; COR; Al = alumínio; Fe = ferro; Mn = manganês. Fonte: Autores (2018).

Tabela 4 - Matriz de correlação entre os parâmetros físico-químicos e metais da 2° coleta (n=9)

	pH	OD	CE	NTU	STD	COR	AL	FE	MN
pH	1								
OD	-0,788*	1							
CE	0,760*	-0,943*	1						
NTU	0,536	-0,637	0,828*	1					
STD	0,810*	-0,956*	0,991*	0,775*	1				
COR	0,705*	-0,877*	0,956*	0,890*	0,936*	1			
AL	0,456	-0,602	0,770*	0,944*	0,703*	0,813*	1		
FE	0,622	-0,800*	0,926*	0,958*	0,876*	0,948*	0,941*	1	
MN	0,791*	-0,970*	0,990*	0,760*	0,996*	0,935*	0,691	0,873*	1

*Correlações significativas

pH = potencial hidrogeniônico; OD = oxigênio dissolvido; CE = condutividade elétrica; SDT = sólidos dissolvidos totais; NTU = turbidez; COR; Al = alumínio; Fe = ferro; Mn = manganês. Fonte: Autores (2018).

For Review

Com relação ao pH, na primeira coleta as correlações com os demais descritores foram fracas ou muito fracas e não significativas, corroborando que a acidez/alcalinidade não controlou as variações naquele período. Na segunda coleta, o pH apresentou correlações fortes e positivas com condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais, cor e manganês e forte negativa com oxigênio dissolvido.

As intercorrelações entre os próprios metais também acompanharam o esperado. Na primeira coleta, AL–FE r=0,904 (muito forte) e AL–MN r=0,865 (forte); FE–MN r=0,865 (forte). Na segunda coleta, FE–MN r=0,873 (forte), enquanto AL–FE e AL–MN foram moderadas (r=0,691 em ambos os casos). Esses resultados indicam que os metais co-ocorrem onde há maior turbidez, cor e mineralização.

Ademais, verifica-se que a coerência dos trechos também se mantém nas matrizes. O P3 (furo do Combu) apresenta cor, turbidez, metais, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais elevados, refletindo as correlações altas entre esses descritores. No setor do Acará, o destaque de P7 no período menos chuvoso é compatível com a associação metais, turbidez, cor, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais e com correlações negativas com oxigênio dissolvido.

For Review

Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que a qualidade das águas superficiais, na APA Ilha do Combu, é diretamente influenciada pelas pressões antrópicas associadas às atividades urbanas, turísticas e agrícolas. Observou-se que, apesar de a maioria dos parâmetros físico-químicos permanecerem dentro dos limites da Resolução CONAMA nº 357/2005, alguns indicadores apresentaram valores críticos, principalmente na segunda coleta, período menos chuvoso, quando houve aumento significativo das concentrações de metais. Essa variação demonstra o papel do regime hidrológico amazônico na mobilização e transporte de partículas e substâncias dissolvidas, mas também aponta a persistência de fontes de contaminação localizadas e difusas ao longo do rio Guamá e de seus furos.

Os pontos situados no interior da ilha e próximo ao rio Acará destacaram-se como os mais impactados, esses resultados evidenciam a necessidade de um monitoramento contínuo que inclua parâmetros físico-químicos e teores de metais, além da implementação de medidas de mitigação, como o tratamento de efluentes e a recuperação de áreas ripárias.

Portanto, o estudo contribui para o entendimento das dinâmicas de qualidade da água em ecossistemas de várzea amazônica sob influência antrópica e regime hidrológico, oferecendo base para estudos técnicos e científicos para o manejo sustentável da APA Ilha do Combu e de outras áreas semelhantes. Recomenda-se a ampliação das análises para outros metais e parâmetros biológicos, além do estabelecimento de séries temporais mais longas, a fim de aprimorar a avaliação da flutuação hidrológica ou variabilidade temporal e dos impactos cumulativos sobre os recursos hídricos da região.

