

UFAL

INSTITUTO DE QUÍMICA E BIOTECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA
E BIOTECNOLOGIA

**CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL DA LAGUNA MUNDAÚ (MACEIÓ-
AL): DETERMINAÇÃO DE MERCÚRIO EM AMOSTRAS
AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS**

ELLEN DOS SANTOS SILVA BARROS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

Campus A. C. Simões

Tabuleiro dos Martins

57072-970 - Maceió - AL

**CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL DA LAGUNA MUNDAÚ (MACEIÓ-
AL): DETERMINAÇÃO DE MERCÚRIO EM AMOSTRAS
AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Química e Biotecnologia (PPQGB) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), como requisito parcial para à obtenção do grau de mestre Ciências.

Orientador: Prof. Drº Josué Carinhanha Caldas Santos

Coorientador: Prof. Drº Francisco Antônio da Silva Cunha

MACEIÓ –AL

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Divisão de Tratamento Técnico
Biblioteca Central

Bibliotecário: Jorge Raimundo da Silva – CRB-4 - 1528

B277c Barros, Ellen dos Santos Silva

Contaminação ambiental da Laguna Mundaú (Maceió-AL):
determinação de mercúrio em amostras ambientais e biológicas. /
Ellen dos Santos Silva Barros. – 2023.

65 f. : il., grafs., tabs.

Orientador: Josué Carinhanha Caldas Santos

Coorientador: Francisco Antônio da Silva Cunha

Dissertação (Mestrado em Química e Biotecnologia) – Universidade
Federal de Alagoas. Instituto de Química e Biotecnologia. Programa
de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 61-65.

1. Contaminação – Lagoa Mundaú. 2. Preparo de amostras.
3. Contaminação – Mytella charruana (Sururu).
4. Monitoramento ambiental – Mercúrio. I. Título.

CDU: 543.31



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE QUÍMICA E BIOTECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA E
BIOTECNOLOGIA



BR 104 Km 14, Campus A. C. Simões
Cidade Universitária, Tabuleiro dos Martins
57072-970, Maceió-AL, Brasil
Fone: (82) 3214-1144
Email: ppgqb.ufal@gmail.com

FOLHA DE APROVAÇÃO

Membros da Comissão Julgadora da Defesa de dissertação da mestranda **ELLEN DOS SANTOS SILVA BARROS** intitulada: *“Avaliação da influência da contaminação ambiental da Laguna Mundaú (Maceió, AL): determinação de mercúrio em amostras ambientais e biológicas”*, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia da Universidade Federal de Alagoas no dia 04 de agosto de 2023, às 9h, por meio de videoconferência.

Maceió, 04 de agosto de 2023.

Comissão Examinadora:

Dra. LETÍCIA MALTA COSTA, UFMG
Examinadora Externa



Documento assinado digitalmente
LETICIA MALTA COSTA
Data: 04/08/2023 12:02:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. WANDER GUSTAVO BOTERO, UFAL
Examinador Interno



Documento assinado digitalmente
WANDER GUSTAVO BOTERO
Data: 06/08/2023 12:36:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. FRANCISCO ANTÔNIO DA SILVA CUNHA, UFBA
Coordenador



Documento assinado digitalmente
FRANCISCO ANTONIO DA SILVA CUNHA
Data: 05/08/2023 17:06:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. JOSUÉ CARINHANHA CALDAS SANTOS, UFAL
Presidente



Documento assinado digitalmente
JOSUE CARINHANHA CALDAS SANTOS
Data: 16/08/2023 20:05:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dedico este trabalho, em especial, a Deus, o maior orientador da minha vida. Aos meus pais: Erivaldo e Maria das Graças por serem os pilares da minha formação como ser humano e o apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha carreira acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Nesse período de mestrado, gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me sustentado durante essa caminhada e também as todas as pessoas que diretamente ou indiretamente me apoiaram e foram fundamentais para concretização deste sonho.

Aos meus familiares, em especial meus pais Erivaldo e Maria das Graças, meus avôs Anacleto, Josefa e Sebastião e minha tia Linéa pelo amor, compreensão e por nunca soltarem minha mão.

Aos meus amigos, em especial Nayara, Denize e Fleidson, por sua compreensão durante os tempos de ausência ao longo desses anos. Eles sempre estiveram presentes com palavras de encorajamento e força.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Josué Carinhanha C. Santos pela oportunidade de execução do meu trabalho, por todo suporte, ensinamento, correções e incentivos durante essa etapa.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Francisco Cunha pela sua disponibilidade e por esclarecer tantas dúvidas.

A esta universidade, ao programa de Pós-Graduação em Química de Biotecnologia da UFAL, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram recursos para realização dessa etapa acadêmica.

Aos colegas do programa em Pós-Graduação em Química de Biotecnologia da UFAL e Laboratório de Instrumentação e Desenvolvimento em Química Analítica, LINQA, pela amizade e por estarem sempre dispostos a ajudar, em especial a Beatriz, Emeson, Igor, Sângela, Amanda, Aryanna, Emerson, Karol, Levi, João e Fátima.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro concedido.

“Os sonhos não determinam o lugar que você vai estar, mas produzem a força necessária para o tirar do lugar em que está”

Augusto Cury

RESUMO

A Lagoa Mundaú (Maceió - AL, Brasil) faz parte do complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) e é considerada um ambiente de importância socioeconômica devido à pesca do bivalve local, o sururu (*Mytella charruana*). Neste contexto, a destinação inadequada de resíduos domésticos e industriais aumenta o ritmo de degradação ambiental deste ecossistema, incluindo possível contaminação por espécies potencialmente tóxicas, como o mercúrio. Este estudo teve como objetivo determinar o Hg em matrizes ambientais (água, sedimentos e sururu) e biológicas (sangue e urina de pescadores locais). Foram realizadas seis campanhas de amostragem para as amostras ambientais de julho de 2021 a fevereiro de 2023, cada uma analisando 11 pontos amostrais. A espectrometria de fluorescência atômica de vapor frio (CV AFS) foi utilizada para determinar as concentrações de Hg nos diferentes tipos de amostras. Quando necessário, as amostras foram digeridas com ácido em sistema fechado. Vale ressaltar que nas amostras de água foram observadas as concentrações de mercúrio total (Hg_T), mercúrio total dissolvido (Hg_{DS}), bem como da fração inorgânica (Hg_{ino}) e orgânica (Hg_{org}) deste elemento no dissolvido fração foi determinada. Em contraste, apenas as concentrações totais de mercúrio foram determinadas nas demais amostras. Os resultados obtidos por este estudo referentes às amostras ambientais mostraram variações nos perfis de concentração de Hg entre as amostras, onde da amostra 1 para a 3 houve diminuição nas concentrações obtidas para Hg_T e Hg_{DS} nas amostras de água, e para Hg_T nas amostras de sedimento e sururu. Assim, as faixas de concentração ($\mu g L^{-1}$) de Hg_T , Hg_{DS} , Hg_{ino} e Hg_{org} nas amostras de água foram, respectivamente: amostragem 1 ($< 0,01 - 15,71$), amostragem 2 ($< 0,01 - 7,65$), amostragem 2 ($< 0,01 - 7,65$), amostragem 3 ($< 0,01 - 3,58$), amostragem 4 ($< 0,01 - 1,40$), amostragem 5 ($< 0,01 - 0,36$) e amostragem 6 ($< 0,01 - 0,89$). Em geral, apenas amostras de água e sedimentos apresentaram concentrações de Hg_T acima do permitido, com excessos de 2 \times (sedimento) a 80 \times (água) o valor máximo legal. Durante todo o período de amostragem, 50% das amostras de água apresentaram concentrações de Hg_T superiores às permitidas por lei. Nas amostras de água, Hg_{org} foi a espécie majoritária. Contudo, a legislação nacional apenas recomenda valores limites para Hg_T com valores de $0,2 \mu g L^{-1}$ (água) e $0,3 \mu g g^{-1}$ (sedimento). Sobre as amostras de bivalves das espécies *Mytella charruana* (espécie nativa) e *Mytilopsis sallie* (espécie invasora), todas as concentrações de Hg_T estiveram abaixo dos valores legislados⁵, com faixas de concentrações iguais a $0,01 - 0,35$ e $< 0,01 - 0,07 \mu g g^{-1}$, respectivamente, em massa seca. Os resultados iniciais indicam que o valor médio dos níveis de Hg_T no sangue dos pescadores do CELMM ($n = 20$) foi de $4,68 \pm 1,39 \mu g L^{-1}$; em contrapartida, para o grupo controle ($n = 20$), foi de $2,06 \pm 0,63 \mu g L^{-1}$, o que significa que 25% dos pescadores apresentaram valores superiores aos recomendados pela EPA⁶. Para as amostras de urina desses dois grupos foram obtidos valores de $0,447 \pm 0,19 \mu g L^{-1}$ (pescadores) e $0,147 \pm 0,03 \mu g L^{-1}$ (grupo controle), embora as concentrações estivessem abaixo dos limites da legislação vigente. Porém, o nível de Hg_T foi cerca de 3 \times maior com os pescadores. Por fim, o monitoramento do Hg em diferentes amostras pode auxiliar na compreensão da dinâmica do ecossistema e auxiliar na implementação de políticas públicas que visem a tomada de decisões benéficas para a sociedade.

Palavras-chaves: Contaminação; Preparo de amostras; Mercúrio; Monitoramento ambiental.

ABSTRACT

The Mundaú Lagoon (Maceió - AL, Brazil) is part of the Mundaú- Manguaba lagoon estuarine complex (CELMM) and is considered to be an environment of socio-economic importance due to fishing for the local bivalve, the sururu (*Mytella charruana*). In this context, the inappropriate disposal of domestic and industrial waste increases the rate of environmental degradation in this ecosystem, including possible contamination by potentially toxic species, such as mercury. This study aimed to determine Hg in environmental (water, sediment, and sururu) and biological (blood and urine from local fishermen) matrices. Six sampling campaigns were conducted for the environmental samples from July 2021 to February 2023, each analyzing 11 sampling points. Cold vapor atomic fluorescence spectrometry (CV AFS) was used to determine Hg concentrations in the different types of samples. When necessary, the samples were acid-digested in a closed system. It is worth noting that in the water samples, the concentrations of total mercury (Hg_T), total dissolved mercury (Hg_{DS}), as well as the inorganic (Hg_{ino}) and organic (Hg_{org}) fraction of this element in the dissolved fraction were determined. In contrast, only the total mercury concentrations were determined in the other samples. The results obtained by this study concerning the environmental samples showed variations in the Hg concentration profiles between the samples, where from sample 1 to 3, there was a decrease in the concentrations obtained for Hg_T and Hg_{DS} in the water samples, and for Hg_T in the sediment and sururu samples. Thus, the concentration ranges ($\mu g L^{-1}$) of Hg_T , Hg_{DS} , Hg_{ino} , and Hg_{org} in the water samples were, respectively: sampling 1 ($< 0.01 - 15.71$), sampling 2 ($< 0.01 - 7.65$), sampling 3 ($< 0.01 - 3.58$), sampling 4 ($< 0.01 - 1.40$), sampling 5 ($< 0.01 - 0.36$) and sampling 6 ($< 0.01 - 0.89$). In general, only water and sediment samples showed Hg_T concentrations above the permitted level, with excesses of $2\times$ (sediment) to $80\times$ (water) the maximum legal value. Throughout the sampling period, 50% of the water samples had Hg_T concentrations higher than those permitted by law. In the water samples, Hg_{org} was the majority species. However, national legislation only recommends limit values for Hg_T with values of $0.2 \mu g L^{-1}$ (water) and $0.3 \mu g g^{-1}$ (sediment). About the bivalve samples of the species *Mytella charruana* (native species) and *Mytilopsis sallis* (invasive species), all the Hg_T concentrations were below the legislated values, with concentrations ranges equal to $0.01 - 0.35$ and $< 0.01 - 0.07 \mu g g^{-1}$, respectively, in dry mass. The initial results indicate that the average value of Hg_T levels in the blood of the CELMM fishermen ($n = 20$) was $4.68 \pm 1.39 \mu g L^{-1}$; in contrast, for the control group ($n = 20$), it was $2.06 \pm 0.63 \mu g L^{-1}$, which means that 25% of the fishermen had values higher than those recommended by the EPA. For the urine samples from these two groups, values of $0.447 \pm 0.19 \mu g L^{-1}$ (fishermen) and $0.147 \pm 0.03 \mu g L^{-1}$ (control group) were obtained, although the concentrations were below the limits of current legislation⁷. However, the level of Hg_T was around $3\times$ higher with the fishermen. Finally, the monitoring of Hg in different samples can help understand the dynamics of the ecosystem and assist in implementing public policies aimed at making beneficial decisions for society.

Keywords: Contamination; Sample preparation; Mercury; Environmental monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa da qualidade das águas distribuídas para população brasileira.	13
Figura 2. Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba.	15
Figura 3. Proximidades da Laguna Mundaú.....	16
Figura 4. Alguns pontos no entorno da Laguna Mundaú: a) moradias sem saneamento básico; b) esgoto doméstico sendo descartado na água na laguna Mundaú.	17
Figura 5. Sururu (<i>Mytella charruana</i>) comercializado em Maceió - AL.	19
Figura 6. Na parte superior é apresentado o sururu (<i>Mytella charruana</i>) e na parte inferior o bivalve esbranquiçado (<i>Mytilopsis Sallie</i>).	21
Figura 7. Ciclo do mercúrio no meio ambiente.	22
Figura 8. Mapa dos pontos de amostrais de água, sururu e sedimento.....	28
Figura 9. Gráfico com os valores de temperatura obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.....	37
Figura 10. Gráfico com os valores de pH obtidos nas amostragens entre julho/2021 e fevereiro/2023.	39
Figura 11. Gráfico com os valores de oxigênio dissolvido obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.....	39
Figura 12. Gráfico com os valores de sólidos totais dissolvidos obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.....	40
Figura 13. Gráfico com os valores de condutividade elétrica obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.....	41
Figura 14. Gráfico com os valores de salinidade obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.....	41
Figura 15. Gráfico com os valores de turbidez obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.....	42
Figura 16. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 1 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em julho/2021.	43
Figura 17. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 2 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em outubro/2021.	44
Figura 18. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 3 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em março/2022.....	45
Figura 19. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 4 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em julho/2022.	46
Figura 20. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 5 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em dezembro/2022.....	47
Figura 21. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 6 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em fevereiro/2023.	48
Figura 22. Gráfico das concentrações de Hg nos sedimentos da Laguna Mundaú (Maceió, AL) entre o período de julho/2021 a fevereiro/2023.....	49
Figura 23. Concentração de Hg _{TOTAL} ($\mu\text{g L}^{-1}$) em amostras de sangue de grupo controle (n = 20) e expostos (n = 20) da Laguna Mundaú (Maceió, AL).	55

Figura 24. Concentração de Hg_{TOTAL} ($\mu g L^{-1}$) em amostras de urina de grupo controle (n = 20) e expostos (n = 20) da Laguna Mundaú (Maceió, AL). 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentração máxima permitida dos elementos em bivalves.	20
Tabela 2. Relação dos danos à saúde com a dose de exposição ao mercúrio.	23
Tabela 3. Dados das amostragens - coordenadas cartesianas dos pontos amostrais, índices pluviométricos e tábuas da maré das amostragens.	30
Tabela 4. Parâmetros usados para determinação do Hg por CV AFS.	31
Tabela 5. Programa de digestão com aquecimento assistido por radiação micro-ondas aplicado as amostras de sururu.	32
Tabela 6. Programa de digestão com aquecimento assistido por radiação micro-ondas aplicado as amostras de sururu.	33
Tabela 7. Programa de digestão com aquecimento assistido por radiação micro-ondas aplicado as amostras de sangue e urina.	34
Tabela 8. Valores dos limites de quantificação, RSD e faixa linear.	36
Tabela 9. Ensaio de adição e recuperação de Hg _{DIS} em amostras de água.	36
Tabela 10. Ensaio de adição e recuperação de Hg _{INO} em diferentes pontos de amostragem das amostras de água.	36
Tabela 11. Ensaio de adição e recuperação de Hg _{TOTAL} em amostras de sangue.	36
Tabela 12. Concentração de mercúrio em bivalves em seis campanhas de amostragem entre o período de julho/2021 a fevereiro/2023.	52
Tabela 13. Dados demográficos dos indivíduos doadores das amostras biológicas.	54
Tabela 14. Coeficiente de correlação de Spearman a partir das concentrações de Hg em água, sedimento, bivalve e parâmetros físico-químicos.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amostragem
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ATSDR	<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i>
CELMM	Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CV AFS	Espectrometria de fluorescência atômica com vapor frio
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FBA-HG AFS	Espectrometria de fluorescência atômica com geração de hidreto
FDA	Administração de Alimentos e Medicamentos
FI-HG AFS	Espectrometria de fluorescência atômica com geração de hidreto acoplado a sistema de injeção em fluxo
IARC	International Agency for Research on Cancer
IP _p	Índice de população
IRIS	<i>Integrated Risk Information System</i>
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
MC	<i>Mytella charruana</i>
MS	<i>Mytilopsis Salliei</i>
P	Ponto
PET	Polietileno tereftalato
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SGB/CPRM	Estudos do Serviço Geológico do Brasil
WHO	<i>World Health Organization</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Contaminação por elementos traços em matrizes ambientais e biológicas	13
2.2 Complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba.....	14
2.3 Sururu: Mytella charruana	19
2.4 Aspectos principais sobre a contaminação por mercúrio.....	21
3 JUSTIFICATIVA.....	25
4 CONTRIBUIÇÃO PARA A SOCIEDADE	25
5 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS.....	26
5.1 Objetivo geral.....	26
5.2 Objetivos específicos	26
6 METODOLOGIA	27
6.1 Área de pesquisa, amostras de água e sururu.....	27
6.2 Reagentes e soluções.....	31
6.4 Determinação do mercúrio total, dissolvido e inorgânico em água estuarina	31
6.5 Determinação de Hg em sururu	33
6.6 Determinação de Hg em sangue e urina.....	33
6.7 Tratamento estatístico	34
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
7.1 Figuras de mérito da metodologia empregada	36
7.2 Exatidão dos métodos	36
7.3 Avaliação dos parâmetros físico-químicos	37
7.4 Determinação de mercúrio total, dissolvido e inorgânico em água.....	42
7.5 Determinação de mercúrio em sedimento.....	49
7.6 Determinação de mercúrio em bivalves.....	50
7.7 Avaliação preliminar da concentração de mercúrio em sangue e urina de pescadores da Laguna Mundaú.....	53
7.7 Avaliação preliminar da concentração de mercúrio em sangue e urina de pescadores da Laguna Mundaú.....	57
8 CONCLUSÃO	60
9 PERSPECTIVAS	60

REFERÊNCIAS..... 61

1 INTRODUÇÃO

A realização de monitoramento ambiental é fundamental para constatar possíveis fontes de contaminação ao ambiente e danos provocados aos seres vivos devido à exposição a compostos e/ou espécies potencialmente tóxicos (CALDAS; SANCHE-FILHO, 2011). Desse modo, tem-se uma constante preocupação no desenvolvimento de estudos quanto aos níveis de marcadores potencialmente tóxicos em diferentes ecossistemas, a exemplo do trabalho de Barros et al. (2019) na determinação de elementos potencialmente tóxicos no sedimento de um mangue na imediação do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), e do nosso grupo, realizado por Santos et al. (2021) na avaliação da qualidade da água e de alimento (sururu) na Laguna Mundaú (Alagoas – AL).

