

DETERMINAÇÃO DE MERCÚRIO TOTAL EM AMOSTRAS DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO/BA: DIAGNÓSTICO ANALÍTICO E AMBIENTAL POR CVAAS

Nathália Virgínia Ferreira Pereira¹;

¹Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/0471659744788008>

Lindomar Maria de Souza²;

²Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/0460274690902335>

Michelle Ádila Silva dos Reis³;

³Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/6821977152045678>

Matheus Andrade Rocha Costa⁴;

⁴Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/0269073658419341>

Vinícius Humberto da Silva Bezerra⁵;

⁵Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/4971936235798382>

Neura Mendes da Silva⁶;

⁶Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/5572921381396407>

Luciana Maria Herculano da Silva⁷;

⁷Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/8198199345503144>

Amanda Katielly Jordão Pessoa Felix da Silva⁸;

⁸Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/0600207134536458>

Raphael Henrique de Moura Pereira⁹;

⁹Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/5600183954524705>

Karolyne Santos da Silva¹⁰;

¹⁰Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/3100689264595769>

Ayrton Felipe da Silva Serafim de Souza¹¹;

¹¹Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/3697597043377196>

Elvis Joacir De França¹².

¹²Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/1716496767364751>

RESUMO: A construção de grandes reservatórios artificiais, como a Barragem de Sobradinho, no norte da Bahia, apesar de garantir segurança hídrica e desempenhar papel estratégico no Nordeste brasileiro, altera drasticamente o regime hidrodinâmico regional, modificando padrões de deposição sedimentar e gerando ambientes biogeoquímicos favoráveis à retenção, metilação e liberação de metais potencialmente tóxicos para a coluna d'água. Dentre esses contaminantes, destaca-se o mercúrio (Hg), por sua persistência ambiental e capacidade de bioacumulação. Este capítulo objetiva determinar e avaliar as concentrações de mercúrio total (HgT) em amostras de água coletadas de 22 pontos georreferenciados no Reservatório de Sobradinho, mapeando a variabilidade espacial e vertical entre 0 e 10 cm de profundidade. O preparo, a descontaminação de materiais e a determinação quantitativa de HgT por Espectrometria de Absorção Atômica com Geração de Vapor Frio (CVAAS) seguiram o protocolo de Akagi e Nishimura (1991). Os resultados revelaram teores de HgT entre 0,00350 e 0,19916 µg/L. Nenhuma das 29 amostras ultrapassou o Valor Máximo Permitido (VMP) de 0,2 µg/L estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces. Conclui-se que, apesar dos valores dentro do esperado, faz-se necessário o monitoramento contínuo, devido o potencial de bioacumulação de Hg em ambientes lênticos.

PALAVRAS-CHAVE: HgT. Monitoramento hídrico. CVAAS.

DETERMINATION OF TOTAL MERCURY IN WATER SAMPLES FROM THE SOBRADINHO RESERVOIR/BA: ANALYTICAL AND ENVIRONMENTAL DIAGNOSIS BY CVAAS

ABSTRACT: The construction of large artificial reservoirs, such as the Sobradinho Dam in northern Bahia, while guaranteeing water security and playing a strategic role in the Brazilian Northeast, drastically alters the regional hydrodynamic regime, modifying sedimentary deposition patterns and generating biogeochemical environments favorable to the retention, methylation, and release of potentially toxic metals into the water column. Among these contaminants, mercury (Hg) stands out due to its environmental persistence and bioaccumulation capacity. This chapter aims to determine and evaluate the concentrations of total mercury (HgT) in water samples collected from 22 georeferenced points in the Sobradinho Reservoir, mapping the spatial and vertical variability between 0 and 10 cm depth. The preparation, decontamination of materials, and quantitative determination of HgT by Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry (CVAAS) followed the protocol of Akagi and Nishimura (1991). The results revealed total mercury (HgT) levels between 0.00350 and 0.19916 µg/L. None of the 29 samples exceeded the Maximum Permissible Value (MPV) of 0.2 µg/L established by CONAMA Resolution No. 357/2005 for freshwater. It is concluded that, despite the values being within the expected range, continuous monitoring is necessary due to the potential for bioaccumulation of Hg in lentic environments.