Referências

Agostini, L., & Molnár, P. (2025). New methods for the identification of fine sediment sources: from the discharge-turbidity relation to a reach scale understanding.

American Public Health Association (APHA). (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). Washington, D.C.

Aprile, F., Darwich, A. J., & Siqueira, G. W. (2023). Water typology in the Amazon: Close correlation with the hydrogeochemistry of river basins. Journal of Applied Life Sciences International, 26, 74–86.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (1987). NBR 9898: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores — Procedimento. Rio de Janeiro.

Bawra, B., & Pawar, M. (2023). Mudanças na gestão e governança de sistemas de água doce. In IGI Global (pp. 1–21).

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). (2005, 17 de março). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Brasília, DF. Recuperado em 18 de setembro de 2025, de https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/CONAMA_357.pdf

Cardoso, R. R., Santos, P. F., & Lobato, R. G. (2023). Análise da qualidade de água em comunidades ribeirinhas na Amazônia Paraense e suas implicações para a saúde pública e ambiental. Contribuciones a las Ciencias Sociales, 16, 5709–5730.

Cardozo, M. L., Diniz, M. B., & Szlafsztein, C. F. (2022). Os serviços ecossistêmicos dos recursos hídricos da Bacia Amazônica como bens públicos globais. Agua y Territorio, 21.

Carneiro, C. R. O Ribeiro, H. M. C., Nazaré, D., Pantoja, S. M., & da Silva, D. F. (2022). Water quality of Guamá River in the surroundings of an insular environmental protection area in Belém - Pará, Brazil. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 9, 493–501.

Carvalho, A. C. L., & Rocha, G. M. (2020). Análise dos riscos e da vulnerabilidade socioambiental urbana, face ao desenvolvimento desordenado e à pressão aos recursos hídricos em Belém – PA. Revista Brasileira de Geografia Física, 6, 18127–18142.

Chaudhary, A., & Dwivedi, A. (2024). Instrumental testing of quality of water (pp. 417–439). [S.l.: s.n.].

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) & Agência Nacional de Águas (ANA). (2011). Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. São Paulo; Brasília.

Costa, L. M., Pereira, D. S., & Oliveira, J. F. (2015). Dinâmica de uso da terra e impactos ambientais na Ilha do Combu-PA: um estudo das práticas econômicas e suas consequências. Revista Brasileira de Estudos Sociais e Ambientais, 22. Recuperado em 13 de outubro de 2025, de https://www.periodicos.unc.br/index.php/sma/article/view/903/597

De Arruda, J. L., Marques, A. C. A., & Pinto Junior, O. B. (2021). Qualidade de água do rio Cuiabá no perímetro urbano da capital mato-grossense. Revista Brasileira de Geografia Física, 24, 158–164.

Duarte, R. M., & Val, A. L. (2020). Water-related problem with special reference to global climate change in Brazil. In Water Conservation and Wastewater Treatment in BRICS Nations (pp. 3–21).

Duncan, W. P., & Fernandes, M. N. (2010). Physicochemical characterization of the white, black, and clearwater rivers of the Amazon Basin and its implications on the distribution of freshwater stingrays. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, 5. Recuperado em 13 de outubro de 2025, de https://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_5(3)_454-464.pdf

For Review

Dutra, V. A. B, Tavares, P. A., & de Lima, A. M. M. (2022). Anthropogenic environmental pressures in urban conservation units: a case study in Belém, Brazilian eastern Amazon. International Journal of Hydrology, 6, 131–139.

Eid, R., Ritschel, T., Guhra, T., Papsdorf, R., & Totsche, K. (2025). Coaction of dissolved organic matter and electrolyte fluctuations on Al and Fe dynamics in matured podzols – what matters more? In EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025 (p. EGU25-18172).

Figueredo, N. (2023). Marges i moviment: entre l'urbà i el ribeirinho en una ciutat amazònica. Quaderns-e. Quaderns de l'Institut Català d'Antropologia.

Grizzetti, B., & Poikāne, S. (2024). The importance of inland waters. Elsevier BV, 7–13.