A região do CELMM é passível a sofrer impactos relacionados à exposição a elementos potencialmente tóxicos, em especial na Laguna Mundaú na cidade de Maceió- AL, devido o descarte inapropriado de resíduos domésticos e industriais. Esse ecossistema é considerado um ambiente voltado ao desenvolvimento produtivo e econômico, tendo como principal fonte de renda da população a pesca do sururu, bivalve local que é definido como um organismo filtrante, que serve como subsídio para vida de cerca de 300 mil pessoas da região. Como esse bivalve realiza sua alimentação por meio da filtração da água da Laguna Mundaú, o mesmo pode ser usado como bioindicador da contaminação ambiental, uma vez que é sésil, assim, alterações na composição do meio, levam a variações no desenvolvimento e no acúmulo de diferentes espécies neste bivalve (PINHEIRO, 2022).

Dentre a elevada variedade de contaminantes encontra-se o mercúrio, metal cuja toxicidade e danos à saúde humana tem sido tema de debate constante na sociedade. Apesar do potencial tóxico, o mercúrio e suas espécies ainda são empregados na fabricação de termômetros, componentes eletrônicos, lâmpadas fluorescentes, conservantes de vacinas e medicamentos, clareamento de pele, por exemplo. Além disso, esse elemento não apresenta função fisiológica para os seres vivos, porém é passível de ser bioacumulado, e assim, a concentração de mercúrio total no organismo tende a aumentar com a exposição por meio da alimentação ou inalação (FRANCISCO, 2021).

Assim, o presente trabalho consiste na avaliação dos parâmetros físico-químicos das amostras de água da região visando um melhor entendimento desse ecossistema, associado a determinação do teor de mercúrio total, mercúrio dissolvido total e as respectivas frações na forma inorgânica e orgânica em amostras de água da Laguna Mundaú (Maceió, AL), além da determinação dos níveis de Hg total no bivalve (sururu) e no sedimento. Por fim, foi realizada

a avaliação do teor de Hg total no sangue e urina de pescadores residentes no entorno desta região em comparação ao grupo controle.

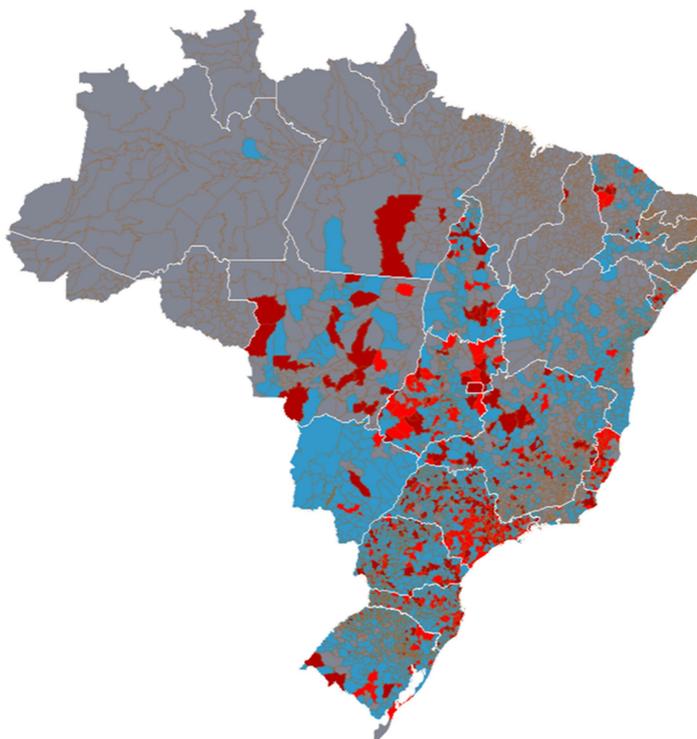
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contaminação por elementos traços em matrizes ambientais e biológicas

A contaminação ambiental e os impactos na saúde humana vêm sendo pauta dos principais questionamentos sociais, tendo em vista o aumento da geração de resíduos domésticos e industriais nas últimas décadas. Assim, a *International Solid Waste Association* (ISWA, 2022) projeta que até 2050 a produção de lixo anual seja de aproximadamente 3,4 bilhões de toneladas por ano no mundo.

Nessa mesma linha, a instituição Repórter Brasil publicou um mapa da qualidade das águas fornecidas para população brasileira entre os anos de 2018 a 2020 avaliando se os níveis de concentração de substâncias químicas potencialmente tóxicas encontram-se dentro do limite de segurança estabelecido pelas legislações (Figura 1).

Figura 1. Mapa da qualidade das águas distribuídas para população brasileira.



Fonte: Repórter Brasil, 2021.

A Figura 1 exibe na cor cinza municípios que não disponibilizaram dados para esta pesquisa, na cor azul cidades cujas concentrações de substâncias contaminantes estão dentro do limite de segurança, já os tons avermelhados representam as localidades que apresentam

valores acima dos valores legislados. Dentre os compostos avaliados são citados agrotóxicos, substâncias orgânicas e inorgânicas que geram danos à saúde como doenças crônicas e câncer.

Com o aumento do índice de contaminação ambiental principalmente pelo descarte inapropriado de resíduos, vários estudos científicos exploram temáticas relacionadas à contaminação ambiental por elementos potencialmente tóxicos. Ainda se observa na literatura o emprego do termo “*metais pesados*”, porém a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, 2002) considera essa expressão como inapropriada sabendo que a palavra “*pesado*” está relacionada com a densidade do elemento.

Assim, o termo recomendado é “*metais traços*” que tem referência a elementos ou compostos catiônicos/aniônicos localizados na natureza em baixas concentrações (ESSINGTON, 2004), teores em torno de parte por milhão (ppm) e parte por bilhão (ppb). O primeiro trabalho aplicando esse tema foi publicado no ano de 1939 objetivando a determinação de metais alcalinos e alcalinos terrosos na nutrição animal e das plantas. Atualmente, os elementos traços mais citados na literatura são Ag, Au, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Na, Pb, Rb, Ru, Sr e Tl, os quais podem ser classificados como metais, metaloides. Além disso, alguns desses elementos não apresentam funções biológicas aos seres vivos e ao meio ambiente (FERREIRA et al., 2013).

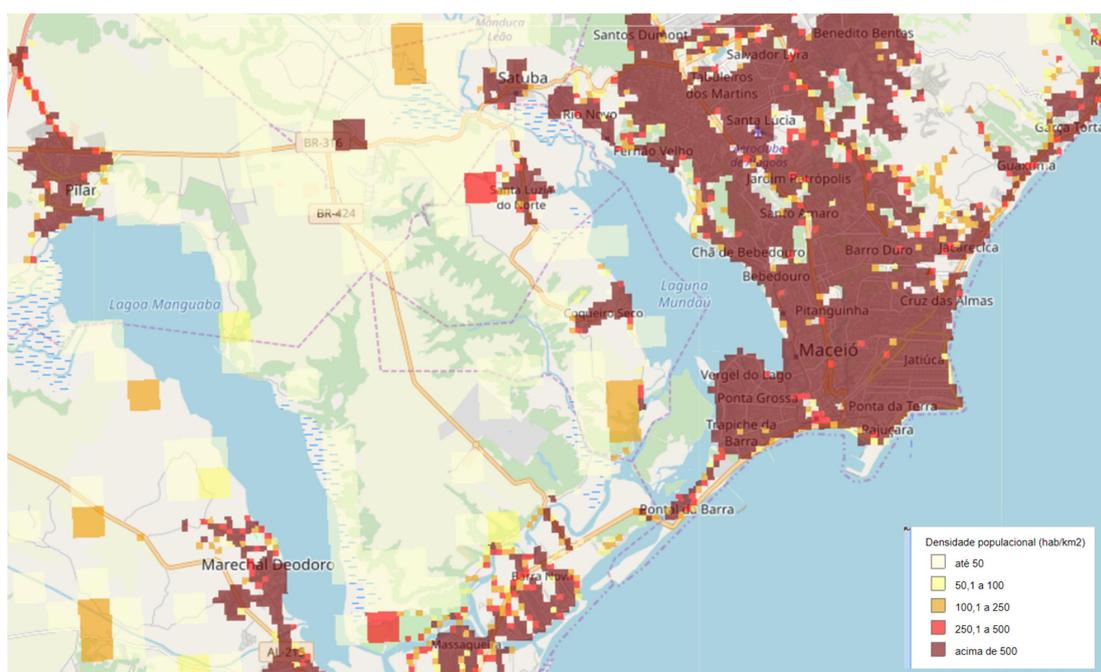
2.2 Complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba (CELMM) está localizado no litoral do estado de Alagoas (Figura 2), recebendo a denominação de estuarino lagunar devido à relação estabelecida entre três subsistemas geológicos, sendo eles: (1) a laguna central; (2) os canais e interações estuário-mar; (3) o sistema flúvio-lagunar e as interações rio-laguna. Esse ecossistema compreende duas lagunas costeiras, Mundaú e a Manguaba, e um canal oceânico que aumenta o dinamismo das águas do CELMM (ANA, 2006).

orgânica e geralmente possui o tamanho máximo das partículas igual a 0,05 mm, sendo categorizados como silte e argila (RIBEIRO et al, 2011).

Em relações as especificidades das lagunas integrantes do CELMM, a Laguna Manguaba possui uma área de aproximadamente 42 km², sendo acceptora principalmente dos rios Sumaúma e Paraíba do Meio. Já a Laguna Mundaú tem em torno de 27 km² e o rio Mundaú se caracteriza com principal contribuinte fluvial (ANA, 2006). Apesar da menor extensão, o entorno da Laguna Mundaú é mais densamente povoado, em especial na cidade de Maceió- AL (margem esquerda) nos bairros do Pontal da Barra, Trapiche, Ponta Grossa, Vergel do Lago, Bom Parto, Chã de Bebedouro e Fernão Velho (Figura 3).

Figura 3. Proximidades da Laguna Mundaú.



Fonte: IBGE, 2021.

As condições de sobrevivência da população dos bairros supracitados são mediadas por 3 (três) tipos de riscos, sendo eles: social, tecnológico e natural (Figura 4). O risco social está associado à falta de acesso a serviços básicos, como: saneamento básico, coleta de lixo e acesso à água tratada. No que se refere aos fatores tecnológicos à possibilidade de vazamento e/ou lançamentos industriais de produtos potencialmente tóxicos aumenta esse tipo de risco nas comunidades circunvizinhas. Por fim, a probabilidade de ocorrência de desabamento e inundação são os agentes geológicos que ameaçam a sobrevivência desses moradores (ANA, 2006).

Figura 4. Alguns pontos no entorno da Laguna Mundaú: a) moradias sem saneamento básico; b) esgoto doméstico sendo descartado na água na laguna Mundaú.



Fonte: MARABÁ, 2018.

Vale ressaltar que a densidade populacional em alguns bairros (Pinheiro, Mutange, Bebedouro e Bom Parto) no entorno da Laguna Mundaú foi reduzida devido aos impactos da mineração realizada para extração de sal-gema desde os anos de 1970, que provocou tremores de terra, rachaduras em imóveis, afundamentos e formação de crateras no solo, em março de 2018. Estudos do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) apontaram que esse fenômeno geológico foi motivado pelo desmoronamento de poços de extração que se encontravam vedados e pressurizados. Dentre os impactos gerados por esse desabamento pode-se citar a desocupação de cerca de 15 mil imóveis que abrigavam aproximadamente 60 mil pessoas segundo a Defesa Civil em novembro de 2022.

É importante salientar que entre as principais práticas econômicas exercidas pela população das proximidades da Laguna Mundaú encontra-se nos seguintes segmentos: sucroalcooleiro, complexo cloro petroquímico, matadouros, pesca e turismo. Em destaque, a pesca de moluscos, crustáceos e peixes consistem na principal atividade financeira da população ribeirinha (MARQUES et al., 1993).

O sururu (*Mytella charruana*), organismo filtrante que realiza sua alimentação por meio da filtração da água desse ecossistema, tem grande notoriedade para população do estado de Alagoas, pois representa à culinária local e a atividade pesqueira dessa espécie é responsável pelo sustento diretamente e indiretamente de aproximadamente 1500 famílias. Visto a relevância desse ecossistema para a população alagoana e a degradação ambiental associada a este, foram observados alguns estudos anteriores sobre a contaminação ambientais

por espécies potencialmente tóxicas, desenvolvimento de materiais tecnológicos, sonda e nanomateriais.

Wanderley e colaboradores (2020) realizaram a caracterização das substâncias húmicas aquáticas do CELMM e realização de estudos de complexação com íons Hg^{2+} , constatando o menor grau de agregação das substâncias húmicas aquáticas da Laguna Mundaú, devido ao menor tempo de renovação das águas (aproximadamente 32 dias) nesse complexo e o menor grau de humificação. Além disso, foi observada a maior capacidade de complexação das substâncias húmicas proveniente da Laguna Mundaú com os íons $Hg(II)$, essa capacidade pode ser decorrente da presença de grupos oxigenados nesse material.

Ribeiro e colaboradores (2011) avaliaram a distribuição e fontes de matéria orgânica dos sedimentos do complexo empregando indicadores a base de álcoois e esteróis. Com esse estudo foi possível classificar diferentes tipos de sedimentos de acordo com a interferência da vegetação, aportes de esgotos domésticos e industriais. Assim, observou-se a presença de material sedimentar enriquecidos em matéria orgânica e lamosos nas duas lagunas e arenosos e empobrecidos na região dos canais, ainda foi constatada a contaminação bacteriana por fezes humanas e animais na região a margem da cidade de Maceió - AL.

Santos e colaboradores (2014) investigou a qualidade, o perfil nutricional e a segurança microbiológica do modo de preparo do sururu sem e com leite de coco, além da possível contaminação por elementos potencialmente tóxicos. Desse modo, como resultados para esse trabalho não foi detectada a contaminação desse alimento pelo grupo de substâncias químicas - arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg)- regulamentadas pela legislação vigente. As análises microbiológicas também apresentam valores dentro dos estabelecidos indicando a ausência da contaminação microbiológica no sururu. Já no que se refere a avaliação de micronutrientes - vitamina A, Ferro (Fe) e Zinco (Zn) – foi observado as maiores concentrações de vitamina A no bivalve *in natura* em relação a espécie após o cozimento, além disso, o preparo com leite de coco apresentou os maiores teores de Fe e Zn.

Silva-Filho e colaboradores (2021) observaram as prováveis modificações nas células sanguíneas em pescadores da Laguna Mundaú (Maceió - AL) derivada da exposição por compostos mercuriais. Observando elevadas concentrações de mercúrio em sangue e urina dos pescadores em consonância aos valores obtidos pelo grupo controle. Ainda, foi visto a capacidade do Hg em formar ligações com enzimas e grupos tiol, gerando danos a absorção de oxigênio e maior estresse oxidativo.

Dos Santos e colaboradores (2021) determinaram os níveis de concentrações de 18 (dezoito) elementos químicos (Al, As, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Se, V e Zn) em água proveniente Laguna Mundaú o teor de Hg em sururu. Verificando concentrações acima do permitido para sete elementos, entre eles: Hg, Pb, Al, Cu, Zn, Mn e Fe, além de altas concentrações de mercúrio no bivalve local em relação as legislações do WHO e EPA. Os valores obtidos pelos autores podem estar relacionados a ocupação populacional e lançamento inapropriado de despeitos.

2.3 Sururu: *Mytella charruana*

O Brasil é classificado como o 4º maior produtor de pescado mundial, dentre esse alimento encontra-se os peixes, moluscos, anfíbios, crustáceos e répteis. Além disso, no ano de 2021 foram produzidas aproximadamente 840 mil toneladas de pescados entre espécies derivadas de água salgada, doce e salobra (DOS SANTOS et al., 2022). De acordo com as recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS) e da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), o consumo desse tipo proteína animal deve ser no máximo, respectivamente, de 250 g/semanal e 12 kg/ano.

É importante mencionar que os recursos aquáticos são altamente relevantes para a manutenção financeira e alimentícia das comunidades ribeirinhas. Como por exemplo, pesca da espécie *Mytella charruana*, popularmente conhecido com sururu (Figura 5), para a população do entorno do complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba em Alagoas (FARIAS et al., 2010).

Figura 5. Sururu (*Mytella charruana*) comercializado em Maceió - AL.



Fonte: JUBINI, 2020.

O sururu é categorizado com molusco bivalve apresentando uma faixa resilial, valvas carenadas, charneira dentada e concha lisa na cor preta de tamanho médio de até 50 mm. Essa espécie sobrevive em ambiente com o teor de salinidade entre 5 e 15%, sendo encontrada em colônias na parte mais rasas das Lagunas e imersos em lama (MOUCHREK FILHO et al., 2003).

Os bivalves consistem em organismos filtradores que realizam sua alimentação por meio da filtração da água do seu habitat (cerca de 19 a 50 litros de água por hora) e retenção de material em suspensões. Dessa forma, funcionam com bioacumuladores de poluição ambiental devido à capacidade de absorver micro-organismos, toxinas e metais potencialmente tóxicos (SANDE et al., 2010). Tendo em vista, essa característica do bivalve a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2013) regulamenta a concentração máxima permitida para alguns elementos nessa matriz do modo que está é apresentado ao consumidor (Tabela 1).

Tabela 1. Concentração máxima permitida dos elementos em bivalves.

Elemento	Concentração máxima permitida (mg kg⁻¹)
Arsênio (As)	1,00
Cádmio (Cd)	1,50
Chumbo (Pb)	2,00
Mercúrio (Hg)	0,50

Fonte: ANVISA, 2013.

Trabalhos anteriores mostram que o estudo do monitoramento do sururu proveniente do CELMM é primordial para identificar as possíveis fontes de contaminação desse ecossistema, tais como Paixão e colaboradores (2016) e Maioli e colaboradores (2010) que realizaram a análise microbiológicas e determinação de espécies potencialmente tóxicas.

