

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Conservação
nos Trópicos

CLAUDJANE BATISTA AMORIM

AVALIAÇÃO DE MERCÚRIO EM UM MANGUEZAL DE ÁREA PROTEGIDA DO
LITORAL NORTE DE ALAGOAS

MACEIÓ - ALAGOAS
MAIO/2023

CLAUDJANE BATISTA AMORIM

**AVALIAÇÃO DE MERCÚRIO EM UM MANGUEZAL DE ÁREA PROTEGIDA DO
LITORAL NORTE DE ALAGOAS**

Dissertação/Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Conservação nos Trópicos, Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde. Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre/Doutor em CIÊNCIAS BIOLÓGICAS, área de concentração em Conservação da Biodiversidade Tropical.

**Orientador(a): Profa. Dra. Ana
Claudia Mendes
Malhado**

**Co orientadora: Profa. Dra. Luisa
Maria Diele-Viegas
Profa. Dra. Daniela
Anuniação**

**MACEIÓ - ALAGOAS
MAIO/2023**

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

A524a Amorim, Claudjane Batista.

Avaliação de mercúrio em um manguezal de área protegida do litoral norte de Alagoas / Claudjane Batista Amorim. – 2023.
42 f. : il. color.

Orientadora: Ana Claudia Mendes Malhado.

Coorientadoras: Luisa Maria Diele-Viegas, Daniela Anunciação.

Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Conservação nos Trópicos. Maceió, 2023.

Inclui bibliografias.

1. Manguezal. 2. Mercúrio. 3. Área de Proteção Ambiental (APA). I.
Título.

CDU: 633.876 : 549.291

DEDICATÓRIA

*A todos que de alguma maneira auxiliaram
no meu trabalho, para minha avó Maria José
dos Santos (in memória), aos meus pais,
irmãs e sobrinhas.*

AGRADECIMENTOS

À Deus por todas as bençãos.

Aos meus pais, Claudio e Geilza, por todos os esforços e abdições que fizeram para que suas filhas tivessem tudo aquilo que não lhe foram possíveis, amo vocês.

As minhas irmãs Íris, Caroline e Carla, que mesmo longe sempre se fizeram presentes, amo vocês demais.

Os meus pinguinhos Maynne, Isadora e Isabela, mesmo sem entender vocês são uma parte fundamental, por qual eu luto e me dedico, várias vezes quando eu pensei em desistir vocês fizeram eu me reerguer, vocês são tudo para mim.

As minhas avós Neuza, por todo amor, conselhos incentivos para eu continuar a seguir meus sonhos e Maria (in memoria) por todo cuidado e preocupação.

As minhas amigas de vida Elida, Andreza, Angelica e Luciana pelos pagodes, bolos e cafés que me proporcionaram para eu não enlouquecer, vocês são extraordinárias, grata ao universo por ter vocês comigo.

Aos meus amigos que desde a graduação me acompanham nessa jornada acadêmica Flávio, Valéria e Valberth, obrigada por todas as conversas principalmente as de desabafos.

Aos amigos que eu fiz durante esse período que compartilharam e compartilham todos os perrengues que é a vida pós graduando, Amanda, Aline, Ana Caroline, Cacá, Diogo, Gisele e Lucas, vocês são maravilhosos

Rhaissa por todo carinho e paciência.

As minhas orientadoras Ana Claudia, por ter me recebido tão bem no LACOS21, Luisa por toda paciência e dedicação, Daniela, por ter aceitado o desafio de coorientar alguém de uma área de formação diferente da dela.

Ao Prof. Guilherme e seu laboratório LEVE pelo apoio nas coletas e conversas sobre manguezal que foram fundamentais para o meu trabalho.

Aos estudantes dos LINQA e LUMIAN pelos ensinamentos e técnicas Emerson, Ellen e Aryanna.

A Fernanda Meló, que foi fundamental para a reta final deste trabalho.

Agradeço a Prof^a. Milena Dutra, minha orientadora na graduação, sendo umas das melhores profissionais que eu conheço, obrigada, por confiar e acreditar no meu potencial.

Todos os funcionários da UFAL que fizeram parte da realização.

A FAPEAL e PELD pelo apoio financeiro.

Agradeço aos bares e cantores de pagode de Maceió por terem me salvado nos momentos mais críticos deste ciclo, e à Pitu por ter aliviado o estresse dos surtos acadêmicos.

A todos que fizeram parte da construção desse trabalho meu muito obrigada!

“Meu coração é vermelho, de vermelho vive o coração”.