KEY-WORDS: HgT. Water monitoring. CVAAS.

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos superficiais desempenham papel estratégico para o abastecimento humano, a geração de energia, a irrigação agrícola e a manutenção dos ecossistemas aquáticos, especialmente em regiões semiáridas, onde grandes reservatórios artificiais tornam-se fundamentais para a segurança hídrica e o desenvolvimento socioeconômico. Nesse contexto, o Reservatório de Sobradinho, localizado no norte do estado da Bahia e integrante da Bacia do Rio São Francisco, destaca-se como um dos maiores reservatórios artificiais da América Latina, exercendo importância central para a geração hidroelétrica, regularização de vazão e abastecimento regional (Pavese, 1984). Entretanto, a construção e operação desses grandes empreendimentos promovem alterações hidrodinâmicas e sedimentares capazes de modificar significativamente os processos biogeoquímicos naturais dos corpos hídricos.

As mudanças nas características físico-químicas da coluna d'água e do sedimento favorecem a retenção, redistribuição e transformação de diversos contaminantes ambientais, entre eles os metais potencialmente tóxicos. Dentre esses elementos, o mercúrio (Hg) merece destaque devido à sua elevada persistência ambiental, toxicidade e capacidade

de bioacumulação e biomagnificação ao longo das cadeias tróficas aquáticas (Al-Sulaiti; Soubra; Al-Ghouti, 2022). Em ambientes aquáticos, o Hg pode sofrer processos de metilação mediados por microrganismos anaeróbios, originando o metilmercúrio (MeHg), composto altamente tóxico e com grande afinidade pelos tecidos biológicos, representando riscos ecológicos e à saúde humana, principalmente por meio do consumo de pescado contaminado (Amap/Un Environment, 2019; Basta *et al.*, 2023).

As fontes de introdução do mercúrio nos ecossistemas aquáticos podem ser tanto naturais quanto antrópicas. Em escala global, destacam-se emissões atmosféricas provenientes de atividades industriais, mineração, combustão de combustíveis fósseis, queimadas e até processos vulcânicos naturais (Geyman *et al.*, 2023). Em reservatórios artificiais, as características hidrodinâmicas de baixa circulação e maior deposição sedimentar contribuem para a retenção do metal no sistema, funcionando como áreas de acúmulo e potencial remobilização sazonal do contaminante. Dessa forma, faz-se necessário o monitoramento contínuo, considerando o potencial de bioacumulação de Hg em ambientes lânticos.

No Brasil, o monitoramento da qualidade das águas superficiais é regulamentado pela Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece limites máximos permitidos para diferentes substâncias químicas em corpos hídricos. Para águas doces de Classe 2, o valor máximo permitido para mercúrio total é de 0,2 µg/L (BRASIL, 2005). Complementarmente, a Resolução CONAMA nº 430/2011 reforça a necessidade do controle contínuo de contaminantes potencialmente tóxicos em sistemas aquáticos, visando à preservação ambiental e à proteção da saúde pública (BRASIL, 2011). Nesse cenário, estudos voltados à quantificação de mercúrio em reservatórios estratégicos tornam-se essenciais para subsidiar ações de gestão ambiental e monitoramento contínuo da qualidade hídrica.

A determinação analítica de mercúrio em níveis de ultra-traço requer metodologias altamente sensíveis e seletivas. A técnica de Espectrometria de Absorção Atômica com Geração de Vapor Frio (CVAAS) destaca-se amplamente em análises ambientais pela elevada sensibilidade, precisão analítica e capacidade de quantificação de Hg em baixíssimas concentrações (Agilent Technologies, 2010). Associada ao protocolo de preparo e descontaminação de materiais descrito por Akagi e Nishimura (1991), essa abordagem instrumental permite maior confiabilidade metrológica e rastreabilidade analítica na avaliação de mercúrio total em matrizes aquáticas.