Ainda é importante mencionar sobre o aparecimento de uma nova espécie de bivalve na região do CELMM a partir do ano de 2021 denominada de *Mytilopsis Salliei*. Este organismo ficou popularmente conhecido pela comunidade como “sururu branco” devido a similaridade na aparência com o sururu característico da região diferindo apenas devido ao aspecto esbranquiçado (Figura 6).

Figura 6. Na parte superior é apresentado o sururu (*Mytella charruana*) e na parte inferior o bivalve esbranquiçado (*Mytilopsis Sallie*).



Fonte: AUTORA, 2023.

O *Mytilopsis Sallie* é reconhecido com uma espécie invasora em virtude das modificações provocadas na cadeia alimentar do ecossistema, além da possibilidade de danos econômicos para a população local, visto que esse bivalve não é comercializado devido a diferença gustativa. Esse bivalve pertence à família *Dreissenidae* que possui um grande histórico com organismo invasor em água do tipo doce e salobra (QUEIROZ et al. 2022). O *Mytilopsis Sallie* é natural do Atlântico Ocidental compreendida entre o Golfo do México e a Venezuela, apresentando indícios dessa espécie nas regiões de Hong Kong, Ilhas Fuji, Austrália, Malásia e Brasil, nas quais consideraram o *Mytilopsis Sallie* como responsável pela redução da biodiversidade. Segundo Queiroz et al. (2020), o primeiro registro desse bivalve foi realizado no ano de 2004 no estuário do rio Paraíba (PB) e poucos estudos foram realizados sobre os possíveis impactos sobre o surgimento desse organismo.

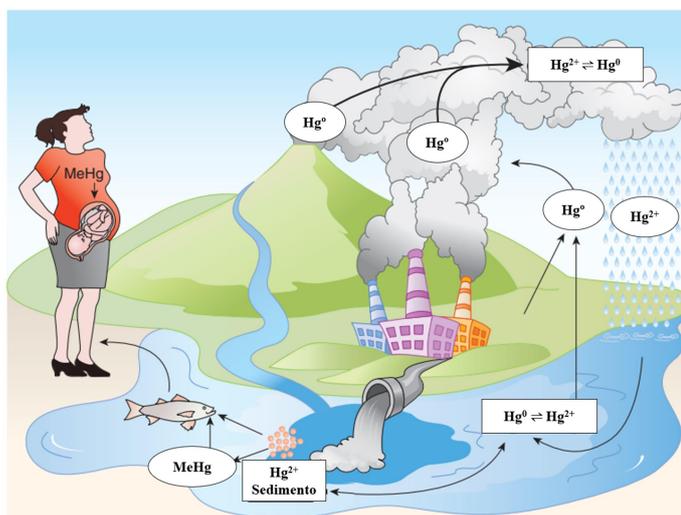
2. 4 Aspectos principais sobre a contaminação por mercúrio

O mercúrio é uma substância altamente tóxica para o meio ambiente e saúde dos seres humanos. O mercúrio (Hg) é considerado um elemento de transição interna da tabela

periódica pertencente à família 12 ou 2B, sendo o único metal que é encontrado líquido em temperatura ambiente.

O mercúrio no meio ambiente geralmente é encontrado em três diferentes formas: elementar, orgânica e inorgânica, dentre as principais fontes de mercúrio existentes podem-se citar baterias, amálgamas dentárias, vacinas, fungicidas e cosméticos. O descarte inapropriado de materiais derivados desse elemento na atmosfera pode ocasionar modificações no mecanismo natural de ambientes aéreos, terrestres e aquáticos. Assim, a Figura 7 exhibe como funciona o fluxo de transporte e transferência de Hg entre os diferentes tipos de ambientes.

Figura 7. Ciclo do mercúrio no meio ambiente.



Fonte: KLAASSEN e AMDUR (2013)

Por meio da representação do ciclo do mercúrio no meio ambiente são observados cinco (5) processos químicos, entre eles: oxidação, redução, metilação, desmetilação de MeHg e degradação de metilmercúrio (MeHg) (Figura 7). Na etapa de oxidação acontece a oxidação do Hg elementar a Hg (II), sendo favorecida pela utilização de reagentes derivados de nitratos, nitritos, enxofre, dióxido de carbono, fosfatos e sulfatos (He et al., 2014). Já no processo de redução, o mercúrio é reduzido de Hg (II) a Hg elementar e ocorre por meio de reações microbianas e fotoquímicas (ZHANG et al, 2012).

A etapa seguinte é a metilação que acontece apenas na presença de bactérias redutores de sulfatos, enquanto a desmetilação ocorre de maneira simultânea ao processo anterior, sendo afetados tanto por componentes bióticos quanto por abióticos (ACHÁ et al., 2012; KLAPSTEIN et al., 2017). Por fim, a degradação do MeHg considera as reações fotolíticas e o índice de matéria orgânica dissolvida no meio ambiente (FLECK et al., 2014).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) classifica o mercúrio com um dos elementos mais tóxico e com um dos maiores efeitos nocivo à saúde humana, entre esses problemas encontram-se diferentes tipos de câncer, problemas renais, gastrointestinais, pulmonares, hepáticos e distúrbios no sistema nervoso. Com isso, a *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* - ATSDR estabelece a relação dos danos à saúde com a dose de exposição pelo mercúrio (Tabela 2).

Tabela 2. Relação dos danos à saúde com a dose de exposição ao mercúrio.

Dose (mg/kg/dia)	Espécie	Tipos de exposição: Efeitos
0,0003	Orgânica	Oral - Danos na defesa imunológica.
0,0004	Orgânica	Oral - Comprometimento agudo do sistema imunológico.
0,005 - 0,008	Orgânica	Oral - Aumento do risco de hipertensão, problemas nos tecidos dos rins, alterações comportamentais e infertilidade masculina.
0,01 - 0,08	Orgânica	Oral - Atrasos e defeitos no desenvolvimento e infertilidade feminina.
0,015 - 0,033	Inorgânica	Oral - Alterações nos biomarcadores renais e no funcionamento dos rins.
0,05	Elementar	Inalatória - Atrasos no desenvolvimento neurológicos.
0,07	Inorgânica	Oral - Doenças associadas ao sangue.
0,1 - 0,5	Orgânica	Oral - Diminuição do peso corporal e problemas renais.
0,118 - 0,277	Inorgânica	Oral - Aumento da chance de hipertensão.
0,3 - 1	Inorgânica	Oral - Diminuição na atividade imunológica e fertilidade, além de alterações comportamentais.
0,5	Elementar	Inalatória - Mudanças comportamentais e danos no tecido nervoso e diminuição de peso corporal.
0,6 - 1	Orgânica	Oral - Morte e desnutrição.
0,7	Inorgânica	Oral - Problemas no tecido nervoso e diminuição de peso corporal.
> 1	Orgânica	Oral - Morte e decréscimo da frequência auditiva.
1,39 - 3	Inorgânica	Oral - Danos ao sistema reprodutor masculino, formação de cálculos renais.
3	Elementar	Inalatória - Alterações no funcionamento dos rins.
4	Elementar	Inalatória - Formação de cálculos renais e problemas urinários.
4 - 5	Inorgânica	Oral - Câncer e problemas para o desenvolvimento fetal.
> 5	Inorgânica	Oral - Morte.
8	Elementar	Inalatória - diminuição da fertilidade e peso infantil.
27	Elementar	Inalatória - doenças pulmonares, asfixia e morte.

Fonte: ATSDR, 2019.

Vale descartar que apesar das três formas de distribuição do mercúrio apresentar danos à saúde, o mercúrio orgânico, em especial o metilmercúrio apresenta a maior toxicidade à saúde humana, devido ao seu mecanismo possibilitar a redução dos níveis de glutatona e enzimas antioxidantes, além de danos nas mitocôndrias e homeostase do cálcio intracelular.

Klaassen e Amdur (2013) subdivide a exposição ao mercúrio em alimentar, ocupacional, medicinal e acidental. Na via alimentar, o consumo de peixe é a principal fonte

de metilmercúrio, enquanto o mercúrio presente em recursos hídricos e aéreos não apresenta uma concentração significativa para intoxicação por Hg. Em relação à exposição ocupacional, Eisler (2003) descreve a inalação de vapor de mercúrio decorrente de atividades laborais, como: a mineração na extração de ouro, indústrias de cloro, fabricação de ferramentas odontológicas e dispositivos eletrônicos.

A via medicinal está ligada com o emprego de mercúrio na confecção de medicamentos diuréticos, antissépticos, laxantes, pomadas e vacinas, como por exemplo, o timerosal que consiste em um composto com uma ligação entre um grupo enxofre e um radical etilmercúrio. Enquanto, a exposição acidental é marcada por derramamentos de mercúrio ou contaminação por resíduos industriais em águas e plantações, sendo considerado a principal causa de morte derivada de intoxicação por Hg.

3 JUSTIFICATIVA

A Lagoa Mundaú dispõe de uma área de aproximadamente 23 km², está localizada no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) e banha as cidades de Maceió, Santa Luzia do Norte, Pilar, Coqueiro Seco e Marechal Deodoro. O espaço em questão tem um valor socioeconômico relevante para a população alagoana devido à pesca e comercialização de peixe e bivalve local, como o sururu.

Porém, a acentuada produção de resíduos domésticos e industriais e o descarte deste em locais inapropriado, como: ruas, lagoas, entre outros, inclui espécies com toxicidade elevada contribuindo para o aumento do índice de contaminação ambiental e riscos à saúde humana da população vizinha. Portanto, as determinações de Hg em diferentes amostras são importantes para estudar o nível de exposição nos locais de análise, verificando assim se as concentrações se encontram ou não dentro do permitido pela legislação vigente, além de auxiliar no entendimento da dinâmica ambiental no ecossistema estudado. Assim, neste trabalho será realizada a determinação do Hg total e inorgânico em água da Laguna Mundaú, determinação de Hg em sururu, sangue e urina de pescadores locais da Laguna Mundaú (Maceió, AL).

4 CONTRIBUIÇÃO PARA A SOCIEDADE

A Laguna Mundaú é um ambiente com grande desenvolvimento produtivo, tendo como principal fonte de renda da população vizinha a pesca e a comercialização do sururu. No entanto, a condição de sobrevivência da grande parcela dos moradores desse local é precária devido a situação de risco que são expostos, como a falta de saneamento básico. Assim, esse trabalho tem como objetivo apresentar dados sobre a possível contaminação ambiental do local.

5 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

5.1 Objetivo geral

Avaliar a contaminação ambiental da Laguna Mundaú (Maceió, AL) por mercúrio em amostras ambientais (água, sedimento e sururu) e biológicas (sangue e urina de pescadores e grupo controle).

5.2 Objetivos específicos

- (i) Avaliar as concentrações do Hg total, Hg total dissolvido e as frações de Hg na forma inorgânico e orgânica em amostras de água da Laguna Mundaú (Maceió, AL);
- (ii) Determinar a concentração do Hg total em amostras de sururu (*Mytella charruana*) provenientes da lagoa Mundaú (Maceió - AL) em seis campanhas de amostragem;
- (iii) Determinar o nível de mercúrio total em amostras de sedimento da lagoa Mundaú (Maceió - AL) em seis campanhas de amostragem;
- (iv) Avaliar a concentração do Hg total em amostras de urina e sangue de voluntários que residem na vizinhança da lagoa Mundaú (Maceió - AL), preferencialmente pescadores, e comparar com grupo controle em condições socioeconômicas similares.

6 METODOLOGIA

6.1 Área de pesquisa, amostras de água e sururu.

A área de pesquisa desse trabalho consistiu o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), mais precisamente na Laguna Mundaú no entorno da cidade de Maceió (Alagoas, Brasil). Conforme, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA nº 357/2005) as águas desse ecossistema são classificadas como salobra (classe I), sendo destinada para atividades de pesca, recreação, agricultura, aquicultura e criação de animais (CONAMA, 2005).

No projeto foram realizadas seis amostragens entre os períodos de julho de 2021 e fevereiro de 2023 para amostras de água superficial (até 20 cm de profundidade) em 11 pontos amostrais diferentes (Figura 8), levando em consideração para a seleção dos pontos (todas as coordenadas estão detalhadas na Tabela 3): liberação de esgotos, elevada ocupação industrial, proximidade de indústrias e locais de pescas de sururu. Ainda na Tabela 3 foi considerado o índice de população dos bairros onde os pontos amostrais são contidos (IBGE, 2010). É importante ressaltar que esses dados foram fornecidos pelo senso demográfico de 2010 e após esse ano o cenário de ocupação populacional no entorno da Laguna Mundaú sofreu inúmeros modificações, principalmente devido aos tremores de terra da região.

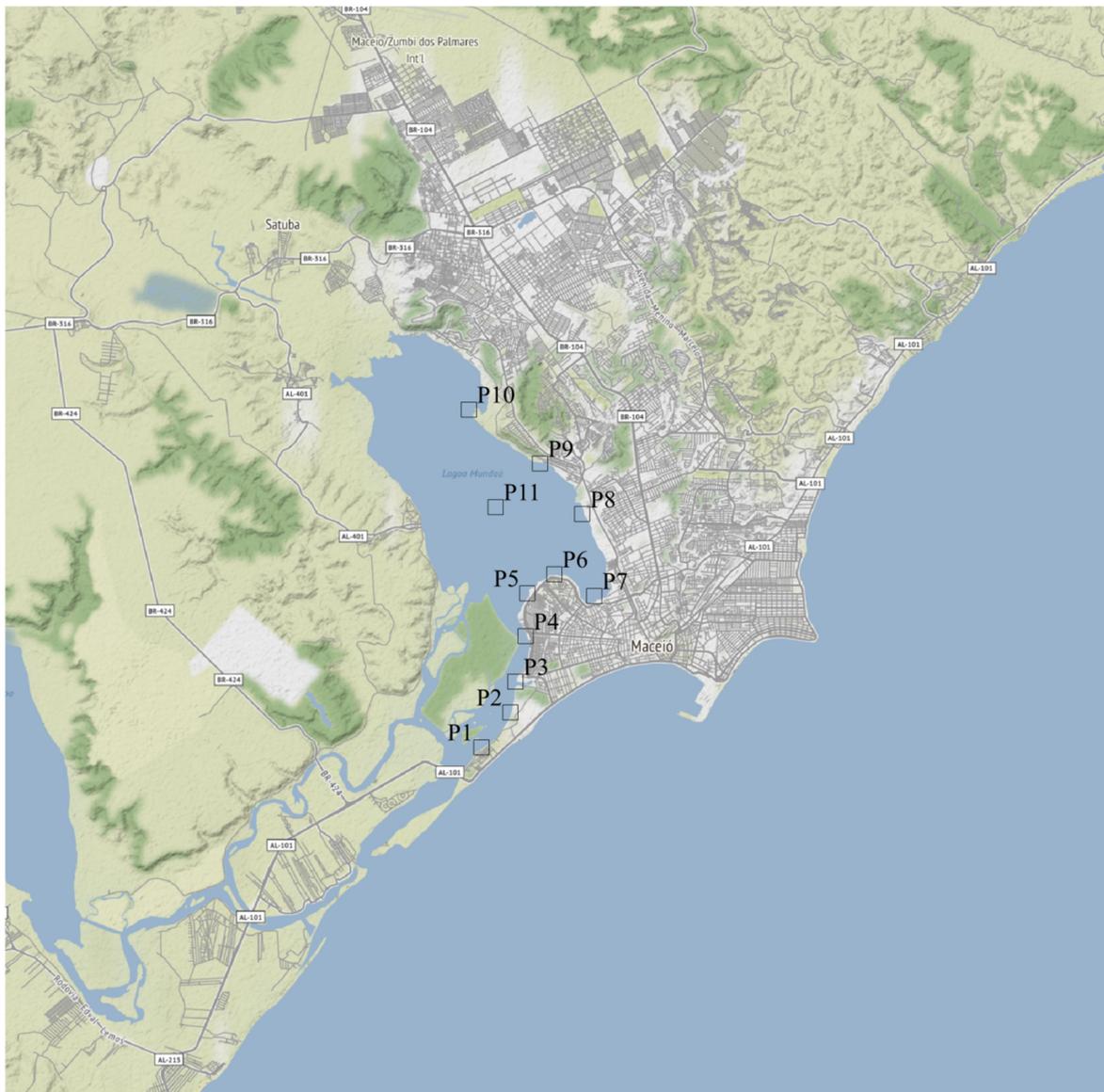
As amostras de água foram armazenadas em frascos de vidro transparente acidificados com HNO_3 (2,5% v/v) e vidro âmbar não acidificada, posteriormente foram mantidas sob refrigeração a 4°C até o momento da análise. As amostras de água foram submetidas a dois processos de pré-tratamento para determinação de mercúrio: (1) filtração com uma membrana de acetato de celulose (0,45 μm) para determinação do mercúrio dissolvido total e inorgânico; (2) digestão ácida por um sistema de micro-ondas fechado com alta pressão (Ethos One, Milestone, Sorilose, Itália) para quantificação do mercúrio total.

É importante mencionar que o “Guia Nacional de Coleta” da ANA (2011) recomenda que a coleta de água para análise de metais, inclusive mercúrio, podem ser realizadas em frascos de plásticos ou vidros, porém trabalhos disponíveis na literatura como Kasper et al. (2015) sugerem que frascos de vidro são mais recomendados para a amostragem desse material, visto que recipientes de plástico possibilitam a degradação do mercúrio orgânico nas suas paredes internas, além da adsorção e difusão do mercúrio gasoso. Desse modo, foram utilizados frascos de vidro para evitar a contaminação por meio da adsorção de Hg em plástico.

A coleta do bivalve e sedimento aconteceu de forma simultânea com as amostragens de água com auxílio de um pescador local, esses materiais foram acondicionados em sacos plásticos com sistema de vedação. Em seguida, o bivalve foi armazenado sob refrigeração a temperatura de -20°C (*freezer*) até o processo de retirada do tecido mole das conchas e liofilização (retida da água da amostra). Após a secagem, as amostras foram digeridas por meio de um sistema de digestão por micro-ondas (Ethos One, Milestone, Sorilose, Itália). Neste contexto, é importante mencionar que a partir da amostragem 4 houve o aparecimento de uma espécie de molusco bivalve invasora. As amostras de sedimento após as campanhas de amostragem foram secas a temperatura ambiente. Finalizada essa etapa, o material foi analisado por um Analisador Direto de Mercúrio - DMA-80 (Milestone, Italy).

Além disso, durante as amostragens foram realizadas medidas *in situ* para avaliação dos seguintes parâmetros físico-químicos: pH, temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade, salinidade e sólidos totais dissolvidos com o auxílio uma sonda multiparâmetros (Combo 5, Akso, 2021).