Uma árvore não é só luz do Sol.
Ela passou pelo adubo,
Pela chuva,
Pela seca,
Pelo vento,
Pelo medo de não conseguir crescer.
Talvez alguém a tenha arrancado do chão
quando estava no meio do caminho...
Mas ela conseguiu alcançar a terra com
suas raízes de novo.
Ela é todo o processo que levou para ser
o que é.
Tudo tem seu papel no nosso
amadurecimento.
Ps. Cada planta cresce no seu tempo.

Pedro Salomão

RESUMO

O manguezal é um ecossistema costeiro singular, responsável por serviços ecossistêmicos fundamentais para a manutenção e equilíbrio do planeta. A vegetação de mangue é composta por plantas adaptadas a ambientes salinos e pantanosos que possuem características únicas para se desenvolver nesse tipo de ambiente. Destaca-se a espécie *Laguncularia racemosa*, que possui um papel relevante como indicador ecológico. No entanto, o ecossistema de manguezal vem sendo impactado negativamente por atividades antrópicas que afetam sua funcionalidade e serviços ambientais, levando à perda de área e consequente perda de produtividade. Através de amostras de sedimento, raízes e folhas de *L. racemosa*, analisamos a concentração de Hg em dois pontos de um manguezal do litoral norte do estado de Alagoas, Brasil, utilizando o espectrofotômetro de fluorescência atômica e os índices de geoacumulação (Igeo), risco ecológico (ER) e o de bioconcentração (BCF). O Igeo indicou que ambos os pontos se encontram no grau de classificação de 0-1 (não contaminado a moderadamente contaminado), enquanto o índice BCF indicou baixa bioconcentração tanto nas raízes quanto nas folhas. Apesar de positivos, estes resultados não descartam a possibilidade de um aumento na concentração de Hg em futuras coletas, visto que o mercúrio é um metal bioacumulador.

Palavras-chave: Manguezais. Mercúrio. Área de proteção.

ABSTRACT

The mangrove is a unique coastal ecosystem that provides fundamental ecosystem services for the maintenance and balance of the planet. The mangrove vegetation consists of plants adapted to saline and swampy environments that have unique characteristics to thrive in such conditions. The *Laguncularia racemosa* species stands out, playing a relevant role as an ecological indicator. However, the mangrove ecosystem has been negatively impacted by anthropogenic activities that affect its functionality and environmental services, leading to the loss of area and consequent loss of productivity. We analyzed the concentration of Hg in two points of a mangrove swamp on the northern coast of the state of Alagoas, Brazil, using sediment, roots, and leaves of *L. racemosa*, through the atomic fluorescence spectrophotometer and the geoaccumulation (Igeo), ecological risk (ER), and bioconcentration (BCF) indices. The Igeo indicated that both points are classified in the range of 0-1 (non-contaminated to moderately contaminated), while the BCF index indicated low bioconcentration in both roots and leaves. Although positive, these results do not rule out the possibility of an increase in Hg concentration in future collections, as mercury is a bioaccumulative metal.

Key-word: Mangroves. Mercury. Protected area.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01- Mapa de localização da área de estudo e pontos de coleta.

Figura 02- Concentração de mercúrio na folha (verde), raiz (marrom) e sedimento (vermelho) nos pontos mais próximo (21 km) e mais distante (37 km) em relação à usina açucareira.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Programa do forno de micro-ondas para digestão das amostras de sedimento.

Tabela 02- Programa do forno de micro-ondas para digestão das amostras de folha e raiz.

Tabela 03- Classificação do Índice de Geoacumulação (Igeo)

Tabela 04- Grau de Potencial Risco Ecológico (Er).

Tabela 05- Média da concentração de Hg encontrados no ponto 01 e 02

Tabela 06- Coeficientes de regressão e estatísticas do modelo GLM que relaciona a concentração de mercúrio ao tipo de amostra (folha, raiz e sedimento) e à distância da coleta em relação à usina açucareira em manguezal do Rio Manguaba, Alagoas, Brasil.