Diante da relevância ambiental e estratégica do Reservatório de Sobradinho, bem como dos potenciais impactos associados à presença de mercúrio em ecossistemas aquáticos continentais, torna-se indispensável o monitoramento sistemático desse contaminante. Assim, este estudo busca determinar as concentrações de mercúrio total (HgT) em amostras de água coletadas em diferentes pontos do Reservatório de Sobradinho/BA, avaliando sua distribuição espacial e vertical, além de verificar a conformidade dos

resultados obtidos em relação aos limites estabelecidos pela legislação ambiental brasileira vigente.

OBJETIVO

Este capítulo tem como objetivo determinar as concentrações de mercúrio total (HgT) na coluna d'água do Reservatório de Sobradinho/BA por meio da técnica de CVAAS, realizando um diagnóstico analítico e ambiental que avalie a variabilidade espacial e vertical (microgradientes) do contaminante frente aos limites estabelecidos pelas Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011.

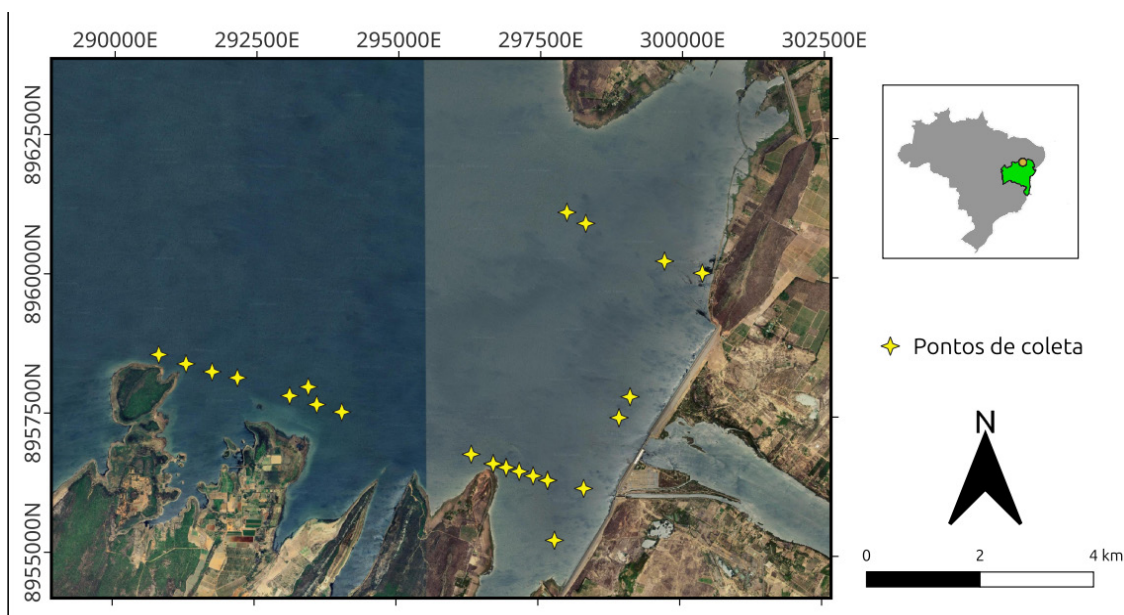
METODOLOGIA

A investigação abordada neste trabalho assume uma abordagem quantitativa, pautada na mensuração instrumental precisa e no tratamento estatístico-descritivo de dados numéricos de concentração química. Quanto à sua natureza, define-se como uma pesquisa aplicada, voltada à produção de diagnósticos estruturados sobre a qualidade de um recurso hídrico estratégico. Assumindo um caráter descritivo-explicativo, utiliza a distribuição vertical e espacial do contaminante como meio para elucidar mecanismos biogeoquímicos que influenciam em sua dispersão. Operacionalmente, a pesquisa é caracterizada como um levantamento analítico associado a uma pesquisa de campo e de caráter experimental laboratorial.