Figura 8. Mapa dos pontos de amostrais de água, sururu e sedimento.



Fonte: Adaptado do Google, 2021.

Tabela 3. Dados das amostragens - coordenadas cartesianas dos pontos amostrais, índices pluviométricos e tábuas da maré das amostragens.

Ponto (P)	Latitude ("S)	Longitude ("W)	Ponto de referência	IP _p
P1	9°41'26.5	35°46'35.0	Fundo do restaurante O Peixarão (Pontal)	2478
P2	9°40'55.9	35°46'09.8	Fundo da Braskem (Pontal)	2478
P3	9°40'29.0	35°46'05.5	Canal antes do Papódromo (Trapiche)	25303
P4	9°39'49.1	35°45'56.6	(Ponta Grossa)	21796
P5	9°39'11.6	35°45'55.1	Canal de esgoto próximo a peixaria Caguna (Vergel do Lago)	31538
P6	9°38'54.9	35°45'31.6	(Vergel do lago)	31538
P7	9°39'13.9	35°44'56.9	Entre os dois esgotos próximos do posto lagoa (Levada)	10882
P8	9°38'02.1	35°45'07.4	Fundo do Pinheiro (fundo do local de escavação Braskem) (Pinheiro)	19062
P9	9°37'17.8	35°45'44.1	Próximo da Praça Nossa Senhora das Dores (Chã de Bebedouro)	10103
P10	9°36'30.6	35°46'45.9	Próximo ao Mirante Natural Laguna Mundaú (Fernão Velho)	5752
P11	9°37'56.0	35°46'22.7	Meio da laguna	-

Informações gerais e bivalve						
Amostragem (A)	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Período	07/2021	10/2021	03/2022	07/2022	12/2022	02/2023
Índice Pluviométrico (mm)	119,8	34	112,4	352,4	88,2	69,8
Tábua da maré	Chuvoso	Seca	Chuvoso	Chuvoso	Seca	Seca
Tipos do bivalve	MC	MC	MC/MS	MS	MS	MS

IP_p: Índice de população (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010); MC: *Mytella charruana*; MS: *Mytilopsis Sallei*; NI: Não informado.

Fonte: AUTORA, 2023.

6.2 Reagentes e soluções

Os reagentes utilizados no projeto: ácido clorídrico, ácido nítrico, peróxido de hidrogênio, cloreto de estanho, ácido ascórbico, brometo de potássio, bromato de potássio, biftalato de potássio e fenolftaleína, apresentam alto grau de pureza analítica e foram adquiridos por alguma das empresas a seguir, Merck (Alemanha), Sigma-Aldrich (USA), Vetec (Brasil) e JT Baker (Brasil), sem necessidade de purificação. As soluções utilizadas foram preparadas em água ultrapura obtida a partir do sistema de Gehaka (São Paulo, Brasil) com 18,2 MΩ cm. Além disso, a descontaminação de todas as vidrarias utilizadas foi realizada através das seguintes etapas: (1) uma lavagem inicial com HNO₃ 10% (v/v) por um período mínimo de 12 h; e (2) lavagem com água ultrapura, e finalmente a secagem.

Todas as soluções foram preparadas diariamente antes das análises. Para o preparo da solução redutora foi estabelecida a proporção de 2% (m/v) de SnCl₂ para 0,5 mol L⁻¹ de HCl. Enquanto a solução de KBr e KBrO₃ foi preparada a 0,10 e 0,017 mol L⁻¹, respectivamente. Por fim, as curvas analíticas de mercúrio total e mercúrio inorgânico foram realizadas diariamente empregando soluções padrão (1000 µg mL⁻¹, São Paulo, Brasil) do elemento químico correspondente.

6.4 Determinação do mercúrio total, dissolvido e inorgânico em água estuarina

A determinação de mercúrio total e inorgânico foi realizada empregando espectrometria de fluorescência atômica com vapor frio – CV AFS (PS Analytical, modelo 10.025 Millennium Merlin). O equipamento multiusuário encontra-se instalado na Central Analítica da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), e empregou-se os seguintes parâmetros (Tabela 4).

Tabela 4. Parâmetros usados para determinação do Hg por CV AFS.

Parâmetro	Valor
Tempo de atraso (s)	5
Tempo de análise (s)	40
Tempo de memória / limpeza (s)	40
Ganho	100
Comprimento de onda (nm)	253,7
Fluxo do SnCl ₄ (mL min ⁻¹)	4,5
Fluxo do HCl (mL min ⁻¹)	9,0
Vazão do ar sintético (L min ⁻¹)	2,5
Vazão do gás argônio (mL min ⁻¹)	34,8

Fonte: Autora, 2023.

O bombeamento ocorre empregando solução carreadora (HCl), a qual é misturada a solução redutora (SnCl₂) em linha, e em seguida, a solução do branco analítico, ou solução padrão ou amostra, assim, formando o Hg⁰, quando o analito está presente. Em seguida, o Hg⁰ formado e as soluções são transportadas para o separador gás-líquido. Nesse processo, o Hg⁰ é direcionado para um sistema de secagem (sistema de tubos homocêntricos com fluxo de ar sintético seco), com auxílio do fluxo contínuo de argônio. Em seguida, o Hg⁰ é encaminhado para o sistema de detecção, onde os átomos de Hg⁰ formados são excitados com fonte de radiação de comprimento de onda específico, e ao retornarem ao estado fundamental, a emissão de radiação é medida.

Para determinação do Hg total dissolvido (Hg_{DIS}) foram utilizadas as amostras de água armazenadas em frascos vidro acidificados com HNO₃ 2,5% (v/v). Em balões de 25 mL foram utilizados 8,0 mL da amostra, 5,0 mL de HCl 5% (v/v), 500 µL de solução de KBr (0,10 mmol L⁻¹) e KBrO₃ (0,017 mol L⁻¹) e 40 µL de ácido ascórbico a 12% (m/v) (SANTOS et al., 2021). Vale ressaltar que a solução de brometo e bromato de potássio foi usada com o objetivo da conversão de compostos organomercúricos em mercúrio inorgânico (RENLI et al., 1999). As amostras acondicionadas em frascos de vidro âmbar não acidificadas foram usadas para determinar do mercúrio inorgânico (Hg_{INO}). Assim, em um balão de 25 mL, foram adicionados 8,0 mL da amostra e 5,0 mL de HCl 5% (v/v). Com isso, a concentração e o desvio padrão (SD) do Hg orgânico (Hg_{ORG}) foi obtido por meio das equações abaixo:

$$C_{\text{Hg}_{\text{ORG}}} = C_{\text{Hg}_{\text{DIS}}} - C_{\text{Hg}_{\text{INO}}} \quad (1)$$

$$SD_{\text{Hg}_{\text{ORG}}} = \sqrt{(SD_{\text{Hg}_{\text{DIS}}})^2 + (SD_{\text{Hg}_{\text{INO}}})^2} \quad (2)$$

No que se refere à determinação do Hg total (Hg_{TOTAL}) foi aplicado inicialmente o procedimento de digestão ácida por um sistema de micro-ondas fechado de alta pressão com HNO₃ seguido o protocolo da *Environmental Protection Agency* - EPA 3015^a (Tabela 5). Essa agência internacional recomenda que o procedimento de digestão ácida seja empregado em amostras de água cuja turbidez ultrapasse o valor de 1 NTU, pois acima desse valor o analito estará disponível preferencialmente na porção sólida associada (EPA, 2007).

Tabela 5. Programa de digestão com aquecimento assistido por radiação micro-ondas aplicado as amostras de sururu.

Etapa	Tempo (min)	Potência (W)	Temperatura (°C)
I	5	850	175
II	10	850	175

Fonte: EPA, 2007.

6.5 Determinação de Hg em sururu

Inicialmente, as amostras do bivalve foram previamente congeladas e em seguida foram submetidas ao processo de liofilização por um período de 48 h, utilizando o liofilizador (Terroni LS300, São Carlos, Brasil). Assim, as secagens das amostras ocorreram por meio do processo de sublimação sob pressão reduzido e vácuo que possibilita a redução dos efeitos de oxidação e volatilização das espécies químicas.

Após o procedimento de liofilização, as amostras foram moídas objetivando uma maior homogeneidade das partículas. Em seguida, uma massa de 250 mg do molusco bivalve seca foi digerida utilizando 3,5 mL de HNO₃ 14 mol L⁻¹, 1,0 mL de H₂O₂ 30% (m/m) e 3,5 mL de água ultrapura empregando um sistema de digestão de micro-ondas fechado de alta pressão (Milestone, Ethos One, Sorisole, Italy) seguindo o programa de digestão da Tabela 6 (DOS SANTOS et al, 2021). Após esse procedimento de digestão, o mercúrio foi determinado por meio de CV AFS .

Tabela 6. Programa de digestão com aquecimento assistido por radiação micro-ondas aplicado as amostras de sururu.

Etapa	Tempo (min)	Potência (W)	Temperatura (°C)
I	4	750	90
II	2	750	90
III	8	1000	180
IV	20	1000	180

Fonte: DOS SANTOS et al. (2021)

6.6 Determinação de Hg em sangue e urina

As amostras de sangue e urina foram coletadas de dois grupos, sendo eles: (1) exposto: residentes no entorno da Laguna Mundaú que se alimentam constantemente com pescado da região, preferencialmente pescadores e marisqueiras; (2) controle: indivíduos com problemas de saúde, características socioeconômicas e hábitos cotidianos similares ao grupo exposto, sendo a principal diferença entre os dois grupos é alimentação baseada nos peixes e moluscos bivalve.

Inicialmente foi aplicado um questionário epidemiológico contendo perguntas sobre características gerais dos indivíduos e exposição ao ambiente de estudo, em seguida, foi assinado um termo de consentimento, conforme aprovação no Comitê de ética da UFAL (CAAE: 57998116.8.0000.5013). A coleta de sangue foi realizada em parceria com os grupos de pesquisa da Profa. Chiara Rachel Maciel Marinho do Centro Universitário – CESMAC e

da Profa. Ana Catarina Rezende Leite na Universidade Federal de Alagoas – UFAL. As amostras foram coletadas a vácuo em tubos olen de 6,0 mL contendo EDTA K₃, e livres de metais. As amostras da primeira urina do dia foram entregues por cada pessoa em coletores apropriados. Tanto as amostras de sangue como as amostras de urinas foram armazenadas até o dia da análise a -20°C.

Inicialmente, 1,0 mL das amostras de sangue foram submetidas ao processo de digestão ácida com 6,0 mL de HNO₃ 14 mol L⁻¹, 2,0 mL de H₂O₂ 30% (m/m) e 1,0 mL de água ultrapura (Tabela 7). Por sua vez, 2,0 mL das amostras de urina foram digeridas pelo procedimento de digestão ácida com 4,0 mL de HNO₃ 14 mol L⁻¹, 2,0 mL de H₂O₂ 30% (m/m) e 1,0 mL de água ultrapura, posteriormente o Hg de ambas as amostras foi determinado por CV AFS (SILVA-FILHO et al., 2021).

Tabela 7. Programa de digestão com aquecimento assistido por radiação micro-ondas aplicado as amostras de sangue e urina.

Etapa	Tempo (min)	Potência (W)	Temperatura (°C)
I	10	900	130
II	5	900	130
III	15	900	180
IV (ventilação)	20	0	40

Fonte: SILVA-FILHO et al. (2021).

6.7 Tratamento estatístico

Todos os resultados foram expressos em termos de média ± desvio padrão para medidas em triplicata ($n = 3$). Além disso, foram avaliados os limites de detecção, precisão e exatidão dos métodos aplicados. O limite de detecção (LD) baseia-se na menor concentração do analito que pode detectada pelo equipamento sem precisamente ser quantificada (ANVISA, 2003). O LD é obtido pelo produto do fator 3,3 pelo desvio padrão do branco analítico (SD_{branco}) com $n = 10$ e a inclinação da curva analítica (b), conforme a equação:

$$LD = \frac{3,3 \cdot SD_{branco}}{b} \quad (3)$$

A precisão é definida como um parâmetro que investiga a proximidade entre medições da mesma amostra. Essa medida pode ser expressa em termo de desvio padrão, variância ou coeficiente de variação (ANVISA, 2003). No caso da precisão expressa por meio do desvio padrão relativo (RSD), é avaliada pela razão entre o desvio padrão (SD) de uma série de medições ($n \geq 10$) de soluções da mesma concentração e a média das medições (X), conforme a equação:

$$\text{RSD (\%)} = \frac{SD}{X} \times 100 \quad (4)$$

A exatidão consiste na conformidade entre o valor real e estimado da amostra, entre as metodologias aplicadas para realização desse estudo estão comparação entre o método de referência e o método proposto, uso de material de referência certificado (MRC) e ensaios de recuperação na matriz (ANVISA, 2003).

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Figuras de mérito da metodologia empregada

Inicialmente foram calculados os limites de detecção e o grau de precisão dos métodos aplicados no trabalho, vale destacar que o método relacionado ao mercúrio total e dissolvido já tinha sido bem estabelecido pelo grupo de pesquisa em estudos anteriores. Assim, a Tabela 8 apresenta os valores de limite de detecção, RSD e faixa linear.

Tabela 8. Valores dos limites de quantificação, RSD e faixa linear.

Analito	LD ($\mu\text{g L}^{-1}$)	RSD (%)	Faixa linear ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Hg _{TOTAL} /Hg _{DIS}	0,007	1,26 – 6,07	0,025 – 1,2
Hg _{INO}	0,008	3,62 – 6,12	0,025 – 1,2

Fonte: AUTORA, 2023.

7.2 Exatidão dos métodos

Neste caso, a exatidão dos métodos foi avaliada por meio de ensaios de recuperação na matriz desejada, conforme as Tabelas 9 a 11. Os resultados obtidos alcançaram recuperações entre 80-120%. (AOAC, 2002).

Tabela 9. Ensaio de adição e recuperação de Hg_{DIS} em amostras de água.

Valor adicionado ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Valor encontrado ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Recuperação (%)
0,00	0,10	-
0,25	0,30	85
1,00	1,07	97

Fonte: DOS SANTOS et al., 2021.

Tabela 10. Ensaio de adição e recuperação de Hg_{INO} em diferentes pontos de amostragem das amostras de água.

Adicionado ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Pontos de amostragem de água					
	P1		P4		P6	
	Obtido ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Rec. (%)	Obtido ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Rec. (%)	Obtido ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Rec. (%)
0	0,0391 ± 0,0017	-	0,0011 ± 0,0002	-	0,0212 ± 0,0031	-
0,2	0,2080 ± 0,0052	87%	0,197 ± 0,0026	94	0,2040 ± 0,0007	92
0,4	0,4531 ± 0,0007	103%	0,3841 ± 0,0018	96	0,4271 ± 0,0025	101
0,8	0,7509 ± 0,0103	90%	0,8123 ± 0,0204	100	0,7877 ± 0,0231	95

Fonte: AUTORA, 2023

Tabela 11. Ensaio de adição e recuperação de Hg_{TOTAL} em amostras de sangue.

Valor adicionado ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Valor encontrado ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Recuperação (%)
---	---	-----------------

0,00	0,22	-
2,50	2,59	95
5,00	4,72	90
10,00	9,55	93

Fonte: DOS SANTOS et al., 2021.

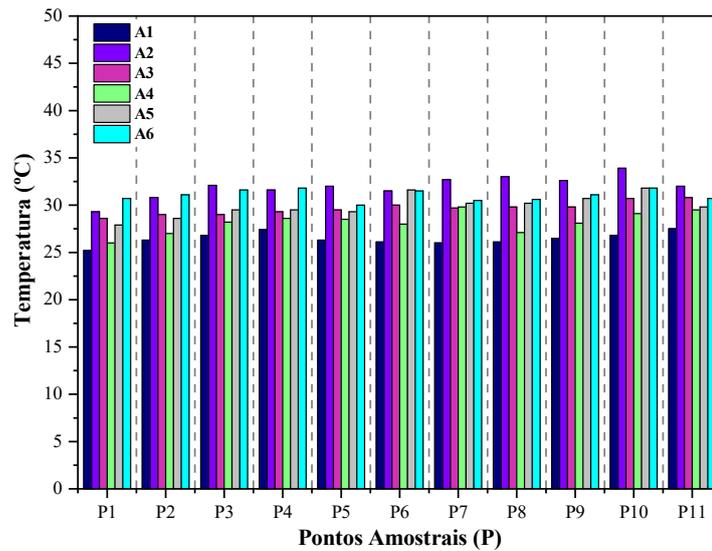
Além disso, os métodos aplicados para determinação de mercúrio total em amostras de sangue, urina e água também já foram bem estabelecidos pelo grupo (SANTOS et al., 2021). Com isso, apenas o ensaio de adição e recuperação de Hg_{INO} em amostras de água foi avaliado por este trabalho para essa avaliação foi selecionado os pontos que apresentam o maior, menor e valor intermediário de matéria orgânica (P4, P6, P1) para avaliar este parâmetro poderia levar a variação na quantificação do mercúrio.

7.3 Avaliação dos parâmetros físico-químicos

A realização da análise *in situ* dos parâmetros físico-químicos apresentam relevância para a avaliação da qualidade da água, viabilizando a identificação de possíveis fontes de contaminação ambiental e caracterização dos recursos naturais. Assim, neste trabalho foram analisados a temperatura, potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio dissolvido, sólidos totais dissolvidos, condutividade e salinidade.

A temperatura é um fator ambiental que interfere diretamente nos demais parâmetros físico-químicos, assim um aumento na temperatura do meio promove a diminuição do pH, densidade, nível de oxigênio dissolvido, entre outros (TUCCI, 2004). As temperaturas das águas avaliadas durante o projeto variaram entre 25,2 a 33,9 °C. A Figura 9 ainda mostra as menores temperaturas foram encontradas durante a amostragem 1 e as maiores durante a amostragem 2. É importante mencionar que não existe norma específica sobre a temperatura desse tipo água, apenas é citada pela Resolução CONAMA 357/2005 o limite máximo de 40°C para os lançamentos de efluentes, logo não existe indícios de contaminação ambiental direta relacionada por despejo de resíduos domésticos e industriais.