Gupta, L. K., Pandey, M., Raj, P. A., & Shukla, A. K. (2023). Fine sediment intrusion and its consequences for river ecosystems: a review. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 27, 1.

Hameed, M., Dijoo, Z. K., Bhat, R. A., & Qayoom, I.. (2020). Concerns and threats of heavy metals' contamination on aquatic ecosystem. Springer, Cham, 1–19.

Keim, C. N., Serna, J. D., Acosta-Avalos, D., Neumann, R., Silva, A. S., Jurelevicius, D. A., ... & Farina, M. (2021). Dissimilatory Iron-reducing microorganisms are present and active in the sediments of the Doce River and tributaries impacted by Iron mine tailings from the collapsed Fundão dam (Mariana, MG, Brazil). Minerals, 11, 244.

Kicińska, A., Pomykala, R., & Izquierdo-Diaz, M. (2022). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. European Journal of Soil Science, 73, e13203.

Logozzo, L. (2023). Seasonal concentrations and fluxes of dissolved, soluble, and colloidal Fe and organic matter.

Maier, J., Visser, A. N., Schubert, C. M., Wander, S. T., & Barth, J. A.. (2025). Hydrodynamic and primary production effects on seasonal DO variability in the Danube River. Biogeosciences, 22, 5123–5137.

Mallin, M. A. (2023). Ecology and pollution of urban streams. Oxford University Press, 325–348.

Marcé, R., Gómez-Gener, L., & Carey, C. C. (2024). Oxygen. Elsevier BV, 237–274.

Marcheva, Z., Matev, S., Krenchev, D., & Simeonova, B.. (2024). Seasonal variation of dissolved oxygen in river water in an urbanized area: example of the Vladayska River. Review of the Bulgarian Geological Society, 85, 79–87.

Marinho, E. R., Vitorino, M. I., Barbosa, I. C. C., Costa, L. G. S., Santos, M. R. S., & Souza, H. E. N.. (2020). As atividades antrópicas na modulação da qualidade de água do rio Guamá, em São Miguel do Guamá, Pará. Revista Brasileira de Geografia Física, 13, 182–195.

McCabe, K. M., Smith, E. M., Lang, S. Q., Osburn, C. L., & Benitez-Nelson, C. R.. (2021). Particulate and dissolved organic matter in stormwater runoff influences oxygen demand. Environmental Science & Technology, 55, 952–961.

Mikkola, H. (Ed.). (2024). Amazon ecosystem—past discoveries and future prospects. BoD – Books on Demand.

Momin, I., & Mohammed, S. (2020). Analysis of oxygen utilization and its effects. 2, 30–32.

Monjardin, C. E. F., Power, C., & Senoro, D. B. (2023). Spatio-temporal assessment of manganese contamination in relation to river morphology. Sustainability, 15, 8276.

For Review

Mukherjee, S., Rizvi, S. S., Biswas, G., Paswan, A. K., Vaiphei, S. P., Warsi, T., & Mitran, T. (2023). Aquatic eco-systems under influence of climate change and anthropogenic activities: potential threats and its mitigation strategies. In: Hydrogeochemistry of Aquatic Ecosystems, (pp. 307–331).

Nogueira, L. F. de S., Costa, A. D., de Oliveira, R. D., de Oliveira, R. D., da Silva, J. A. L., Rodrigues, E. T., Leão, A. P., & Costa, T. D. (2023). Paisagens fluviais na cidade de Belém-Pará-Brasil: uma análise da dinâmica hidrográfica. Contribuciones a las Ciencias Sociales, 16, 25669–25687.

Oliveira, V. S., de Oliveira, A. S., Pinto, P. V. C., Lima, J. M. P., & Teixeira, L. C. G. M. (2025). Avaliação da qualidade das águas nos mananciais de abastecimento da Região Metropolitana de Belém-PA: Rio Guamá e Lago Bolonha. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (CBESA).

Penedo, P. H. S., de Oliveira Garcia, G., Cecílio, R. A., Zanetti, S. S., & de Oliveira Roza, M. P.. (2023). Relação entre precipitação e turbidez em cursos d'água no Espírito Santo. Caminhos de Geografia, 24, 132–152.