Foram estabelecidos 22 pontos de coleta georreferenciados, sendo 18 pontos analisados em diferentes profundidades (0; 5 e 10 cm), totalizando 29 amostras. As profundidades selecionadas para análise correspondem a camadas mais superficiais da coluna d'água por representar uma área de maior interação na interface atmosfera e corpo hídrico, tendo, portanto, maior probabilidade de deposição de contaminantes.

Os 22 pontos de amostragem georreferenciados estão destacados na Figura 1, abrangendo 18 perfis de profundidade codificados de A1 a A18, delineados às margens da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, Bahia.

Figura 1: Pontos de amostragem de perfis de águas.

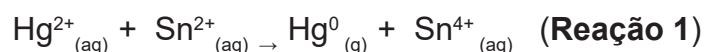


Fonte: Os autores (2026).

Visando mapear a dispersão do analito, as coletas foram delimitadas em 3 pontos verticais da coluna d'água: superfície (0 cm), profundidade intermediária (5 cm) e profundidade inferior (10 cm). Para a coleta, utilizou-se garrafas de amostragem vertical do tipo Van Dorn. As alíquotas foram transferidas para frascos de borossilicato e imediatamente acidificadas com solução de ácido nítrico (HNO_3) a 10% v/v, como agente preservante para fixação química do metal, mantidas sob refrigeração ($T < 5^\circ\text{C}$), a fim de reduzir perdas por difusão ou adsorção nas paredes do recipiente. Todos os materiais e vidrarias utilizados foram previamente descontaminados, utilizando o protocolo estabelecido por Akagi e Nishimura (1991).

Devido à natureza da amostra, não foi necessário realizar a etapa de digestão química ácida para converter o mercúrio à sua forma iônica divalente (Hg^{2+}), mais estável. Sendo necessário apenas o procedimento de adequação do meio reacional, realizado através de uma solução de cloridrato de hidroxilamina ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, 30% v/v), juntamente com a adição de ácido clorídrico concentrado (HCl , 12M), para manutenção do meio ácido estabilizado, necessário para a reação de oxirredução posterior.

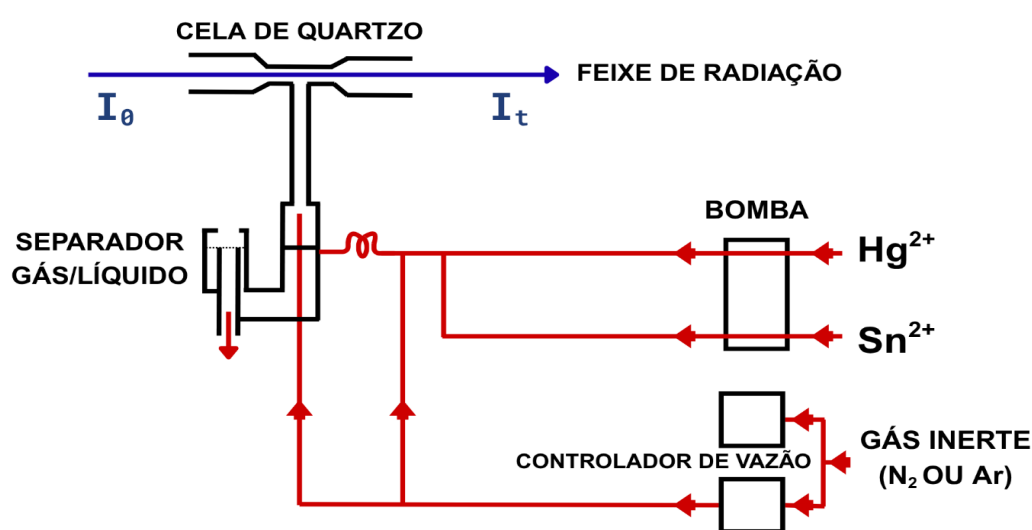
A determinação de mercúrio total (HgT) foi conduzida em um sistema de Espectrometria de Absorção Atômica com Geração de Vapor Frio (CVAAS). No interior do módulo VGA-77, a redução química do Hg^{2+} , dissolvido na amostra, para a sua forma gasosa e livre, Hg^0 , foi realizada a partir de uma reação de oxirredução promovida por uma solução de cloreto de estanho (II) – SnCl_2 , a 25%, preparado em meio ácido (HCl , 12M). A reação segue o seguinte formato:



O vapor de Hg^0 gerado é arrastado por um fluxo constante de gás argônio de alta pureza (5.0 analítico) para o interior de uma célula de quartzo de caminho óptico longo. A medição da absorbância ocorre em comprimento de onda de 253,7 nm (Agilent Technologies, 2010). Os detalhes do fluxo do VGA-77 podem ser verificados na figura abaixo.

A construção da curva de calibração linear externa, foi feita em 5 pontos distintos (0,0; 0,3; 2,0; 6,0 e 10,0 $\mu\text{g/L}$), com um coeficiente de correlação (R^2) superior a 0,998, e verificação periódica dos padrões de controle. A Concentração Mínima Determinada (CMD) foi calculada com base no desvio padrão dos brancos analíticos, assegurando o rigor e a rastreabilidade das medições experimentais (Albertazzi Junior; Sousa, 2018).

Figura 2: Diagrama de fluxos de sistema de geração de hidretos.



Fonte: Adaptado de Agilent Technologies (2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de HgT obtidos foram confrontados com os padrões normativos estipulados através da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005, a fim de diagnosticar a segurança ambiental da Bacia de Sobradinho. O marco legal fixa o Valor Máximo Permitido (VMP) para águas doces de Classe 2 em 0,2 $\mu\text{g/L}$.

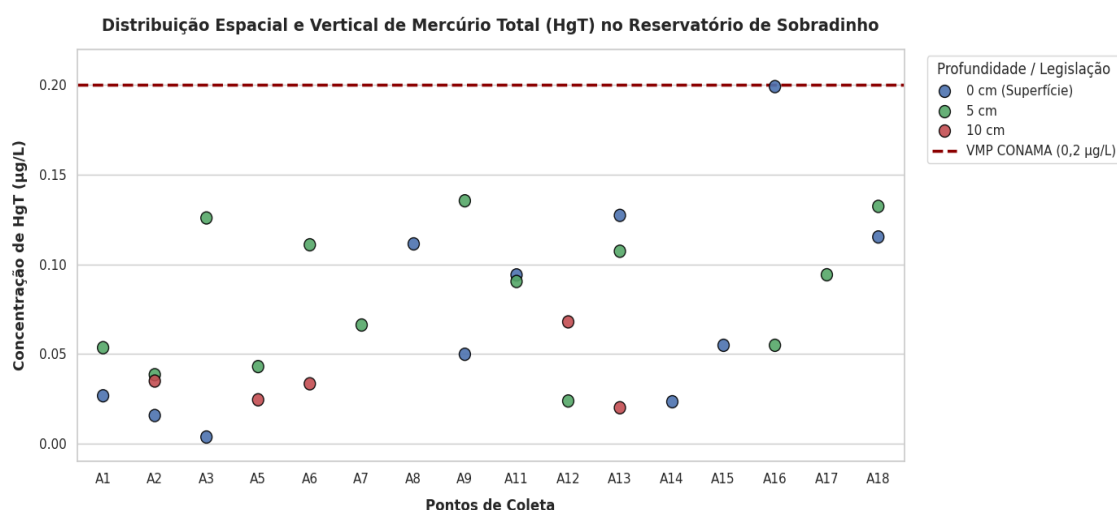
A análise dos resultados exhibe um panorama hídrico compatível com os limites regulatórios. A variação das concentrações de HgT estendeu-se de 0,00350 $\mu\text{g/L}$ (ponto A3, profundidade 0 cm) até um máximo de 0,19916 $\mu\text{g/L}$ (ponto A16, profundidade 0 cm), os demais resultados podem ser observados na Figura 3. A CMD das amostras foi de 0,00098 $\mu\text{g/L}$.