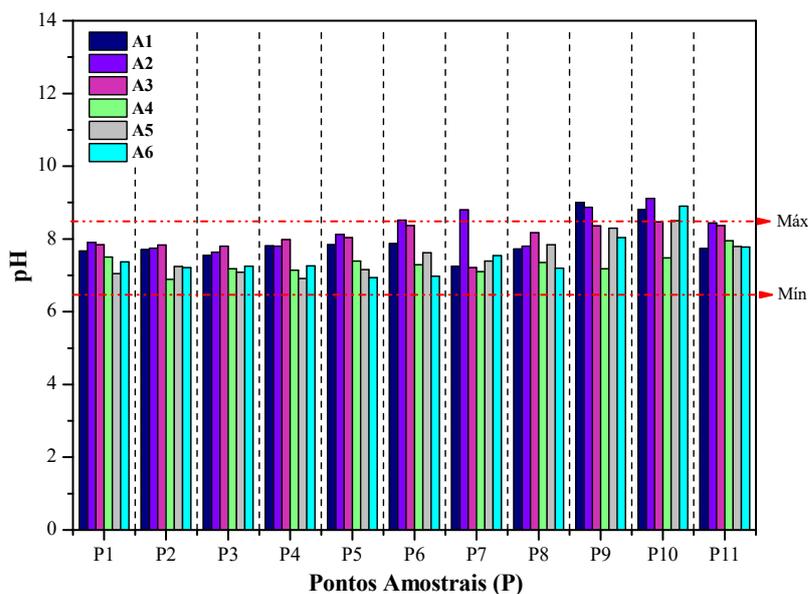
Figura 9. Gráfico com os valores de temperatura obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.



Fonte: AUTORA, 2023

O potencial hidrogeniônico (pH) está relacionado diretamente com o nível de precipitação dos elementos no meio aquoso devido as suas interações com os minerais presentes nos ecossistemas aquáticos, como: sedimento, solo e rocha, essas reações possibilitam a ocorrência da lixiviação. A Figura 10 apresenta os valores de pH encontrados nos 11 pontos durante as 6 amostragens realizadas. Os valores de pH variaram entre 6,89 - 9,11, sendo que o maior valor ocorreu na amostragem 3. A Resolução CONAMA 357/05 define o intervalo de valor de pH entre 6,5 e 8,0 para água salobra (classe I). É possível observar que nas amostragens 1, 2 e 6 ocorreram alguns pontos que estavam acima do valor limite da legislação. De modo geral, o intervalo dos valores de pH obtido foi similar aos dados reportados pelo trabalho de Santos et al. (2021) que constatou a variação do pH da Laguna Mundaú de 6,72 – 9,14 entre o período de junho/2017 a abril/2019

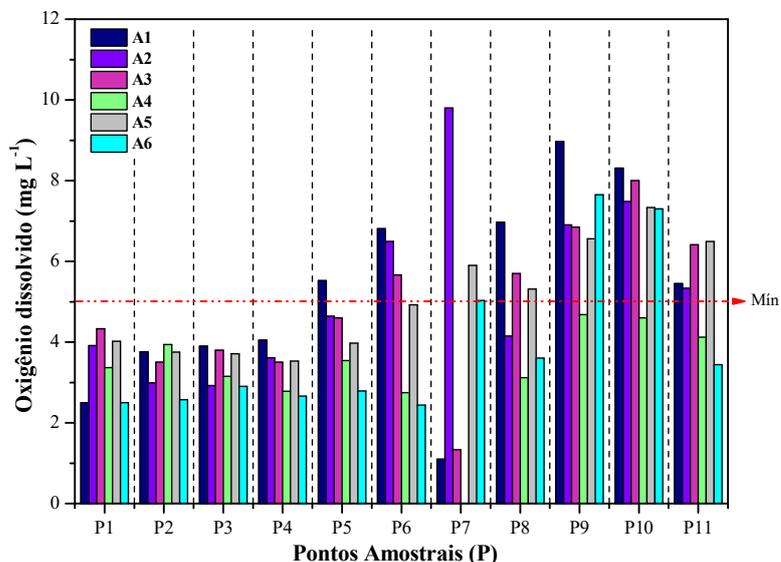
Figura 10. Gráfico com os valores de pH obtidos nas amostragens entre julho/2021 e fevereiro/2023.



Fonte: AUTORA, 2023

O oxigênio dissolvido (OD) está relacionado de modo direto com a manutenção da vida aquática e a capacidade da Laguna restaurar suas características naturais diante a exposição de uma fonte poluente. Para o tipo de água estudada a Resolução CONAMA 357/2005 estabelece que a concentração do OD não seja inferior a 5 mg L^{-1} , assim observa-se que os pontos 1 a 4 em todas as amostragens apresentaram valores abaixo do recomendado. Por outro lado, os pontos 8 a 11 exibiram mais valores de OD dentro do preconizado pela legislação vigente, exceto na amostragem 4 e 6, Figura 11.

Figura 11. Gráfico com os valores de oxigênio dissolvido obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.

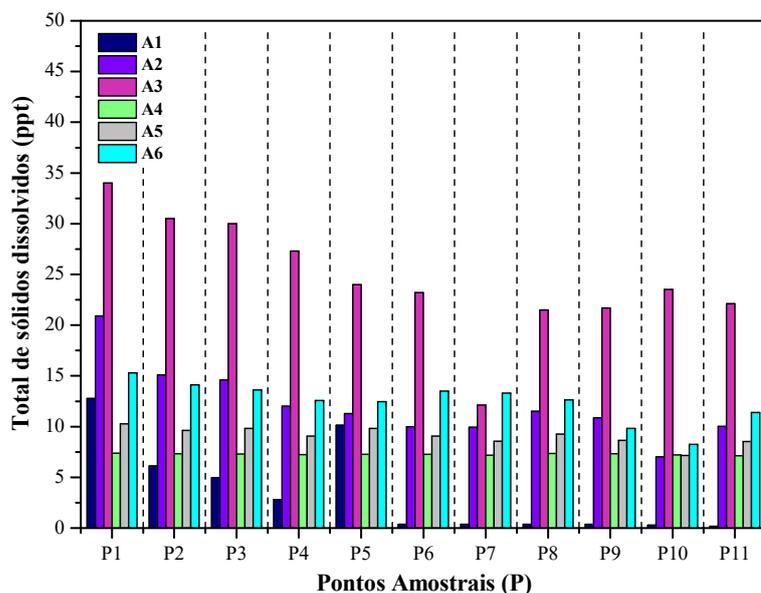


Fonte: AUTORA, 2023.

Ainda sobre este parâmetro foi realizado um estudo por de Souza e colaboradores (2021) que descreve que o nível mínimo de OD recomendado para existência de molusco bivalve é 5 mg L^{-1} , apesar dessa condição ser considerada ideal para a sobrevivência dos bivalves na Laguna Mundaú foi possível coletar sururu nos pontos 2 e 4 que apresentam valores abaixo do recomendado. Além disso, em águas com a concentração de oxigênio dissolvido menores de 2 mg L^{-1} acontece o fenômeno conhecido de hipóxia que aumenta o índice de mortandade das espécies aquáticas, Figura 11.

Os sólidos totais dissolvidos (TDS) estão relacionados com os sais, metais e minerais dissolvidos na água. Entre os principais sais inorgânicos avaliados nesse grupo encontram-se os cloretos, sulfetos, bicarbonatos, sódio, potássio, cálcio e magnésio. O nível de TDS elevado retarda o processo de fotossíntese das plantas aquáticas, provoca turvação, aumento das temperaturas e diminuição dos níveis de OD. As concentrações de TDS variaram de $0,165$ a $30,50 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 12), a Resolução CONAMA 357/05 não regulamenta esse parâmetro.

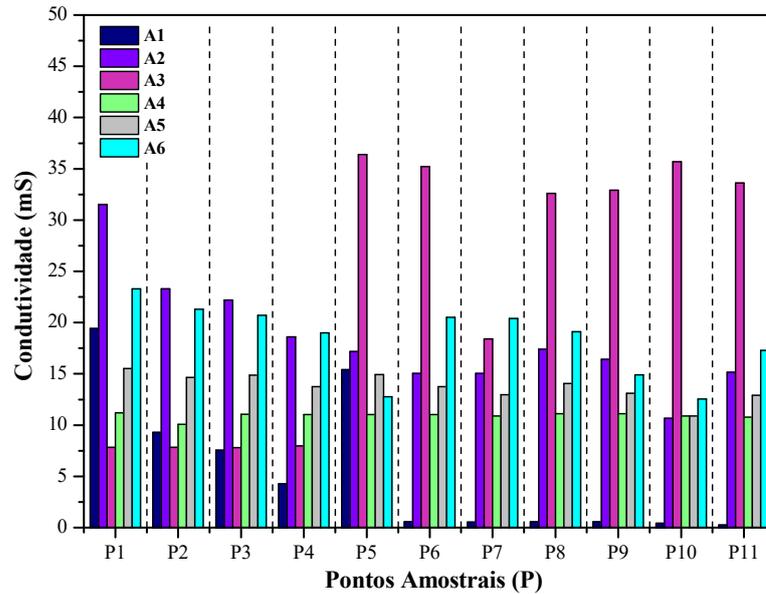
Figura 12. Gráfico com os valores de sólidos totais dissolvidos obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.



Fonte: AUTORA, 2023.

A condutividade elétrica possibilita estabelecer uma relação a respeito dos impactos ambientais causados por descarte inapropriado de resíduos industriais e domésticos (DE SOUZA et al, 2014). Além disso, está relacionada com a variação de temperatura e a concentração de substâncias ionizadas dissolvidas na água. Os valores medidos na Laguna Mundaú encontram-se no intervalo de $0,255 - 35,700 \text{ mS}$, esse parâmetro também não é legislado (Figura 13).

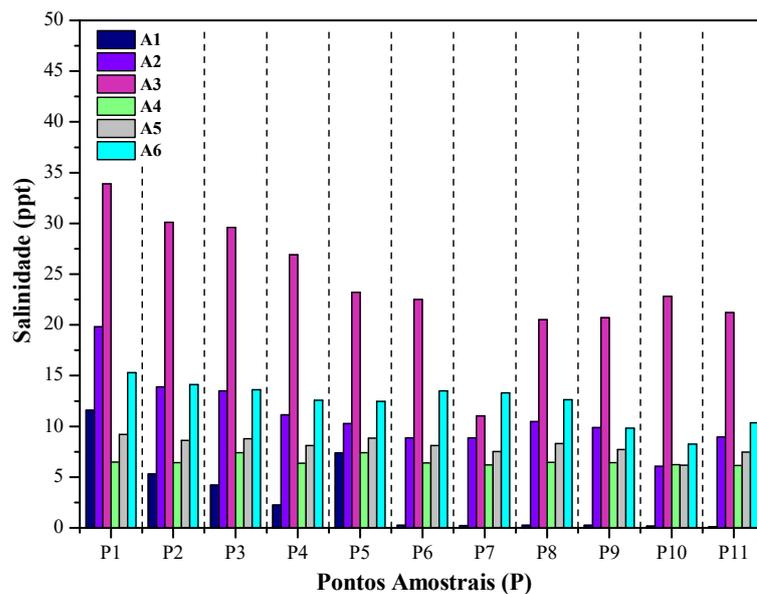
Figura 13. Gráfico com os valores de condutividade elétrica obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.



Fonte: AUTORA, 2023.

A salinidade refere-se a teor de sal dissolvido nessa matriz, assim o CONAMA 357/05 classifica as águas do CELMM como salobra. Esse tipo de água deve ter a salinidade superior a $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ e inferior a 30 mg L^{-1} . As salinidades observadas durante as 6 amostragens variaram de $0,102 - 33,900 \text{ mg L}^{-1}$, ainda é possível observar a diminuição da salinidade nos pontos mais afastados do oceano (Figura 14).

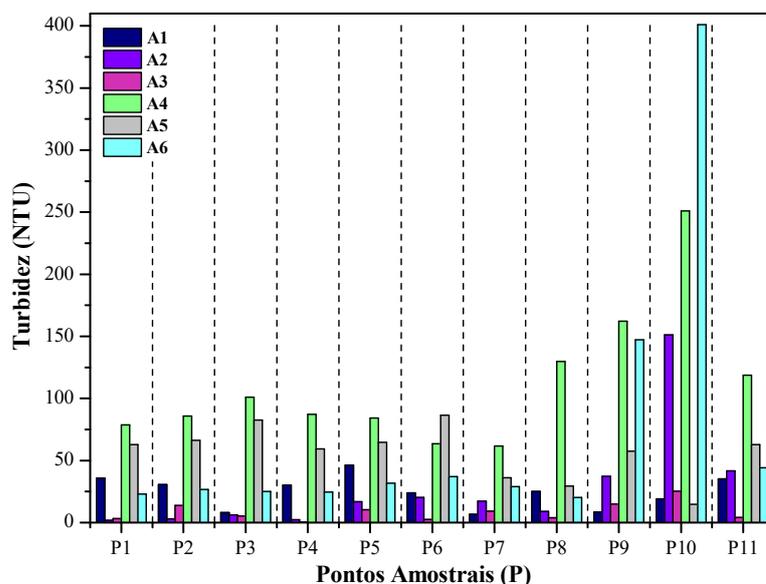
Figura 14. Gráfico com os valores de salinidade obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.



Fonte: AUTORA, 2023.

A turbidez é definida como o parâmetro que avalia a quantidade de partículas em suspensão presente nos corpos d'água. Este influencia na propagação de luz no ambiente aquático, ou seja, esse fator influencia diretamente na manutenção da vida do ecossistema (DE SOUZA et al, 2014). A Figura 15 apresenta os valores de turbidez medidos nas amostras de água nas seis amostragens realizadas, esses valores de modo geral são superiores 1 NTU, assim de acordo com *Environmental Protection Agency - EPA 3015^a* faz-se necessário a realização do procedimento de digestão ácida para determinação da concentração total do elemento de interesse no sistema, pois quando se realiza apenas o procedimento de filtragem com pré-tratamento da amostra é a apenas quantificada a porção dissolvida devido o elemento poder estar aprisionado no material particulado.

Figura 15. Gráfico com os valores de turbidez obtidos nas amostragens entre julho/2021 a fevereiro/2023.



Fonte: AUTORA, 2023.

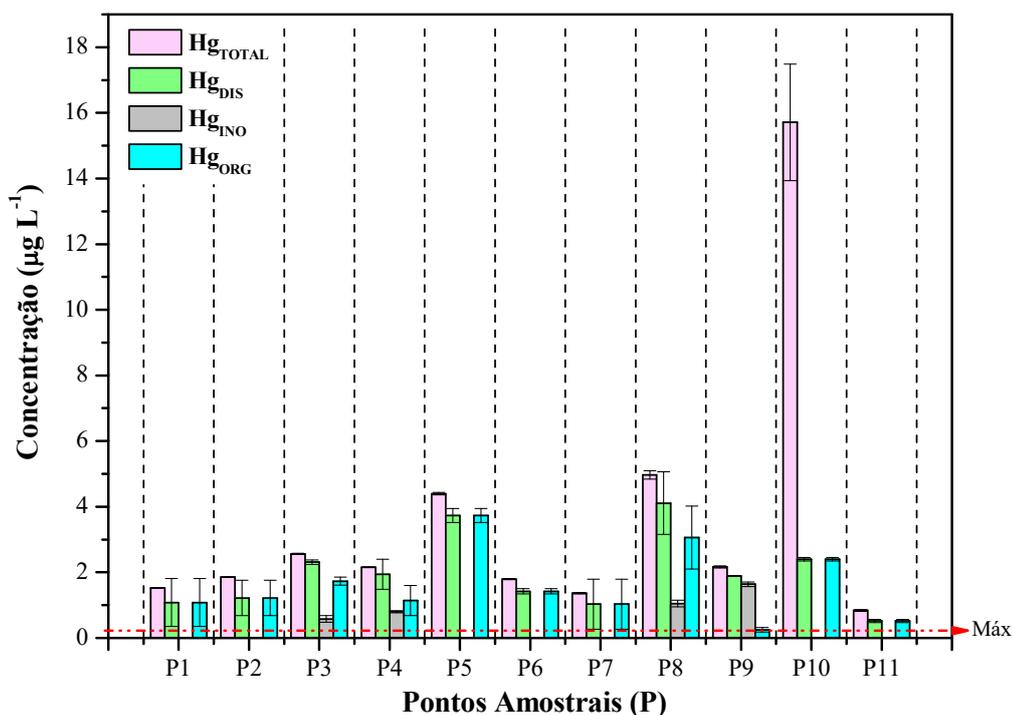
7.4 Determinação de mercúrio total, dissolvido e inorgânico em água.

A água do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Mangaba é classificada como salobra classe 1. Segundo a Resolução N° 357/2005 do CONAMA, esse tipo de recurso é utilizado geralmente no cultivo de seres aquáticos (aquicultura), pesca, irrigação de pequenas plantações e atividades de recreação, como: passeios de barcos, esqui aquático, mergulho e natação. Além disso, o CONAMA como órgão regulamentador de diretrizes ambientais para a preservação do meio ambiente estabelece valores máximos para compostos inorgânicos e orgânicos nesse tipo de água para avaliação de contaminação ambiental por substâncias

potencialmente tóxicas, como por exemplo, o teor máximo de mercúrio designado pela Resolução N° 357/2005 desse órgão equivale a $0,2 \mu\text{g L}^{-1}$.

Tendo como base, esse valor legislado fora determinado e avaliadas as concentrações de mercúrio total (Hg_{TOTAL}), mercúrio total dissolvido (Hg_{DIS}), e as frações de Hg na forma inorgânica (Hg_{INO}) e orgânica (Hg_{ORG}) nas águas da Laguna Mundaú em 11 pontos amostrais durante seis campanhas de amostragens entre os meses de julho/2021 e fevereiro/2023. A Figura 16 mostra que na amostragem 1 que foi realizada no mês de julho/2021 todos os valores de concentração obtidos para o Hg total, dissolvido e orgânico foram superiores ao valor preconizado pela legislação vigente, por outro lado não foi possível quantificar o analito na forma inorgânica em 7 pontos.

Figura 16. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 1 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em julho/2021.



Fonte: AUTORA, 2023.