Placencia, J. A., Torres Ramírez, P., Ortiz Riquero, J., & Jerez, R. (2023). Temporal and spatial changes in surface water chemistry in a Mediterranean river of central Chile. Tecnología y Ciencias del Agua, 14(2).

Pushpalatha, N., Sreeja, V., Karthik, R., & Saravanan, G. (2022). Total dissolved solids and their removal techniques. 2, 13–20.

Quaresma, L. S., Silva, G. D. S. E., Sahoo, P. K., Salomão, G. N., & Dall'Agnol, R. (2022). Source apportionment of chemical elements and their geochemical baseline values in surface water of the Parauapebas river basin, southeast Amazon, Brazil. Minerals, 12, 1579.
Rekha, R. (2023). Trace metals in the aquatic environment and their effect on aquatic life and human body. International Journal of Science and Research.

Ren, C., & Liu, L. (2024). Under the strong influence of human activities: patterns and controlling factors of river water chemistry. Water, 16, 1886.

Roy, B., Bhunia, B., Bandyopadhyay, T. K., Khan, S. A., Nandi, N. B., & Nath, P. C. (2024). Water pollution by heavy metals and their impact on human health. 333–352.

Silva, N. J. A., Correia, V. M. S., & Correia, M. L. V. (2025). Impacts of anthropogenic actions on Açude do Saco: diagnosis for environmental preservation and recovery. RGSA: Revista de Gestão Social e Ambiental, 19, e010870.

Silva, L. M., Oliveira, T. C. S., & Machado, C. M. D. (2012). Estudo da correlação entre o oxigênio dissolvido e a matéria orgânica em diferentes ambientes aquáticos da região Amazônica. Universidade Federal do Amazonas.

Silva, R. L., Lima, P. S., & Almeida, J. M. (2012). Qualidade da água em rios de áreas urbanas no Brasil: desafios e oportunidades para o gerenciamento de recursos hídricos. Revista Brasileira de Gestão Ambiental, 14, 415–429.

Singh, V. P., & Babu, K. G. (2023). Ecological risk assessment of heavy metal pollution in water resources. 281–297.

Sipahutar, L., Prayogo, T. B., & Yuliani, E. (2025). Investigasi tingkat pencemaran daerah aliran Sungai Brantas akibat aktivitas agrikultur serta perubahan musim di Indonesia. Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air, 1, 416–426.

Skurlatov, Y. I., Shtamm, E. V., Travin, S., Shvydkiy, V. O., & Semenyak, L. V. (2020). Role of oxidation-reduction processes in formation of toxic properties of natural aqueous environment. IGI Global, 149–163.

For Review

Srivastava, P., & Sahgal, M. (2023). Freshwater pollution: overview, prevention, and control. In Current Status of Fresh Water Microbiology (pp. 359–365).

Sudan, A., Ghosh, A., Verma, M., & Tomar, P. (2024). Impact of water pollution & perspective techniques to mitigate it: An overview. Handbook of water pollution, 29-64.

Sultana, A. (2025). Temporal variability of water quality parameters: surface and groundwater contamination. International Journal of Innovations in Science, Engineering and Management, 112–122.

Sousa, R. M., Silva, J. S., & Costa, F. G. (2019). Transformações ambientais e sociais nas comunidades Combu e Piriquitaquara: o impacto das atividades econômicas. Revista de Geografia e Ciências Ambientais, 16. Recuperado em 13 de outubro de 2025, de https://periodicos.ufpa.br/index.php/nra/article/download/12015/pdf

Souza, G. S., Soares, P. M., & Magri, R. A. F. (2023). Análise física e química da água do Córrego do Sabão, Município de Passos, Minas Gerais, Brasil. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 10, 197–206.

Souza, L. G., & Vitorino, M. I. (2020). Estudo da qualidade das águas do Rio Pedreira, Amapá: caracterização físico-química e comparação entre períodos de seca e cheia. Revista de Estudos Ambientais, 12, 210–220.