Tabela 07- Média dos índices encontrados nos sedimentos dos pontos 01 e 02

Tabela 08- Média do índice de bioacumulação das raízes e folhas no ponto 01 e 02

SUMÁRIO

1 Apresentação	11
Referências	12
2 Revisão da literatura	13
2.1 Manguezais	13
2.2 Metais não essenciais potencialmente tóxicos	15
Referências	18
3 AVALIAÇÃO DE MERCÚRIO EM UM MANGUEZAL DE ÁREA PROTEGIDA DO LITORAL NORTE DE ALAGOAS	21
3.1 Introdução	22
3.2 Metodologia	24
3.3 Resultado e discussão	29
3.4 Conclusão	36
Referências	36

1. Apresentação

Os manguezais são ecossistemas costeiros únicos, encontrados em regiões tropicais e subtropicais ao redor do mundo. Eles são caracterizados por uma vegetação densa, principalmente arbórea, capaz de sobreviver em ambientes salinos e lamacentos. As árvores de mangue são adaptadas para sobreviver em condições difíceis, como altas temperaturas, salinidade e inundação diária. Elas também têm raízes aéreas que permitem a troca de gases com a atmosfera e ajudam a estabilizar o solo (SARKER et al., 2015). Uma das espécies mais importantes de árvore de mangue é *Laguncularia racemosa*, que possui um papel relevante como indicador ecológico (PIMENTEL et al., 2023).

Os manguezais são importantes para a biodiversidade, pois abrigam muitas espécies de animais, como peixes, crustáceos, aves e mamíferos (ROG; CLARKE; COOK, 2017). Eles também são importantes para os seres humanos, pois fornecem recursos naturais como madeira, carvão, peixe e marisco (KRISTININGRUM et al., 2020). No entanto, os manguezais estão enfrentando sérios problemas causados por atividades antrópicas, como a poluição, o desmatamento e a urbanização. A ação humana está afetando a funcionalidade e os serviços ambientais oferecidos pelo manguezal, levando à perda de área e à consequente perda de produtividade (LACERDA et al., 2019).

Outro problema enfrentado pelos manguezais é a contaminação por mercúrio. O mercúrio é um metal tóxico que pode ser encontrado em muitas atividades humanas, como mineração, indústria de cloro e produção de eletrônicos (DIARRA & PRASAD, 2021). Quando o mercúrio é liberado no meio ambiente, ele pode se acumular em organismos vivos, incluindo peixes e mariscos encontrados nos manguezais. A ingestão de mercúrio pode causar uma série de problemas de saúde, incluindo danos ao sistema nervoso, problemas cognitivos, problemas de desenvolvimento e até mesmo morte (BAHT et al., 2019). Por isso, é importante que as atividades humanas sejam monitoradas e regulamentadas para minimizar a contaminação por mercúrio nos manguezais e em outros ecossistemas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o grau de contaminação de Hg através da sua concentração e índices de impactos ambientais em um manguezal localizado dentro de uma APA no litoral norte de Alagoas, Brasil.

REFERÊNCIAS

ROG, Stefanie M.; CLARKE, Rohan H.; COOK, Carly N. More than marine: revealing the critical importance of mangrove ecosystems for terrestrial vertebrates. **Diversity and Distributions**, v. 23, n. 2, p. 221-230, 2017.

SARKER, Subrata et al. A review of bioturbation and sediment organic geochemistry in mangroves. *Geological Journal*, v. 56, n. 5, p. 2439-2450, 2021.

PIMENTEL VICTÓRIO, Cristiane et al. Laguncularia racemosa leaves indicate the presence of potentially toxic elements in mangroves. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 4845, 2023.

KRISTININGRUM, Rochadi et al. Fauna diversity, production potential and total economic value of mangrove ecosystems in Mentawir Village, East Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, v. 21, n. 5, 2020.

DE LACERDA, Luiz Drude; BORGES, Rebecca; FERREIRA, Alexander Cesar. Neotropical mangroves: Conservation and sustainable use in a scenario of global climate change. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 29, n. 8, p. 1347-1364, 2019.

DIARRA, Ivan; PRASAD, Surendra. The current state of heavy metal pollution in Pacific Island Countries: a review. *Applied Spectroscopy Reviews*, v. 56, n. 1, p. 27-51, 2021.

BHAT, Showkat Ahmad; HASSAN, Tehseen; MAJID, Sabhiya. Heavy metal toxicity and their harmful effects on living organisms—a review. *International Journal of Medical Science And Diagnosis Research*, v. 3, n. 1, p. 106-122, 2019.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Manguezais

O manguezal é um ecossistema costeiro característico das regiões tropicais e subtropicais, situado na transição entre a zona de maré e terrestre, sendo formado por árvores que crescem em solos lodosos e salobras (SCHAEFFER-NOVELLI, 1995). Mundialmente o manguezal cobre uma área de cerca de 150.000 km² distribuída em 118 países, com a maior concentração no sudeste da Ásia, África e América do Sul. A distribuição global dos manguezais é influenciada por vários fatores, como a temperatura da água do mar, as correntes oceânicas e a topografia costeira. O Brasil ocupa a terceira colocação entre os países com maior área de manguezais, com aproximadamente 14.000 km², localizados principalmente nas regiões Norte e Nordeste (ICMBio, 2018).