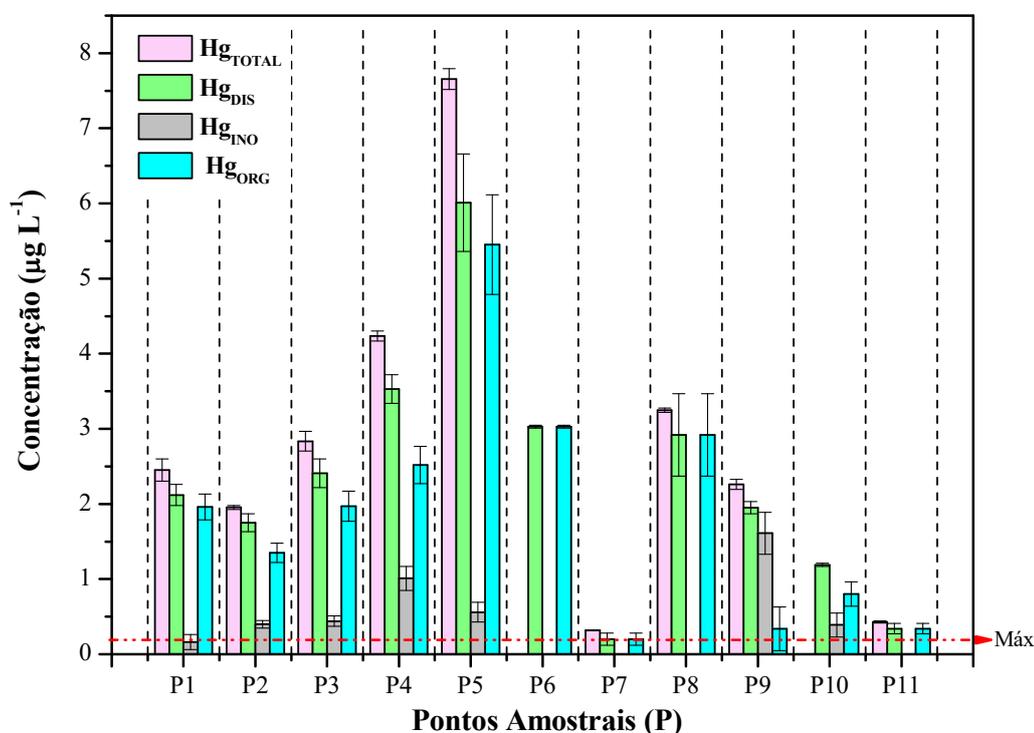
Em relação, as concentrações que foram passíveis de determinação, segundo a Figura 16, observa-se o intervalo de concentração para mercúrio total, mercúrio total dissolvido, inorgânico e orgânico de $0,84 - 15,71 \mu\text{g L}^{-1}$, $0,52 - 4,11 \mu\text{g L}^{-1}$, $0,58 - 1,64 \mu\text{g L}^{-1}$ e $0,25 - 3,73 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente.

Como isso, é possível inferir que os níveis de mercúrio determinados são superiores pelo menos 25% do valor legislado, destacando a concentração obtida para Hg total no ponto

10 que excedeu aproximadamente 80 vezes o teor máximo designado pela legislação vigente. Outro aspecto relevante a ser considerado é a forma orgânica é obtida como a fração majoritária, um fato alarmante visto que a maior toxicidade do mercúrio está associada à espécie química, em especial, o metilmercúrio.

Por sua vez, a Figura 17 apresenta as concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 2 realizada em outubro/2021, na qual as concentrações da fração total, dissolvida e orgânica são predominantemente superiores ao $0,2 \mu\text{g L}^{-1}$, indicando contaminação pelas espécies avaliadas, sendo os intervalos das concentrações iguais a $0,32 - 7,66 \mu\text{g L}^{-1}$ (Hg_{TOTAL}), $0,20 - 6,01 \mu\text{g L}^{-1}$ (Hg_{DIS}), $0,16 - 1,61 \mu\text{g L}^{-1}$ (Hg_{INO}) e $0,20 - 5,45 \mu\text{g L}^{-1}$ (Hg_{ORG}). É importante destacar que os pontos 7 e 11 nesse período aqueles que apresentaram menores teores de Hg e o ponto 5 que exibiu um nível do analito mais elevado em cerca de 40 vezes o valor de referência. Além disso, verificou-se que o mercúrio orgânico em relação ao mercúrio inorgânico apresenta maiores valores de concentrações da mesma forma que foi observado o mesmo comportamento na amostragem 1.

Figura 17. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 2 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em outubro/2021.

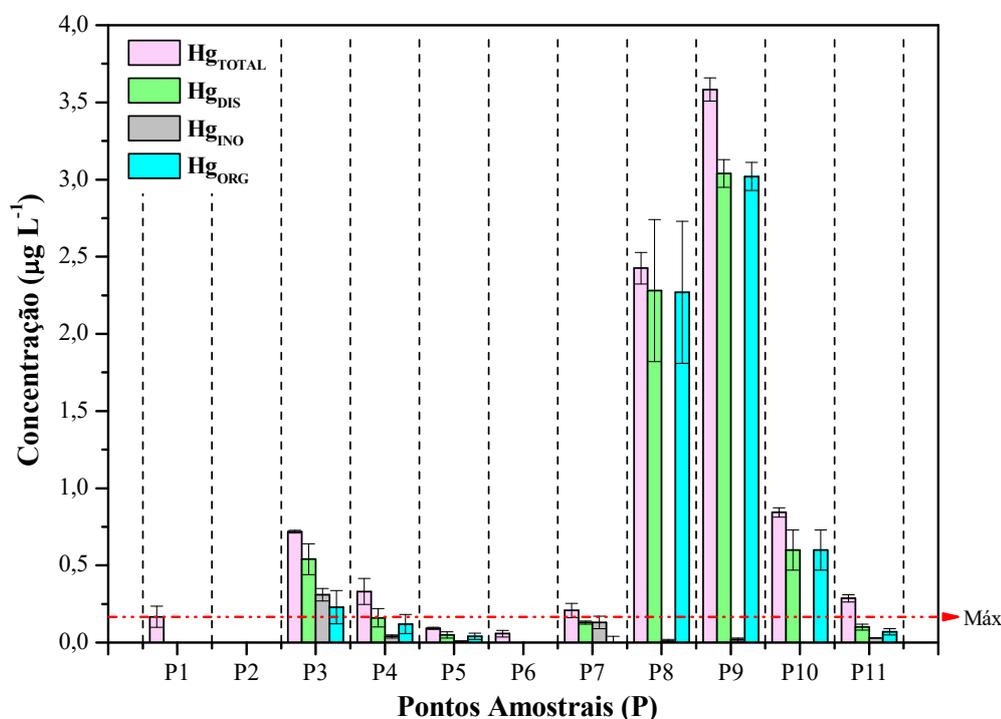


Fonte: AUTORA, 2023.

Já a Figura 18 exibe os resultados referentes à amostragem 3 que foi feita em março/2022, os valores observados retratam uma diminuição significativa nos teores de Hg

avaliadas, de modo geral 6 (P1, P2, P5, P6, P7 e P11) dos 11 pontos amostrais apresentam valores menores ou igual ao preconizado pela legislação. Apesar de tal diminuição, observou-se mesma configuração da distribuição majoritária do mercúrio orgânico, assim como nas demais campanhas de amostragens. Esse fenômeno pode ter sido motivado pela diminuição das atividades antrópicas, visto que foi iniciada a desocupação do entorno da Laguna Mundaú (Maceió, AL) desde 2018 devido ao afundamento no bairro do Pinheiro e adjacências, e a diminuição dos trabalhos voltados a mineração para recuperação da camada do solo que sofreu o afundamento no final do ano de 2021 e início de 2022.

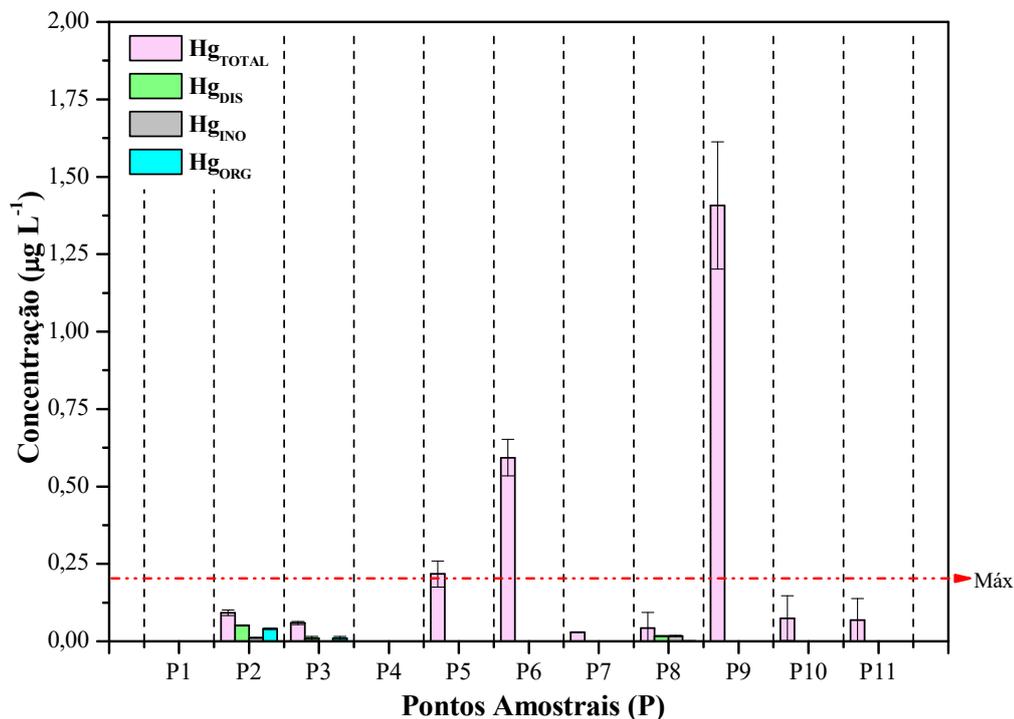
Figura 18. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 3 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em março/2022.



Fonte: AUTORA, 2023.

Na Figura 19 é mostrado as concentrações obtidas por meio das amostras coletadas na amostragem 4 que foi realizada no mês de julho/2022, esse período foi antecedido por fortes chuvas na cidade Maceió, AL entre os meses de maio e julho, tendo um índice pluviométrico registrado pelo INMET foi de 352,4 mm. Este fenômeno natural pode ter ocasionado uma maior diluição do analito nas amostras. Além disso, nessa amostragem a concentração do mercúrio orgânico chegou a cerca de 100% do valor da concentração do Hg_{DIS}.

Figura 19. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 4 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em julho/2022.

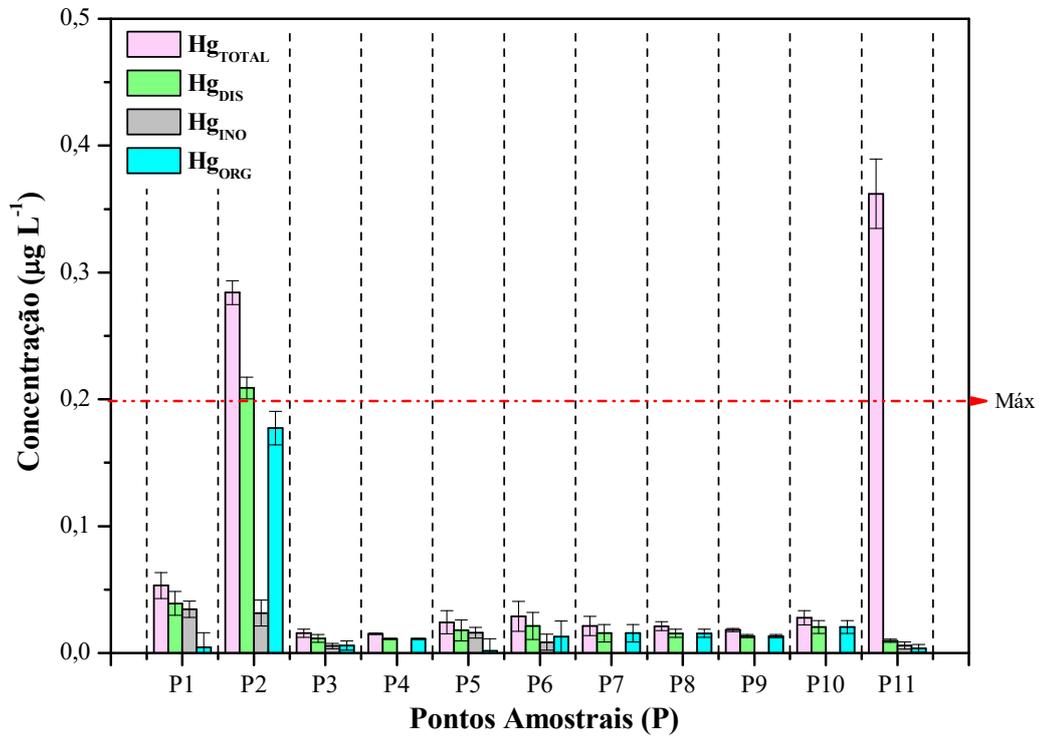


Fonte: AUTORA, 2023.

Outro fator que se destaca na Figura 19 é a diferença significativa entre níveis de concentrações de mercúrio total e dissolvido, pois com a maior turbidez associada a esta campanha de amostragem em relação às demais possivelmente possibilitou que o analito (Hg) estivesse preferencialmente na sua forma associada ao material em suspensão, sendo necessário um procedimento para liberar o analito do material particulado, assim, sendo aplicado o procedimento de digestão ácida por sistema de micro-ondas de alta pressão para determinação do mercúrio total.

No que se refere à amostragem 5, a qual é expressa na Figura 20, verifica-se que todos os pontos amostrais apresentaram valores de concentrações (superiores ao LD da técnica) para o mercúrio total, dissolvido e orgânico. Apesar da presença desse elemento em uma maior variação de distribuição química, o nível que o mercúrio total disponível nas amostras dessa campanha foi menor que o nível apresentado amostragens anteriores, esse decaimento pode ter sofrido a influência ainda da alta diluição da água devido as fortes chuvas que ocorreram entre o 2º e 3º trimestre de 2022, em Maceió -AL.

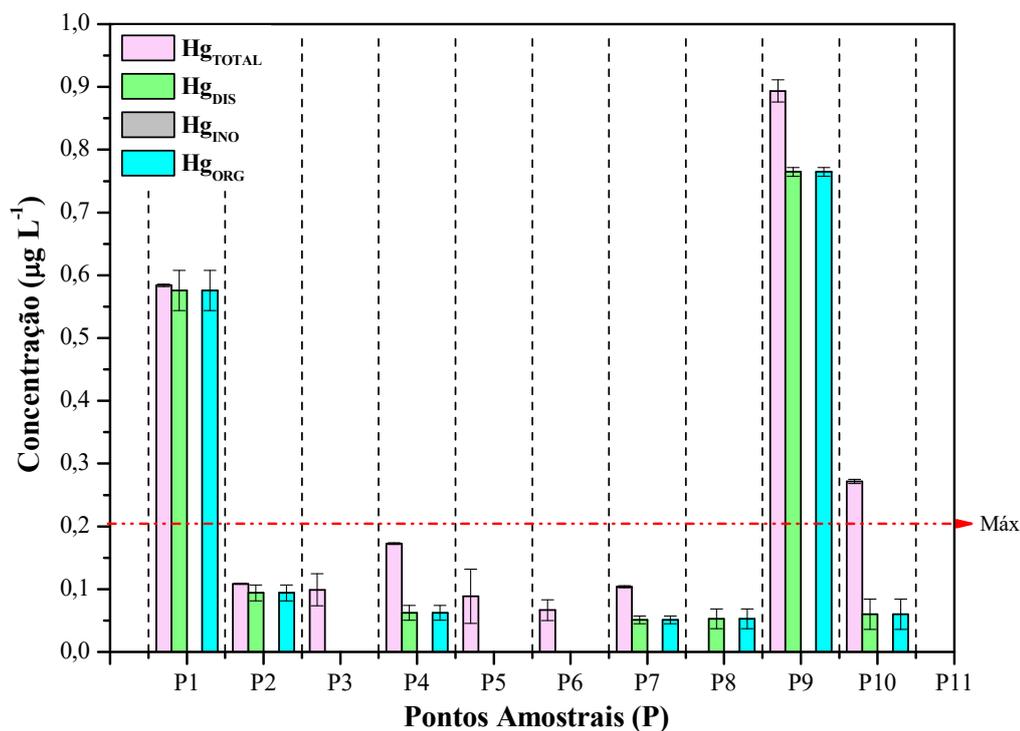
Figura 20. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 5 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em dezembro/2022.



Fonte: AUTORA, 2023.

Por fim, a Figura 21 são exibidas as concentrações das amostras de água da amostragem 6, assim como as demais amostragens entre o mercúrio orgânico e inorgânico, o Hg_{ORG} apresenta os maiores valores de concentração. Em comparação com a amostragem anterior foi possível verificar um aumento no teor de Hg presente nessa matriz, tendo o destaque para o ponto 1 e 9 que apresentam uma concentração superior, respectivamente em, 2e 3,5 vezes do determinado pela legislação do Resolução N° 357/2005 do CONAMA.

Figura 21. Gráfico das concentrações das espécies de mercúrio nas águas da amostragem 6 da Laguna Mundaú (Maceió, AL) realizada em fevereiro/2023.



Fonte: AUTORA, 2023.

Em síntese, em todas as amostragens foi observado o mesmo padrão de distribuição das espécies, sendo a forma orgânica a mais tóxica relatada pela literatura devido a sua capacidade de ultrapassar as (bio)membranas e sua afinidade pelos grupos sulfidrilas das proteínas.

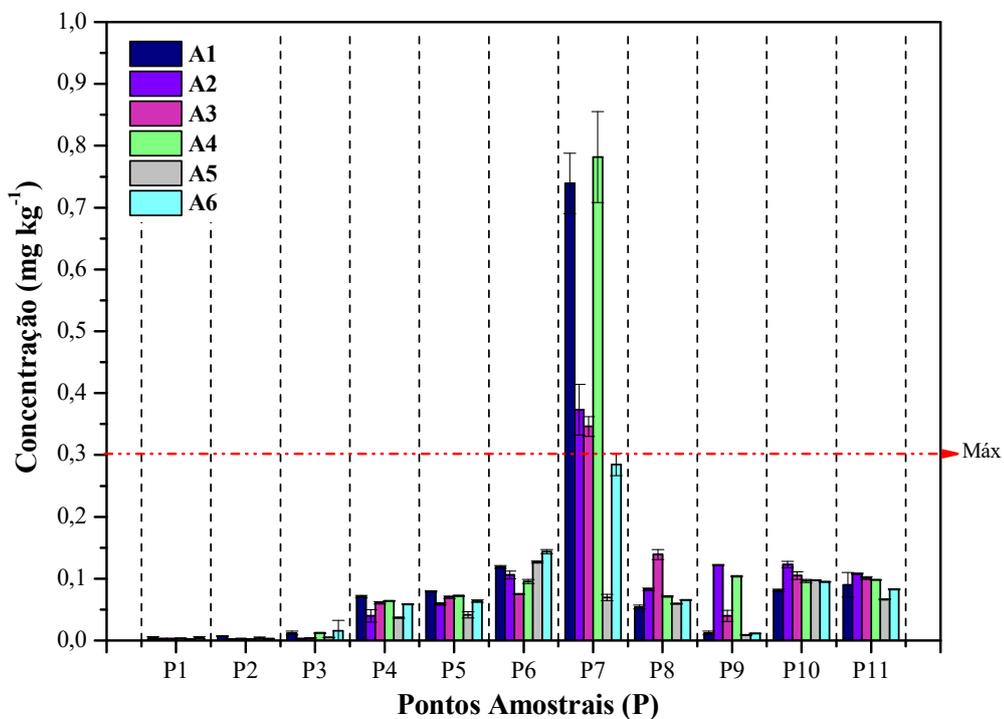
Santos et al. (2021) determinou 18 elementos na água da Laguna Mundaú (Al, As, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Se, V e Zn) entre o período de junho de 2017 a abril de 2019. No que se refere aos níveis de mercúrio total dissolvido determinados pelos autores, observou-se concentrações até 14,6 vezes acima do valor permitido pela legislação vigente.