Os resultados demonstram que nenhuma das 29 amostras analisadas ultrapassou o limite estabelecido pela legislação vigente. Tal resultado evidencia os padrões normativos de qualidade hídrica, relativos à concentração de mercúrio total, e descarta possíveis

contaminações na coluna d'água. No entanto, embora o analito avaliado não viole os valores regulatórios, o pico de concentração detectado no ponto A16, relatado anteriormente, aproxima-se sensivelmente do limite regulatório e localiza-se na camada mais superficial coletada naquele perfil (0 cm), fornecendo indícios de processos biogeoquímicos de metais contaminantes na represa.

De forma semelhante, é observado um comportamento de adensamento vertical similar em alguns pontos, cuja concentração migra de valores ínfimos na superfície para um pico maior na profundidade, a exemplo dos pontos A3 (0,00350 – 0,12583 µg/L) e A9 (0,04971 – 0,13541 µg/L), onde o estrato de 10 cm apresenta mais que o dobro da fração superficial. Porém, o contrário também ocorre, com destaque para os pontos A6 (0,11084 – 0,03323 µg/L) e A13 (0,10724 – 0,01985 µg/L).

Figura 3: Distribuição Espacial e Vertical de HgT no Reservatório de Sobradinho/BA.



Fonte: Os autores (2026).

Esses microgradientes positivos em direção ao fundo do corpo d'água corroboram a dinâmica típica de reservatórios de água doce, onde os sedimentos atuam como retentores de cargas químicas. A presença do analito, mesmo em concentrações conformes, reflete que a vigilância estipulada pela Resolução CONAMA nº 430/2011 deve ser preservada, mitigando possíveis riscos de contaminação por mercúrio na Bacia, em virtude da capacidade do mesmo de bioacumular-se progressivamente ao ingressar nas teias tróficas (Basta *et al.*, 2023).

A distribuição das concentrações de HgT observada nas diferentes camadas superficiais da coluna d'água resulta da influência direta dos processos biogeoquímicos na interface água-sedimento, especialmente por se tratar de ambiente lântico. Estudos recentes demonstram que reservatórios artificiais favorecem condições para a retenção de

mercúrio, particularmente em zonas com maior deposição de matéria orgânica e diminuição da oxigenação, potencializando processos de metilação microbiana e subsequente bioacumulação trófica (Baptista-Salazar *et al.*, 2021; Seelos *et al.*, 2022). Alterações hidrológicas e outros processos ambientais, como o de estratificação térmica, podem intensificar a redistribuição vertical do contaminante, aumentando a biodisponibilidade e mobilidade do elemento químico no sistema aquático (Wang e Zhang, 2012; Millardi *et al.*, 2023). Apesar de os resultados do estudo indicarem concentrações de Hg abaixo dos limites regulatórios estabelecidos pela legislação brasileira, a presença de Hg em ecossistemas aquáticos exige monitoramento contínuo, pois podem representar importante fonte de incorporação gradual nas cadeias alimentares aquáticas, especialmente em reservatórios submetidos a intensa alteração sedimentar e elevada produtividade biológica.

Por fim, as concentrações identificadas não excluem a necessidade da manutenção sistemática de avaliações ecotoxicológicas sobre os recursos pesqueiros, garantindo a segurança à saúde e alimentação para a região do São Francisco.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação de teores de mercúrio total, a partir do método Akagi e Nishimura (1991) integrada à técnica de CVAAS reafirma o alto desempenho da abordagem instrumental utilizada, viabilizando com precisão a quantificação de HgT mesmo em uma faixa de ultra-traço ($\mu\text{g/L}$) no perfil hídrico do Reservatório de Sobradinho.

Os resultados levantados neste mapeamento evidenciam a conformidade atual da qualidade físico-química da Bacia, no que tange à concentração de HgT das amostras analisadas que exibiram valores abaixo do limite estabelecido, de $0,2 \mu\text{g/L}$, pela Resolução n° 357/05.