As características físico-químicas do manguezal são únicas para as espécies que habitam esse ecossistema (ZEPILLI et al., 2018). As plantas de mangue são capazes de crescer em solos anaeróbicos e com alta concentração de salinidade, além de possuírem raízes aéreas que permitem a respiração (HAMALTON & SAHANA, 2022). Tais plantas fornecem abrigo e alimento para os animais que vivem no manguezal, os quais também possuem adaptações fisiológicas e comportamentais para sobreviver em um ambiente que apresenta variações extremas de temperatura, salinidade e umidade (PRINCIPE et al., 2018). Estes animais, por sua vez, ajudam na polinização e na dispersão das sementes das plantas (PALMER & WOINARSKI, 1999).

Desta forma, as interações ecológicas nesse ecossistema são complexas e importantes para a manutenção da sua biodiversidade (O'CONNELL et al, 2022). Os manguezais abrigam muitas espécies animais e vegetais endêmicas e ameaçadas de extinção (ADLA et al., 2022). Além disso, atuam como berçários naturais, fornecendo habitats ideais para espécies de peixes e crustáceos (SILVA et al., 2021). Esses habitats são vitais para a reprodução, crescimento e sobrevivência dessas espécies, que são fundamentais para a pesca comercial e a segurança alimentar de muitas comunidades costeiras (BRASIL, 2018; COPERTINO et al., 2017).

A vegetação de manguezais é constituída principalmente por três tipos de plantas: mangue vermelho (*Rhizophora spp.*) com oito espécies descritas, mangue preto (*Avicennia spp.*) que possui oito espécies descritas e mangue branco, com apenas uma espécie descrita (*Laguncularia racemosa*). Cada uma dessas espécies ocupa ambientes relativamente diferentes dentro do manguezal. O mangue vermelho, que recebe esse nome popular por conta de sua madeira avermelhada, cresce em áreas mais próximas à água. O mangue branco é encontrado em áreas mais elevadas e apresenta uma rede densa de raízes aéreas que lhes permitem capturar nutrientes do solo e do ar. Já o mangue preto é encontrado em áreas mais secas e arenosas, onde suas raízes são capazes de armazenar água para períodos de seca, e possuem glândulas de exclusão de sal (SOUZA et al., 2018).

Culturalmente, comunidades tradicionais utilizam os manguezais para a realização de tradições e crenças religiosas, além de o utilizarem para a produção de remédios naturais (NABEELAH BIBI et al., 2019). Além disso, também são importantes num contexto socioeconômico, servindo de sustento financeiro para comunidades pesqueiras que se alimentam das espécies nativas e promovem atividades turísticas nesses ambientes.

No Brasil, a lei de proteção aos manguezais nº 11.428/2006 (Brasil, 2006) estabelece proteção e recuperação para este ecossistema. Em 25 de maio de 2012 foram incluídos no Código Florestal Brasileiro segundo a lei nº 12.651 (Brasil, 2012), sendo considerados Áreas de Preservação Permanente (APP), onde é proibido desmatar, explorar economicamente e promover intervenções que alterem seu funcionamento e benefícios oferecidos.

Apesar desse arcabouço de proteção legal, nas últimas décadas os manguezais vêm perdendo área globalmente devido a urbanização, desenvolvimento industrial, agricultura, aquicultura, super exploração de produtos florestais, poluição causada pelos descartes indevidos de resíduos e mudanças climáticas (FERREIRA & LACERDA, 2018). A perda de área impacta não só a biodiversidade local, mas tem efeitos na qualidade de vida das comunidades costeiras que utilizam esse ecossistema para sua subsistência, visto que eles praticam a pesca artesanal, a coleta de moluscos e crustáceos, sendo atividades que dependem dos manguezais (SANTOS et al., 2017). Além disso, os manguezais são contaminados por metais

potencialmente tóxicos, que quando bioacumulados causam impactos muitas vezes irreversíveis ao organismo afetado.

2.2 Metais não essenciais potencialmente tóxicos

Dentre os metais mais prejudiciais para os ecossistemas costeiros está o mercúrio (Hg), elemento químico que pertence à família dos metais de transição e é considerado um elemento potencialmente tóxico, tendo alta capacidade de conduzir eletricidade e calor (WUANA & OKIEIMEN, 2011). Apresenta tensão superficial maior que outros elementos, tendo como principal característica a volatilidade e a facilidade em evaporar (WUANA & OKIEIMEN, 2011).