Além disso, La Serra (2015) determinou Hg total nas águas do Rio Mogi-Guaçu obtendo a concentração média de 0,24 µg L⁻¹. Já Lacerda et al. (2011) fez o estudo da concentração de mercúrio do rio Jaguaribe (Ceará-Brasil) quantificando o teor de mercúrio máximo 0,045 ng L⁻¹.

7.5 Determinação de mercúrio em sedimento.

Os sedimentos são classificados como materiais sólidos compostos por substâncias orgânicas e minerais que ficam depositados no fundo de ambientes aquáticos, tais como: oceanos, rios e estuários. A sua constituição inclui a presença de carbonatos, silicatos, bactérias, algas, óxidos e hidróxidos, a razão desses componentes varia de acordo com o ecossistema (SILVA et al., 2020). Além disso, os sedimentos participam da cadeia alimentar, reprodutiva e serve como habitat para algumas espécies aquáticas. Apesar dessa importância para os seres aquáticos, os sedimentos têm como característica relevante, a adsorção de compostos potencialmente tóxicos, além de possuir a capacidade de acumular essas substâncias de forma mais permanente do que corpo d'água, por este motivo a avaliação dos efeitos dos impactos ambientais por este tipo de material é importante. Contudo, em sistemas mais dinâmicos a variabilidade da concentração de espécies nos sedimentos pode ser elevada. Com isso, foi determinada as concentrações de mercúrio nas amostras de sedimento, em seis amostragens na Laguna Mundaú em 11 pontos diferentes (Figura 22).

Figura 22. Gráfico das concentrações de Hg nos sedimentos da Laguna Mundaú (Maceió, AL) entre o período de julho/2021 a fevereiro/2023.



Fonte: AUTORA, 2023.

A Figura 22 exibe que de modo geral o ponto 7 que é localizado entre dois canais de esgoto no bairro da Levada (Maceió, AL) apresenta maiores valores de concentrações entre as amostragens realizadas entre o mês de julho/2021 e fevereiro/2023. Ainda sobre as concentrações de Hg obtidas nas amostras de sedimentos tem-se a comparação com os valores legislados pelo CONAMA n° 454/2012, sendo possível observar teores de mercúrio superiores ao permitido apenas no ponto 7 nas campanhas de amostragens 1 e 4.

Essas amostragens ocorrem no mês julho dos seus respectivos anos, esse mês marca o período intermediário/final do inverno na região, conseqüentemente o aumento do índice pluviométrico nessa estação ocasiona o aumento do lançamento inapropriado de esgotos na região da Laguna Mundaú. Com isso, pode-se inferir que a maior porção do Hg é derivada de fontes antrópicas, ou seja, ações realizadas pelos seres humanos como atividades domésticas, industriais e agrícolas. Além disto, esta é uma região que possui pouca ação do oceano, devido a sua localização, desta forma, é possível que a variação da camada de sedimento, seja menor comparada a outros pontos amostrais.

De acordo com Hellmann e colaboradores (2019), o mercúrio presente no sedimento pode ser convertido facilmente a metilmercúrio por meio da ação dos microrganismos, via processo de metilação. O acúmulo desse metal em sedimento é extremamente preocupante devido o forma orgânica (MeHg) contendo carbono, poder permanecer ativa por aproximadamente 100 anos do ambiente.

Além disso, por meio dos dados expostos na Figura 22 é possível estabelecer uma relação entre o comportamento dos níveis de mercúrio total durante as diferentes amostragens da água e do sedimento,

7.6 Determinação de mercúrio em bivalves.

Os moluscos bivalves consistem em uma classe de seres filtradores que tem como base para sua alimentação a água do ecossistema que está inserido. Devido seu hábito alimentar fundamentado no processo de filtração, esses animais possuem o potencial de acumular os compostos presentes no seu habitat, como por exemplo, medicamentos, poluentes orgânicos, microplásticos, metais e semimetais (LIMA et al., 2022).

Tendo em vista, a capacidade de acumulação de possíveis contaminantes ambientais por esta classe, esses organismos podem ser utilizados como biomarcadores de ambientais. As substâncias que são monitoradas por meio dos bivalves podem ou não apresentarem funções metabólicas, porém em níveis elevados podem apresentar efeitos nocivos, como o mercúrio.

De acordo com Yang et al.(2020), o Hg não apresenta função biológica associada no metabolismo dos seres vivos e facilmente se acumula nos rins, fígado, coração e cérebro.

Assim, foram avaliadas as concentrações de mercúrio nos bivalves das espécies *Mytella Charruana* e *Mytilopsis Sallei* encontrados em seis diferentes campanhas amostragens na região da Laguna Mundaú (Maceió, AL) entre o período de julho/2021 e fevereiro/2023 (Tabela 12).

Tabela 12. Concentração de mercúrio em bivalves em seis campanhas de amostragem entre o período de julho/2021 a fevereiro/2023.

Ponto (P)	Concentração de Hg em bivalves (mg kg ⁻¹) em massa seca					
	Amostragem 1 (07/2021)	Amostragem 2 (10/2021)	Amostragem 3 (03/2022)	Amostragem 4 (07/2022)	Amostragem 5 (12/2022)	Amostragem 6 (02/2023)
P2	-	-	0,0564 ± 0,0076 ^{MC}	-	-	-
P4	0,2257 ± 0,0335 ^{MC}	0,2893 ± 0,0078 ^{MC}	0,0524 ± 0,0028 ^{MC}	-	-	0,0718 ± 0,0187 ^{MS}
P5	0,1931 ± 0,0496 ^{MC}	0,1680 ± 0,0145 ^{MC}	0,0334 ± 0,0019 ^{MC}	-	-	-
P6	0,2271 ± 0,0485 ^{MC}	-	0,0132 ± 0,0011 ^{MC}	0,0978 ± 0,0061 ^{MS}	0,0339 ± 0,0011 ^{MS}	0,1037 ± 0,0149 ^{MS}
P7	-	-	-	0,1031 ± 0,0019 ^{MS}	0,0681 ± 0,0022 ^{MS}	0,0814 ± 0,0003 ^{MS}
P8	0,3517 ± 0,0175 ^{MC}	-	0,0384 ± 0,0064 ^{MC} 0,0406 ± 0,0012 ^{MS}	0,1108 ± 0,0037 ^{MS}	0,0420 ± 0,0031 ^{MS}	0,0732 ± 0,0131 ^{MS}
P9	-	0,1858 ± 0,0188 ^{MC}	-	-	-	-

O tipo de bivalve analisado é indicado a direita de cada valor, considerando: **MC** (*Mytella charruana*) ou **MS** (*Mytilopsis sallei*).

Fonte: AUTORA, 2023.

Como visto, na Tabela 12 nas amostragens 1 e 2 a única espécie encontrada no local de pesquisa foi a *Mytella charruana*, espécie nativa, o sururu. Na amostragem 3 apesar da espécie nativa aparecer de forma predominante na Laguna Mundaú, no ponto 8 também foi coletado bivalve do tipo *Mytilopsis sallei*, esta espécie consiste em uma espécie invasora que ficou popularmente conhecida na região por “*sururu branco*”. Nas demais amostragens realizadas, A4, A5 e A6, apenas a *Mytilopsis sallei* foi encontrada. É importante mencionar que o desaparecimento do bivalve nativo durou aproximadamente 10 meses, reaparecendo em meados de março de 2023. Além disso, ocasionou inúmeros danos econômicos para aproximadamente 3 mil famílias ribeirinhas da Laguna Mundaú que sobrevivem por meio da pesca e da comercialização do sururu, pois o bivalve da espécie *Mytilopsis sallei* foi rejeitado pela população devido a diferença do sabor do bivalve local (DOS SANTOS REIS, 2022).

Ainda sobre a Tabela 12, as concentrações de mercúrio obtidas em todas as amostragens para os bivalves, expressas em massa seca, variaram entre 0,0130 - 0,3517 mg kg⁻¹. Levando em consideração que os bivalves analisados possuem um teor de água de cerca de 85% e que a concentração máxima de Hg permitida em bivalves na forma como é consumido é de 0,5 mg kg⁻¹ pela ANVISA (portaria n° 42/2013), assim, as concentrações determinadas para espécies *Mytella charruana* e *Mytilopsis sallei* encontram-se abaixo do valor máximo legislado.

7.7 Avaliação preliminar da concentração de mercúrio em sangue e urina de pescadores da Laguna Mundaú.

A exposição dos seres humanos ao mercúrio e suas espécies pode originar diversos problemas à saúde, gerando alterações no sistema nervoso, respiratório, imunológico, reprodutivo, cardiovascular, hematológico e rins. Entre os fatores que podem agravar os danos à saúde causados pela exposição ao mercúrio estão a idade do indivíduo, hábitos alimentares, espécie química, a canal e tempo de exposição (FARINA et al., 2013).

Tendo como base que o mercúrio é um contaminante químico que pode se acumular e mudar o funcionamento de alguns sistemas do corpo humano é viável a utilização de amostras biológicas para determinação dos níveis de exposição do ser a esse elemento. As amostras biológicas mais comumente usadas por estudos clínicos e científicos visando a quantificação de possíveis contaminantes químicos são cabelo, saliva, sangue e urina, porém esses tipos de estudos também podem ser realizados utilizados fezes, leite materno e unhas (BRANCO et al, 2017).

Sendo assim, no trabalho foi selecionado o sangue e a urina como amostras biológicas para determinação da concentração de mercúrio total na população das proximidades da Laguna Mundaú, preferencialmente pescadores e marisqueiras e realizar a comparação com o nível de concentração encontrado em um grupo controle, o qual apresenta indicados socioeconômicos similares aos voluntários que residem na Laguna Mundaú. Assim, o grupo controle de modo geral possui características financeiras, hábitos de vida e histórico de doenças similares ao grupo expostos, sendo a principal diferença avaliada a alimentação baseada nos organismos dessa Laguna e o contato direto com o recurso hídrico local, além disso, cada grupo foi preliminarmente composto por 20 indivíduos (Tabela 13).

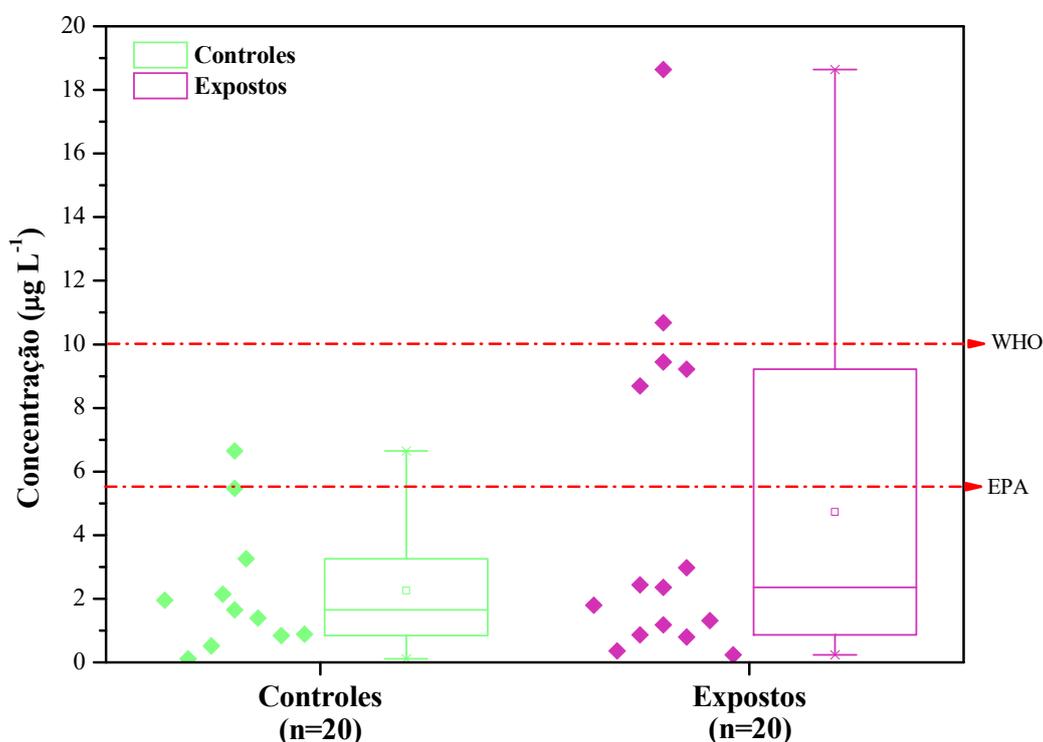
Tabela 13. Dados demográficos dos indivíduos doadores das amostras biológicas.

Parâmetros	Média ± desvio padrão	
	Controles	Expostos
Idade (média):	47,5 ± 18,0	51,5 ± 10,7
Sexo		
Masculino	10	8
Feminino	10	12
Antropometria		
Estatura (m)	1,59 ± 0,12	1,64 ± 0,09
Massa (kg)	69,6 ± 13,7	79,1 ± 23,1
Índice de massa corporal (IMC)	26,3 ± 8,6	29,4 ± 9,5
Hábitos e história de doenças		
Tabagismo	6	6
Consumo de álcool	9	6
Hipertensão	4	5
Diabetes tipo 2	6	3
Câncer	0	0
Cardiopatia	0	0

Fonte: AUTORA, 2023.

A função do sangue no organismo consiste na distribuição de gases respiratórios e nutrientes para as células do corpo. Por executar esse transporte de substâncias, o sangue consegue direcionar compostos tóxicos aos demais órgãos, com isso esse fluido biológico é caracterizado como biomarcador confiável de exposição por compostos mercuriais (ZHANG et al., 2021). Assim, a priori foram determinadas as concentrações de mercúrio total nas amostras de sangue dos grupos controle e exposto (Figura 23):

Figura 23. Concentração de Hg_{TOTAL} ($\mu g L^{-1}$) em amostras de sangue de grupo controle (n = 20) e expostos (n = 20) da Laguna Mundaú (Maceió, AL).



Fonte: AUTORA, 2023.

Tendo como base os valores de referência para mercúrio total em sangue, a EPA (*Environmental Protection Agency*) estabelece-se $5,80 \mu g L^{-1}$ como valor máximo, enquanto a WHO (*World Health Organization*) considera $10 \mu g L^{-1}$. Dessa maneira, segundo a EPA 25% dos expostos teriam concentração de Hg total no sangue acima do valor de referência e para WHO seria igual a 10%, o que torna preocupante esta situação.

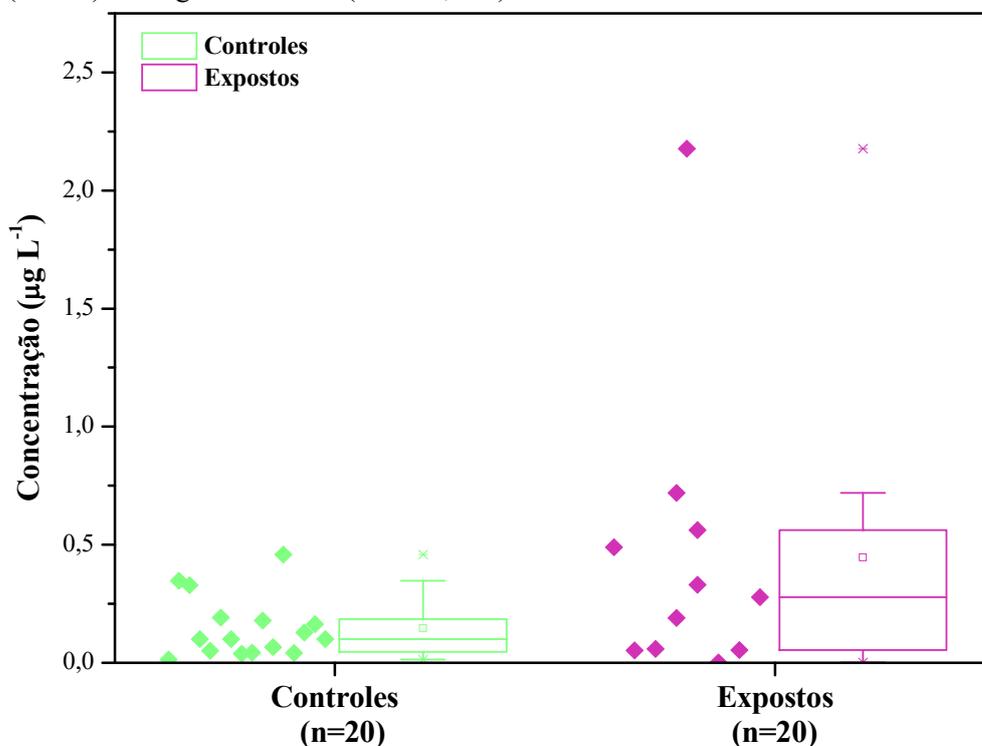
Além disso, considerando as concentrações obtidas de Santos et al. (2021) para a concentração de Hg em sangue dos pescadores da mesma localidade, se obteve média de $9,59 \mu g L^{-1}$, observa-se uma diminuição da concentração de Hg no sangue dos pescadores analisados pelo presente trabalho que obteve como concentração média o valor de $2,26 \mu g L^{-1}$. Salienta-se que se tem como objetivo aumentar o número de amostras (controle e expostos) para consolidação dos dados e avaliação do real impacto na população, uma vez que a exposição ao Hg pode estar relacionada às atividades antropológicas na região.

Segundo Branco et al. (2017), o mercúrio que é quantificado nas amostras de sangue são resultantes de um contato recente com a fonte de exposição, seja por via oral, inalatória ou cutânea. Em destaque, a exposição por via oral nessa região é derivada da alimentação baseada de animais aquáticos, como peixes e moluscos bivalves, e devido o mecanismo dos

compostos mercuriais nesse meio a forma predominante de Hg nesses organismos é o metilmercúrio. Essa espécie liga-se preferencialmente com os glóbulos vermelhos e plasma, enquanto o Hg inorgânico é facilmente encontrado nos eritrócitos e no plasma.