Ademais, o presente estudo reitera a importância de aliar a tecnologia da Espectrometria de Absorção Atômica por Vapor Frio a uma gestão hídrica contínua. As flutuações de HgT nas profundidades avaliadas atestam que a coluna d'água não é estática e que interações complexas com o leito sedimentar ocorrem e modificam constantemente a dinâmica dos compostos químicos. Desse modo, enfatiza-se a recomendação do monitoramento ambiental regular de Sobradinho, a fim de garantir a gestão sustentável dos recursos hídricos da Região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq, à FINEP e à FACEPE pelo apoio financeiro, e ao CRCN/CNEN pelo suporte institucional e de infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- AGILENT TECHNOLOGIES. **An Automated Vapor Generation Accessory for Atomic Absorption Analysis**. [S. l.]: Agilent Technologies, 2010. 8 p.
- AGILENT TECHNOLOGIES. **Atomic Spectroscopy**: Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). [S.l.]: Agilent Technologies, [s.d.].
- AKAGI, H.; NISHIMURA, H. Speciation of mercury in the environment. *In*: SUZUKI, T. (co-ord.). **Advances in mercury toxicology**. Boston: Springer, 1991. p. 53-76. (Rochester Series on Environmental Toxicity).
- ALBERTAZZI JUNIOR, A. G.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 2. ed. Barueri: Manole, 2018.
- ALBUQUERQUE, P. de T. Da F. **Avaliação de impactos ambientais em um estuário neotropical do litoral de Pernambuco, Nordeste do Brasil**. 2021. 105 f. Tese (Doutorado em Recursos Pesqueiros e Aquicultura) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.
- AL-SULAITI, M. M.; SOUBRA, L.; AL-GHOUTI, M. A. The Causes and Effects of Mercury and Methylmercury Contamination in the Marine Environment: A Review. **Current Pollution Reports**, [s. l.], v. 8, p. 249-266, 2022.
- AMAP/UN ENVIRONMENT. **Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018**. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme; Geneva: UN Environment Programme, 2019.
- BASTA, P. C.; VASCONCELOS, A. C. S. de; HALLWASS, G.; YOKOTA, D.; PINTO, D. de O. d'El R.; AGUIAR, D. S. de; SOUZA, C. C. de; OLIVEIRA-DA-COSTA, M. Risk Assessment of Mercury-Contaminated Fish Consumption in the Brazilian Amazon: An Ecological Study. **Toxics**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 800, 2023.
- BAPTISTA-SALAZAR, C.; QUADRA, G. R.; SOBEK, A.; JONSSON, S. Insights into the factors influencing mercury concentrations in tropical reservoir sediments. **Environmental Science: Processes & Impacts**, Cambridge, v. 23, n. 10, p. 1542-1553, 2021.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2011.
- GEYMAN, B. M.; THACKRAY, C. P.; JACOB, D. J.; SUNDERLAND, E. M. Impacts of volcanic emissions on the global biogeochemical mercury cycle: Insights from satellite observations and chemical transport modeling. **Geophysical Research Letters**, v. 50, e2023GL104667, 2023.

MILLARD, Geoffrey *et al.* Evaluating the influence of seasonal stratification on mercury methylation rates in the water column and sediment in a contaminated section of a western USA reservoir. **Environmental Pollution**, v. 316, p. 120485, 2023.

PAVESE, J. A. **Os efeitos do reservatório de Sobradinho sobre a estrutura sócio-econômica de uma região do Médio São Francisco**. 1984. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

SEELOS, M.; BEUTEL, M.; MCCORD, S.; KIM, S.; VIGIL, K. *et al.* Plankton population dynamics and methylmercury bioaccumulation in the pelagic food web of mine-impacted surface water reservoirs. **Hydrobiologia**, v. 849, p. 4803–4822, 2022.

WANG, F.; ZHANG, J. Mercury contamination in aquatic ecosystems under a changing environment: Implications for the Three Gorges Reservoir. **Chinese Science Bulletin**, v. 58, n. 2, 141–149, 2012.