O mercúrio inorgânico não contém ligações químicas entre mercúrio e carbono. Dentre os mercúrios inorgânicos estão o mercúrio elementar, que é usado em termômetros e barômetros; o mercúrio divalente, que é um íon de mercúrio encontrado em fontes naturais e em alguns produtos químicos; o cloreto de mercúrio, utilizado em produtos como baterias e alguns cosméticos; e o dióxido de mercúrio, junção do mercúrio e oxigênio utilizada na fabricação de dispositivos elétricos e produtos químicos (BHAN & SARKAR, 2005)

O mercúrio orgânico é a combinação de mercúrio ligado a átomos de carbono. Podem ser encontrados na forma de metilmercúrio, que é a conversão microbiológica do mercúrio inorgânico em água doce, salgada ou solo; etilmercúrio, que é um composto sintético, utilizados em produtos agrícolas (fungicidas) e marcenaria (conservantes de madeiras) (GONGREN et al., 2008); fenilmercúrio, usado em alguns produtos eletrônicos; e o metoxietil mercúrio, um composto sintético que indústrias utilizam como pesticidas e herbicidas (OKRIKATA & NWOSU, 2023).

As principais fontes de contaminação por mercúrio são a mineração de ouro e o uso na agricultura. Durante a mineração do ouro, o mercúrio é utilizado para separar o ouro dos outros minerais (DIAZ et al., 2020), sendo liberado no solo durante o processo, podendo chegar aos rios e oceanos. Alguns herbicidas que contêm Hg em sua fórmula são utilizados na agricultura e assim acabam contaminando de forma direta o solo, apesar de serem proibidos em vários países e ter uma regulamentação bem rigorosa (REZENDE et al., 2022).

Indústrias que produzem cloro e soda cáustica podem contaminar o ambiente com mercúrio através de emissões atmosféricas, descarte inadequado dos resíduos gerados e vazamentos e derramamentos das tubulações de produção (OKRIKATA & NWOSU, 2023). O descarte inadequado de resíduos sólidos como lâmpadas fluorescentes, termômetros, pilhas e baterias que contém mercúrio em sua composição contaminam o solo e a água (XIONG et al., 2019). Na queima de combustíveis fósseis de carvão e petróleo, o Hg é liberado no ambiente através do ar, e pode se acumular em corpos d'águas e solos, se transformando em metilmercúrio (SINGH et al., 2023).

O metilmercúrio é a forma mais tóxica do mercúrio e, devido ao seu potencial de acumulação ao longo da cadeia trófica, ele é considerado um problema de saúde pública (MUÑOZ et al., 2023). A contaminação por metilmercúrio em humanos pode causar danos ao sistema nervoso central, principalmente em fetos e crianças, afetando seu desenvolvimento cognitivo e motor e podendo causar problemas cardíacos e renais (JANNETTO et al., 2023).

Devido à alta toxicidade do mercúrio, em 2017 entrou em vigor a Convenção de Minamata, que estabelece medidas para a redução da sua concentração no meio ambiente. Tais medidas englobam a proibição de extração de mercúrio metálico e regulamentação da quantidade de mercúrio em produtos que o utilizam, além de medidas que protegem a saúde humana (MINAMATA, 2023).

Todos os materiais e substâncias que contêm em sua composição Hg são potencialmente tóxicos e bioacumulam facilmente, apresentando um alto risco à biodiversidade (LOZANO et al., 2023). A bioacumulação nos organismos causa efeitos diferentes e pode levar à consequências graves a curto e longo prazo tanto para os ecossistemas como para os seres humanos (LOVETT et al., 2009).

Para monitorar esse tipo de contaminação no ambiente, são utilizados alguns índices de avaliação de risco que levam em consideração fatores de concentração detectados nas amostras coletadas (GROS et al., 2010). A partir desses fatores é avaliado o risco que a contaminação representa ao ecossistema. Estes índices são ferramentas que auxiliam na identificação e

medição de riscos ao ambiente. Alguns dos índices mais utilizados para avaliar a contaminação do solo são o Índice de Geoacumulação (Igeo) e o Índice de risco ecológico potencial (RI). Para a avaliação de contaminação de plantas é utilizado o Fator de bioacumulação (BCF).

O Igeo foi criado por Muller (1969) como uma ferramenta para avaliar a contaminação por metais potencialmente tóxicos em solos e sedimentos, baseando-se na comparação das concentrações de metais potencialmente tóxicos e na concentração de um valor referência. Solos e sedimentos com valores de Igeo abaixo de zero são considerados não contaminados; valores entre 0 e 1 são considerados não contaminados a moderadamente contaminados; entre 1 e 2 moderadamente contaminados; entre 2 e 3 moderadamente a fortemente contaminados; entre 3 e 4 fortemente contaminados; e entre 4 e 5 fortemente contaminado (FERREIRA et al., 2022).