O outro marcador biológico selecionado para o trabalho foi a urina que neste contexto tem o maior potencial de constatar a exposição por mercúrio inorgânico e elementar, visto que esse fluido avalia os compostos mercuriais presentes no rins (SO et al., 2021). Como isso, a Figura 24 apresenta um gráfico *box plot* com a comparação do nível de mercúrio total do grupo controle com o grupo exposto:

Figura 24. Concentração de Hg_{TOTAL} ($\mu\text{g L}^{-1}$) em amostras de urina de grupo controle (n = 20) e expostos (n = 20) da Laguna Mundaú (Maceió, AL).



Fonte: AUTORA, 2023.

A *World Health Organization* preconiza a concentração máxima de Hg em urina humana igual a $4 \mu\text{g L}^{-1}$. Assim, considerando os valores expressos na Figura 24, todos os indivíduos avaliados apresentam valores dentro do legislado. De acordo com Montafavi e Ebrahimi (2019) diferentemente das amostras de sangue que determina as concentrações derivadas do contato mais recente, já nas amostras de urinas esse nível de mercúrio está relacionado com uma exposição mais antiga, em razão da lenta eliminação dos compostos acumulados nos rins.

7.7 Avaliação preliminar da concentração de mercúrio em sangue e urina de pescadores da Laguna Mundaú.

Realizou-se análise de correlação com o intuito de relacionar o grau de dependência entre as variáveis estudadas (Tabela 14). Para realização do teste de correlação, a princípio foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a distribuição de dados, o qual foi comprovado que alguns dos elementos sua distribuição não era considerada normal. Por consequência, foi aplicado a correlação de Spearman a partir das concentrações de mercúrio em água, sedimento, bivalve e parâmetros físico-químicos para um intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Observou-se a presença de três grupos: o primeiro são os elementos que correlacionam positivamente, o qual sugere a possibilidade de serem de origem similar, entre essas correlações pode-se citar a Hg_{TOTAL} e Hg_{DIS} . O segundo grupo são aqueles de correlação negativa. O terceiro grupo, são aqueles que não foram significativas a um nível de 95% ($p < 0,05$).

Tabela 14. Coeficiente de correlação de Spearman a partir das concentrações de Hg em água, sedimento, bivalve e parâmetros físico-químicos.

Parâmetro	Hg _{TOTAL}	Hg _{DIS}	Hg _{SED}	Hg _{BIV}	pH	Turbidez	OD	TDS	Salinidade	Condutividade	Temperatura
Hg _{TOTAL}	1										
Hg _{DIS}	0.96081	1									
Hg _{SED}	-0.04042	0.03932	1								
Hg _{BIV}	0.62603	0.65031	-0.07401	1							
pH	0.41391	0.41654	0.23710	-0.15852	1						
Turbidez	-0.43978	-0.49042	0.11019	0.2435	-0.33799	1					
OD	0.19372	0.14847	0.26445	0.0842	0.74358	0.00316	1				
TDS	0.01537	0.09050	-0.23529	-0.59831	0.0884	-0.50102	-0.18176	1			
Salinidade	-0.01984	0.04403	-0.23834	-0.63955	0.08789	-0.48891	-0.18021	0.99104	1		
Condutividade	0.00096	0.08362	-0.02831	-0.44463	0.03249	-0.24491	-0.0989	0.72656	0.71726	1	
Temperatura	-0.13790	-0.02549	0.24211	-0.19938	0.29043	-0.11317	0.16143	0.40469	0.44023	0.54616	1

Fonte: AUTORA, 2023.

8 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível avaliar as concentrações de mercúrio em amostras de água, sedimento e sururu da Laguna Mundaú (Maceió, AL), constatando uma relação direta entre o comportamento do teor de Hg presente nessas matrizes ambientais. Além disso, observou-se concentrações acima do permitido para as amostras de água e sedimento em até 80 e 0,6 vezes, respectivamente, sendo a espécie orgânica majoritária nas amostras de água. Essas concentrações superiores ao legislado podem ser relacionadas à ação antrópica como despejo inadequado de esgotos domésticos e industriais.

Em relação aos dados obtidos pela pesquisa para os teores de mercúrio nas amostras biológicas (sangue e urina) demonstraram que apenas as amostras de sangue apresentam valores acima do preconizado pelo EPA em 25%, isso sendo derivado o mercúrio está disponível nesse fluido biológico. Com isso, é visto que o monitoramento das concentrações de elementos com potencial toxicológico é de suma importância para entender o mecanismo do ecossistema, avaliação da possível contaminação ambiental e seus impactos.

9 PERSPECTIVAS

As perspectivas deste trabalho seria determinar a concentração de mercúrio total em um número maior de amostras de sangue e urina de pescadores e grupo controle.

REFERÊNCIAS

- KLAASSEN, C. D.; AMDUR, M. O.. *Casarett and Doull's toxicology: the basic science of poisons. 8th edition. New York: McGraw-Hill, 2013.*
- EISLER, R. Health risks of gold miners: a synoptic review. *Environmental Geochemistry & Health*, v. 25, n. 3, 2003.
- FLECK, J.A. GILL, G. BERGAMASCHI, B.A. KRAUS, T.E. DOWNING, B.D. ALPERS, C.N. Concurrent photolytic degradation of aqueous methylmercury and dissolved organic matter. *Sci. Total Environ.*, 484, p. 263-275, 2014.
- KLAPSTEIN, S.J. ZIEGLER, S.E. RISK, D.A. O'DRISCOLL, N.J. Quantifying the effects of photoreactive dissolved organic matter on methylmercury photodemethylation rates in freshwaters. *Environ. Toxicol. Chem.*, 36, p. 1493-1502, 2017.
- ACHÁ, D. HINTELMANN, H. PABÓN, C.A. Sulfate-reducing bacteria and mercury methylation in the water column of the lake 658 of the experimental lake area. *Geomicrobiol. J.*, 29, p. 667-674, 2012.
- ZHANG, Y. SUN, R. MA, M. WANG, D. Study of inhibition mechanism of NO₃⁻ on photoreduction of Hg(II) in artificial water. *Chemosphere*, 87, p. 171-176, 2012.
- HE, F. ZHAO, W.R. LIANG, L.Y. GU, B.H. Photochemical oxidation of dissolved elemental mercury by carbonate radicals in water. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 1, pp. 499-503, 2014.
- D. R. LIDE, *Handbook of Chemistry and Physics 74th Edition, 74th ed., CRC Press, 1993.*
- SHLYAKHTER, A., JAMES, L., VALVERDE JR, A., & WILSON, R. Integrated risk analysis of global climate change. *Chemosphere*, 30(8), 1585-1618, 1995.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA); A Resolução nº 357, dispõe sobre a Classificação dos Corpos Hídricos e Diretrizes Ambientais para o seu Contexto, bem como Estabelece as Condições e Padrões para o Lançamento de Efluentes, e dá outras providências; Diário Oficial da União (DOU), Brasília, nº 53, de 18/03/2005, p. 58, disponível em <https://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>, acessado em 5 de setembro de 2020.
- DOS SANTOS, C. S.; ROSÁRIO, F. J. P.; DO NASCIMENTO, T. G.. Produção sustentável, usos potenciais e perspectivas de negócios com o sururu de Alagoas. **Humanidades & Inovação**, v. 9, n. 13, p. 260-279, 2022.
- FARIAS, M. F. de; ROCHA-BARREIRA, C. de A.; CARVALHO, F. C. T. de; SILVA, C. M.; REIS, E. M. F. dos; COSTA, R. A.; VIEIRA, R. H. S. dos F. Condições microbiológicas de *Tagelus plebeius* (LIGHTFOOT, 1786) (Mollusca Bivalvia: Solecurtidae) e da água no estuário do rio Ceará, em Fortaleza – CE. *Boletim do Instituto de Pesca, São Paulo*, v. 36, n. 2, p. 135-142, 2010.
- MOUCHREK FILHO, V. E.; MOUCHREK FILHO, J. E.; NASCIMENTO, A. R.; NARCHI, W. & GALVÃO-BUENO, M.S. 1983. Anatomia funcional de *Mytella charruana* (D'Orbigny, 1846) (Bivalvia: Mytilidae). *Bol. Zool. S. Paulo*. 6: 113-145.

SANDE, D.; MELO, T. A.; OLIVEIRA, G. S. A.; BARRETO, L.; TALBOT, T.; BOEHS, G.; ANDRIOLI, J. L. Prospecção de moluscos bivalves no estudo da poluição dos rios Cachoeira e Santana em Ilhéus, Bahia, Brasil. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, São Paulo, v. 47, n. 3, p. 190-196, 2010.

PAIXÃO, J. D. S. N.; MIRANDA, C. E. P.; COMARELLA, L. Análise do Risco Sanitário de Alimentos: Qualidade Microbiológica do Molusco Sururu (*Mytella* sp.). *Revista Saúde e Desenvolvimento*, v. 10, n. 5, p. 85-100, 2016.

MAIOLI, O. L.; RODRIGUES, K. C.; KNOPPERS, B. A.; AZEVEDO, D. A.. Polycyclic aromatic and aliphatic hydrocarbons in *Mytella charruana*, a bivalve mollusk from Mundaú Lagoon, Brazil. ***Microchemical Journal***, v. 96, n. 1, p. 172-179, 2010.

QUEIROZ, R. N. M., DA SILVA, P. M., DESOUZA, A. M., SILVA, L. B., & DIAS, T. L. P. Effects of environmental factors on the distribution of the exotic species *Mytilopsis sallei* (Récluz, 1849)(Bivalvia: Dreissenidae) on the Northeast coast of Brazil. *Journal of Sea Research*, 165, 101954, 2020.

QUEIROZ, R. N. M., DIAS, T. L. P., BATISTA, R., & DA SILVA, P. M. Reproduction and population dynamics of the invasive bivalves *Mytilopsis sallei* and *Isognomon bicolor* on the Northeast coast of Brazil. *Zoology*, 153, 126028, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA); Resolução nº 42, de 29 de agosto de 2013. Dispõe sobre o Regulamento Técnico MERCOSUL sobre Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba (CELMM). Brasília: ANA, 2006.

OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.37, n.6, p. 575-591, 1993. ELSEVIER.

RIBEIRO, M. A. T. S. B.; KNOPPERS, B. A.; CARREIRA, R. S. Fontes e distribuição de matéria orgânica sedimentar no complexo estuarino-lagunar de Mundaú/Manguaba/AL, utilizando esteróis e álcoois como indicadores. *Química Nova*, v.34, n. 7, p. 1111 – 1118. 2011. SBQ.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Estações Automáticas. Estação Maceió-AL. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 22 de julho de 2023.

MARQUES, R. C.; SILVA, J. R. F.; VIEGAS, O.; NORMANDE, E. S. Manejo y aprovechamiento y aprovechamiento acuicola de lagunas costeiras in America Latina y El Caribe. Trabajos presentados por Brasil, Colombia, Cuba, México y Venezuela em II Taller Regional sobre Lagunas Costeiras, México, D. F., 9-12 de fevereiro de 1993.

WANDERLEY, A. D. P., MENDONÇA, A. G. R., OLIVEIRA, L. C. D., FIGUEIREDO, I. M., FERNANDES, A. P., BATALHA, L. T., & BOTERO, W. G. COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA: CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA NATURAL E INTERAÇÃO COM ÍONS Hg²⁺. *Química Nova*, 43, 206-211, 2020.

- SANTOS, T. M. M., SAWAYA, A. L., DA SILVA, M. C. D., DOS SANTOS, A. F., NETO, J. A. B., & FLORÊNCIO, T. M. D. M. T. Avaliação microbiológica e da concentração de vitamina A, ferro e zinco em preparações do molusco sururu (*Mytella falcata*). *Demetra: alimentação, nutrição & saúde*, 9(3), 811-822, 2014.
- FERREIRA, R. V.; SHINZATO, E; DANTAS, M. E.; TEIXEIRA, W. G. Origem das paisagens. In: VILLANUEVA, T. C. B.; MARTINS, V. S. (Org.). Geodiversidade do estado de Alagoas. Salvador, BA: CPRM, 2016. Cap. 3
- OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.37, n.6, p. 575-591, 1993. ELSEVIER.
- RIBEIRO, M. A. T., KNOPPERS, B. A., & CARREIRA, R. S. Fontes e distribuição de matéria orgânica sedimentar no complexo estuarino-lagunar de Mundaú-Manguaba/AL, utilizando esteróis e alcoóis como indicadores. *Química Nova*, 34, 1111-1118, 2011.
- DOS SANTOS, M. C. D., DA SILVA FILHO, R. C., LEITE, A. C. R., NASCENTES, C. C., BOTERO, W. G., & SANTOS, J. C. Evaluation of potentially toxic elements in Mundaú Lagoon (Maceió, AL-Brazil): systematic environmental monitoring of water and food quality. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 32, 1762-1772, 2021.
- SILVA-FILHO, R., SANTOS, N., SANTOS, M. C., NUNES, Á., PINTO, R., MARINHO, C., LEITE, A. C. R. Impact of environmental mercury exposure on the blood cells oxidative status of fishermen living around Mundaú lagoon in Maceió–Alagoas (AL), Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 219, 112337, 2021.
- RAHAMAN, M. S. ANSARI, K. M. KUMAR, H. SHAH, K. Mapping and visualizing research output on global solid waste management: A bibliometric review of literature. *Science & Technology Libraries*, 41(2), 174-202, 2022.
- SANTOS, V. A. (2022). Avaliação dos impactos ambientais do lixão no município de Belém de São Francisco-PE.
- BRASIL Política Nacional de Resíduos Sólidos.. Lei n ° 12.305, de 2 de agosto de 2010 Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.
- ESSINGTON, M.E. Soil and water chemistry: an integrative approach. Boca Raton, CRC Press, 2004. 534p.
- MA, R., WOODS, G., & MCLEOD, C. W. Microcolumn field sampling and flow injection analysis: a strategy for enhanced trace analysis and element. *Flow Analysis with Atomic Spectrometric Detectors*, 439, 1999..
- SAWYER, C. N.; MACCARTY, P. L. e PARKIN, G. F. Chemistry of Enviromental Engeneering. 4° Ed., International Student Edition, MacGraw-Hill Book Company, 1994.
- DE SOUZA, R. V., Suplicy, F. M., & Novaes, A. L. T. (2021). Depuração de moluscos bivalves. *Boletim Didático*, (160).
- HUBERT, P. The SFSTP guide on the validation of chromatographic methods for drug bioanalysis: from the Washington Conference to the laboratory. *Anal. Chim. Acta*, v. 391, p.135-139, 1999.

BRITO, N. M. Resíduos de pesticidas organoclorados (OC) e organofosforados (OF) em matriz de coco: metodologia e aplicação. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Química Analítica), Universidade Estadual Paulista, 2001.

ARAÚJO, M. P., COSTA, T. L. F. D., & CARREIRA, R. D. S. Esteróis como indicadores do acúmulo de esgotos domésticos em sedimentos de um sistema estuarino-lagunar tropical (Mundaú-Manguaba, AL). *Química Nova*, 34, 64-70, 2011.

CALDAS, J. S.; SANCHES FILHO, P. J.. Determinação de Cu, Pb e Zn no sedimento da região do pontal da barra, Laranjal (Laguna dos Patos, Pelotas – RS, Brasil). *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v.17, n.1, p.13-18, 2013.

FERREIRA, M. D. S., MÁRSICO, E. T., CONTE JUNIOR, C. A., MARQUES JÚNIOR, A. N., MANO, S. B., CLEMENTE, S. C. D. S. Contaminação por metais traço em mexilhões Perna perna da costa brasileira. *Ciência Rural*, 43, 1012-1020, 2013.

Hellmann, C., Costa, R. D., & Schmitz, O. J. (2019). How to deal with mercury in sediments? A critical review about used methods for the speciation of mercury in sediments. *Chromatographia*, 82, 125-141.

Branco V, Caito S, Farina M, Teixeira da Rocha J, Aschner M, Carvalho C. Biomarkers of mercury toxicity: Past, present, and future trends. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*. 2017;20(3):119-154

Mostafavi, S. M., & Ebrahimi, A. (2019). Mercury determination in work place air and human biological samples based on dispersive liquid-liquid micro-extraction coupled with cold vapor atomic absorption spectrometry. *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, 2(04), 49-58.

Barros, A. B. (2022). Caracterização físico-química e determinação dos níveis de metais pesados em solo de mangue em Alagoas, Brasil (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado Profissional em Análise de Sistemas Ambientais), Centro Universitário CESMAC, Maceió, Alagoas, 2018. Disponível em: <http://srv-bdtd:8080/handle/tede/747>. Acesso em: 02.04).

Element, C. A. S. (2007). Method 3015A microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

de Souza, J. R., de Moraes, M. E. B., Sonoda, S. L., & Santos, H. C. R. G. (2014). A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: caso Rio Almada, sul da Bahia, Brasil. *REDE-Revista Eletrônica do ProdeMa*, 8(1).

Serra, L. L. (2017). Relação da concentração de metais pesados em amostras de água das bacias dos rios Pardo, Mogi-Guaçu, Sapucaí/Mirim e do aquífero Guarani com a etiopatogênese dos pênfigos (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Silva, T. V., Machado, C. S., Zagui, G. S., Machado, G. P., Micas, A. F. D., Savazzi, E. A., & Segura-Muñoz, S. I. (2020). Avaliação toxicológica de ambientes aquáticos: importância da análise em sedimento. *Gaia Scientia*, 14(1), 63-73.

Yang, L., Zhang, Y., Wang, F., Luo, Z., Guo, S., & Strähle, U. (2020). Toxicidade do mercúrio: Evidência molecular. *Chemosphere*, 245, 125586.

dos Santos Reis, D. L., Teixeira, C. S., & Silva, A. M. S. (2022). A DINÂMICA DOS NEGÓCIOS DE IMPACTO SOCIAL E AMBIENTAL: um estudo de caso do projeto nisa. *Revista Ciências Humanas*, 15(1).

Farina M, Avila DS, da Rocha JB, Aschner M. Metals, oxidative stress and neurodegeneration: a focus on iron, manganese and mercury. *Neurochem Int*. 2013; 38 62(5):575-594.

Zhang, J., Wang, J., Hu, J., Zhao, J., Li, J., & Cai, X. (2021). Associations of total blood mercury and blood methylmercury concentrations with diabetes in adults: an exposure-

response analysis of 2005-2018 NHANES. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 68, 126845.

So, S. C. A., Tsoi, M. F., Cheung, A. J., Cheung, T. T., & Cheung, B. M. (2021). Blood and urine inorganic and organic mercury levels in the United States from 1999 to 2016. *The American Journal of Medicine*, 134(1), e20-e30.