Virtanen, K. (2020). Áreas protegidas e urbanização: o caso da APA da Ilha do Combu, Belém (PA).

Zhang, Y., Pan, R., Ren, Y., & Cheng, D. (2022). Photochemical and microbial alteration of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in aquatic ecosystems. Journal of Lake Sciences, 34, 1550–1561.

Zhang, Y., Pan, T., Li, C.-X., Zheng, D., Sun, Y., & Zhang, X.-Z. (2022). Double bacteria synergistic catalytic reduction system for heavy metal detoxification treatment. Nano Letters, 22, 5575–5583.

For Review

5 CONCLUSÃO GERAL

Os resultados desta pesquisa evidenciam que os corpos hídricos da Amazônia paraense, em diferentes ambientes aquáticos, apresentam elevada vulnerabilidade ambiental, decorrente da interação complexa entre pressões antrópicas e processos naturais. A análise dos achados literários e dados empíricos revelou concentrações elevadas de metais pesados, Pb, Hg, Cu, As, Cd e Cr , com destaque para Pb e Hg, presente em cerca de 60% dos estudos realizados nos últimos 20 anos, evidenciando uma problemática histórica que persiste na região devido à elevada carga de efluentes industriais, urbanos e comerciais.

As análises físico-químicas realizadas no rio Guamá indicaram que a maioria dos parâmetros se mantém dentro dos limites da Resolução CONAMA nº 357/2005; entretanto, metais pesados ultrapassaram os limites permitidos para Classe 2 em praticamente todos os pontos e períodos amostrados, refletindo na classificação ruim do Índice de Qualidade da Água (IQA-CCME). Observou-se que os períodos menos chuvosos apresentaram aumento significativo das concentrações de metais, evidenciando o papel central do regime hidrológico amazônico na mobilização e transporte de partículas e substâncias dissolvidas. Além disso, fatores antrópicos, como o baixo índice de saneamento básico, descarte inadequado de esgotos, ocupação desordenada e intensa navegação fluvial, contribuem para a ressuspensão de sedimentos contaminados e a liberação de metais na coluna d'água. Características naturais do rio, como pH levemente ácido e perfil geológico da bacia, favorecem a solubilização desses elementos, intensificando o impacto ambiental.

Os pontos situados no interior da ilha (P3) e nas margens do rio Acará (P7–P9) destacaram-se como os mais impactados, apresentando maiores concentrações de metais (especialmente Al, Fe e Mn), elevada turbidez e cor aparente, além de menores valores de oxigênio dissolvido. Esses resultados refletem a sobreposição de pressões urbanas e rurais, associadas às atividades turísticas, agrícolas e à ocupação desordenada das margens, que intensificam a liberação e a ressuspensão de contaminantes na coluna d'água. Em contrapartida, os demais pontos apresentaram condições relativamente menos degradadas, ainda que sob influência difusa de efluentes e resíduos urbanos, evidenciando a heterogeneidade espacial dos impactos dentro da unidade de conservação.

Além disso, este estudo contribui para a compreensão das dinâmicas de qualidade da água em ecossistemas de várzea amazônica sob influência combinada de pressões antrópicas e hidrológicas, oferecendo subsídios para o manejo sustentável da APA Ilha do Combu e de outras áreas similares. Recomenda-se ampliar futuras análises para outros metais e parâmetros biológicos, bem como estabelecer séries temporais mais longas, a fim de avaliar adequadamente a variabilidade hidrológica, os impactos cumulativos e o efeito de longo prazo das atividades humanas sobre os recursos hídricos da região.

A pesquisa evidencia a necessidade de políticas públicas e fiscalização ambiental efetivas, capazes de mitigar a contaminação química e proteger a qualidade da água, a biodiversidade e a segurança das populações tradicionais da Amazônia paraense.

Universidade do Estado do Pará
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
Curso de Doutorado em Ciências Ambientais
Tv. Enéas Pinheiro, 2626, Marco, Belém-PA, CEP: 66095-100
https//propesp.uepa.br/ppgca