O Fator de Risco Ecológico é utilizado para avaliar o risco ambiental de um determinado metal (Hakanson 1980). Este índice classifica o elemento químico em cinco categorias: baixo, moderado, considerável, alto e muito alto (FERREIRA et al., 2022).

O Fator de Bioacumulação (BCF) é usado desde meados de 1950 para avaliar o nível de concentração de metais em plantas, importante para avaliar os efeitos que a contaminação causa na vegetação estudada. Valores maiores que 1 indicam alta bioacumulação (USMAN et al., 2019).

Dessa forma ao utilizar esses índices, é possível obter informações precisas sobre os riscos associados a uma determinada atividade, incluindo a probabilidade de ocorrência e a magnitude do impacto ambiental. Além disso, os índices de avaliação de risco também são úteis para a elaboração de políticas e normas de proteção ambiental, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões em relação à gestão de riscos ambientais.

REFERÊNCIAS

ADLA, Kahrić et al. Degradation of ecosystems and loss of ecosystem services. **In: One Health. Academic Press**, 2022. p. 281-327.

BHAN, Ashima; SARKAR, N. N. Mercury in the environment: effect on health and reproduction. **Reviews on environmental health**, v. 20, n. 1, p. 39-56, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Atlas dos Manguezais do Brasil. Brasília, 2018. 176 p.

COPERTINO, Margareth S. et al. Zonas costeiras. **MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM REDE**, p. 307, 2017.

DIAZ, Farith A.; KATZ, Lynn E.; LAWLER, Desmond F. Mercury pollution in Colombia: challenges to reduce the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in the light of the Minamata Convention. **Water International**, v. 45, n. 7-8, p. 730-745, 2020.

FERREIRA, Sergio LC et al. Use of pollution indices and ecological risk in the assessment of contamination from chemical elements in soils and sediments— Practical aspects. **Trends in Environmental Analytical Chemistry**, p. e00169, 2022.

GROS, Meritxell et al. Removal of pharmaceuticals during wastewater treatment and environmental risk assessment using hazard indexes. **Environment international**, v. 36, n. 1, p. 15-26, 2010.

HAKANSON, Lars. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, v. 14, n. 8, p. 975-1001, 1980.

HAMALTON, Tresa; SAHANA, K. S. An Overview of the Adaptive Variations in Mangroves. **International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology**, v. 15, n. 4, p. 851-860, 2022.

JANNETTO, Paul J.; COWL, Clayton T. Elementary Overview of Heavy Metals. **Clinical Chemistry**, v. 69, n. 4, p. 336-349, 2023.

LOVETT, Gary M. et al. Effects of air pollution on ecosystems and biological diversity in the eastern United States. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1162, n. 1, p. 99-135, 2009.

LOZANO-BILBAO, Enrique et al. Interdecadal variations of the mercury content in Scomber colias in Canary Islands. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 3, p. 8347-8353, 2023.

Minamata Convention on Mercury. Nairobi: United Nations Environment Programme (<http://www.mercuryconvention.org/>, acesso a 01 de abril de 2023).

MÜLLER, G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. 1969. **Geojournal**, 2, 108–118.

- MUÑOZ, Natalia Cadavid et al. Toxicological risk in individuals exposed to methylmercury and total mercury through daily-consumed foodstuffs in one of the mining regions of Bajo Cauca, Antioquia, **Colombia. Emerging Contaminants**, p. 100226, 2023.
- O'CONNELL, Darren P. et al. Assessing mangrove restoration practices using species-interaction networks. **Restoration Ecology**, v. 30, n. 4, p. e13546, 2022.
- OKRIKATA, E.; NWOSU, L. C. Heavy Metals and Pesticides as Hazardous Wastes and Strategies for Minimizing their Hazards. **Journal homepage: www.ijrpr.com ISSN**, v. 2582, p. 7421.
- PALMER, Carol; WOINARSKI, J. C. Z. Seasonal roosts and foraging movements of the black flying fox (*Pteropus alecto*) in the Northern Territory: resource tracking in a landscape mosaic. **Wildlife Research**, v. 26, n. 6, p. 823-838, 1999.
- PRINCIPE, Silas C.; AUGUSTO, Alessandra; COSTA, Tânia Marcia. Differential effects of water loss and temperature increase on the physiology of fiddler crabs from distinct habitats. **Journal of thermal biology**, v. 73, p. 14-23, 2018.
- REZENDE-TEIXEIRA, Paula et al. What can we learn from commercial insecticides? Efficacy, toxicity, environmental impacts, and future developments. **Environmental Pollution**, p. 118983, 2022.
- SANTOS, Luciana Cavalcanti Maia et al. Socio-ecological assessment for environmental planning in coastal fishery areas: a case study in Brazilian mangroves. **Ocean & coastal management**, v. 138, p. 60-69, 2017.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Yara. Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar. São Paulo: **Caribbean Ecological Research**, v. 7, 1995.
- SINGH, Arun Dev et al. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies. **Chemosphere**, p. 137917, 2023.
- SOUZA, Caroline A. et al. Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica. **Educação Ambiental sobre Manguezais. São Vicente: Unesp**, p. 16-56, 2018
- USMAN, Kamal; AL-GHOUTI, Mohammad A.; ABU-DIEYEH, Mohammed H. The assessment of cadmium, chromium, copper, and nickel tolerance and bioaccumulation by shrub plant *Tetraena qataranse*. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 5658, 2019.
- WUANA, Raymond A.; OKIEIMEN, Felix E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. **International Scholarly Research Notices**, v. 2011, 2011.
- XIONG, Xinni et al. Potentially toxic elements in solid waste streams: Fate and management approaches. **Environmental pollution**, v. 253, p. 680-707, 2019.

ZEPILLI, Daniela et al. Characteristics of meiofauna in extreme marine ecosystems: a review. **Marine Biodiversity**, v. 48, p. 35-71, 2018.

3 AVALIAÇÃO DE MERCÚRIO EM UM MANGUEZAL DE ÁREA PROTEGIDA DO LITORAL NORTE DE ALAGOAS

MERCURY EVALUATION IN A MANGROVE SWAMP OF A PROTECTED AREA ON THE NORTHERN COAST OF ALAGOAS

Amorim, C.B., Anunciação, D.S., Mello, F., Freire, E.S., Santos, J.C.C., Malhado, A. C., Diele-Viegas, L.M.

Resumo: O manguezal é um ecossistema costeiro singular, cuja dinâmica está associada à manutenção e equilíbrio do planeta. A vegetação de mangue é composta por plantas adaptadas a ambientes salinos e pantanosos que possuem características únicas para se desenvolver nesse tipo de ambiente. Destaca-se a espécie *Laguncularia racemosa*, que possui um papel relevante como indicador ecológico. No entanto, o ecossistema de manguezal vem sendo impactado negativamente por atividades antrópicas que afetam sua funcionalidade e serviços ambientais, levando à perda de área e consequente perda de produtividade. Foi selecionado um manguezal do litoral norte do estado de Alagoas, Brasil, para avaliação de índices de geoacumulação (Igeo), risco ecológico (ER) e o de bioconcentração (BCF) por meio da determinação de Hg em amostras de sedimento, raízes e folhas de *L. racemosa*. As amostras foram submetidas à digestão ácida e, em seguida, à análise por espectrometria de fluorescência atômica com vapor frio (CV AFS). Os teores máximos de Hg nas amostras de sedimento, raízes e folhas foram, respectivamente, 0,20; 0,19 e 0,11 mg/kg. O Igeo indicou que ambos os pontos encontram-se no grau de classificação de 0-1 (não contaminado a moderadamente contaminado), enquanto o índice BCF indicou baixa bioconcentração tanto nas raízes quanto nas folhas. Os resultados evidenciaram que o ecossistema estudado pode ser atribuído como ambiente relevante e remoto em termos de contaminação por Hg servindo de referência para estudos de monitoramento futuros. Entretanto, há que se considerar a necessidade de realização de um monitoramento a longo prazo de forma a inferir sobre a qualidade desse ambiente quanto aos potenciais riscos de exposição ao Hg.

Palavras-chave: ecossistemas costeiros; contaminação; fitorremediação; *Laguncularia racemosa*.

Abstract: The mangrove is a unique coastal ecosystem whose dynamics are associated with the maintenance and balance of the planet. The mangrove vegetation is composed of plants adapted to saline and marshy environments that have unique characteristics to develop in this type of environment. The species *Laguncularia racemosa* stands out, which has a relevant role as an ecological indicator. However, the mangrove ecosystem has been negatively impacted by anthropogenic activities that affect its functionality and environmental services, leading to area loss and consequent loss of productivity. A mangrove swamp on the northern coast of Alagoas State, Brazil, was selected for evaluation of geoaccumulation index (Igeo), ecological risk (ER) and bioconcentration index (BCF) through the determination of Hg in sediment samples, roots and leaves of *L. racemosa*. The samples were submitted to acid digestion and then to analysis by cold vapor atomic

fluorescence spectrometry (CV AFS). The maximum Hg contents in the sediment, root and leaf samples were 0.20; 0.19 and 0.11 mg/kg, respectively. The Igeo indicated that both sites are in the classification grade of 0-1 (not contaminated to moderately contaminated), while the BCF index indicated low bioconcentration in both roots and leaves. The results showed that the studied ecosystem can be assigned as a relevant and remote environment in terms of Hg contamination serving as a reference for future monitoring studies. However, the need for long-term monitoring should be considered in order to infer on the quality of this environment regarding the potential risks of Hg exposure..

Key-words: coastal ecosystems; contamination; phytoremediation; *Laguncularia racemosa*.

1. INTRODUÇÃO

Os manguezais são ecossistemas costeiros singulares, responsáveis por serviços ecossistêmicos fundamentais para a manutenção e equilíbrio do planeta (SCHAEFFER-NOVELLI, 1995). Além disso, abrigam uma grande diversidade de peixes e crustáceos de elevada importância econômica e social, propiciando sustento de comunidades humanas tradicionais e daqueles vinculados direta e indiretamente à utilização dos seus recursos (SANTOS et al., 2021).

A vegetação de mangue é altamente adaptada a essas condições ambientais extremas, que incluem altos níveis de salinidade, mudanças rápidas de maré, baixos níveis de oxigênio e altas concentrações de metais não essenciais potencialmente tóxicos (DAS et al., 2016). Essas plantas desenvolveram adaptações fisiológicas, morfológicas e anatômicas que lhes permitem sobreviver e prosperar nesses ambientes desafiadores (KUMAR et al., 2020).

Os manguezais se estabelecem ao longo de toda a costa brasileira, onde predominam três espécies de plantas: *Rhizophora mangle* L. (mangue vermelho), a *Laguncularia racemosa* L. (mangue branco) e *Avicennia schaueriana* Stapft & Leechm (MATIAS & SILVA, 2017). Essa baixa diversidade florística de espécies arbóreas se deve às condições abióticas às quais o ecossistema está submetido, uma vez que poucas espécies estão adaptadas para sobreviver em um ambiente com essas características (SANTOS, 2009).

Apesar da sua importância, esse ecossistema vem sendo impactado negativamente por atividades antrópicas levando a uma perda de área e

consequente diminuição de produtividade, que afetam sua funcionalidade e serviços ambientais (MACFARLANE e BURCHETT, 2001). As atividades que mais impactam os manguezais incluem a agricultura, aquicultura, indústria e o descarte incorreto de esgoto doméstico (ARAÚJO et al., 2020; LEE et al., 2014). Essas atividades escoam metais que chegam ao manguezal, podendo prejudicar o metabolismo das plantas e afetar a resiliência do ecossistema (FREITAS et al., 2009).

O mercúrio (Hg) é um metal não essencial potencialmente tóxico, que tem como principais características sua alta toxicidade, bioacumulação e volatilidade (SHAHID et al., 2020). O acúmulo de Hg afeta o crescimento das plantas e induz o estresse oxidativo em células e tecidos vegetais, o rompimento da membrana lipídica, alterações na pigmentação da planta e o aumento da produção de metabólitos. (DAS et al., 2016; HE et al., 2014). Seu efeito de bioacumulação ainda permite que a sua toxicidade aumente ao longo da cadeia trófica (FELIX et al., 2022).

No litoral de Alagoas, a degradação dos manguezais está diretamente relacionada à poluição pela ampliação da rede hoteleira e às atividades turísticas, além da grande expansão da monocultura de cana-de-açúcar e coco (CORREIA & SOVIERZOSKI, 2008). No entanto, além do fato dos manguezais serem considerados áreas de preservação permanente (APP), de acordo com a Lei Federal nº 12.651/2012 (Código Florestal) (BRASIL, 2012), com limites de uso, os manguezais de grande parte do litoral alagoano estão dentro uma Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (APA) e, por consequência, precisam ser monitorados e preservados.

Avaliar a contaminação de mercúrio em manguezais é fundamental para a identificação de potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Sendo assim, o objetivo deste trabalho consistiu em avaliar o grau de contaminação de Hg através da sua concentração e índices de impactos ambientais em um manguezal localizado dentro de uma APA no litoral norte de Alagoas, Brasil.

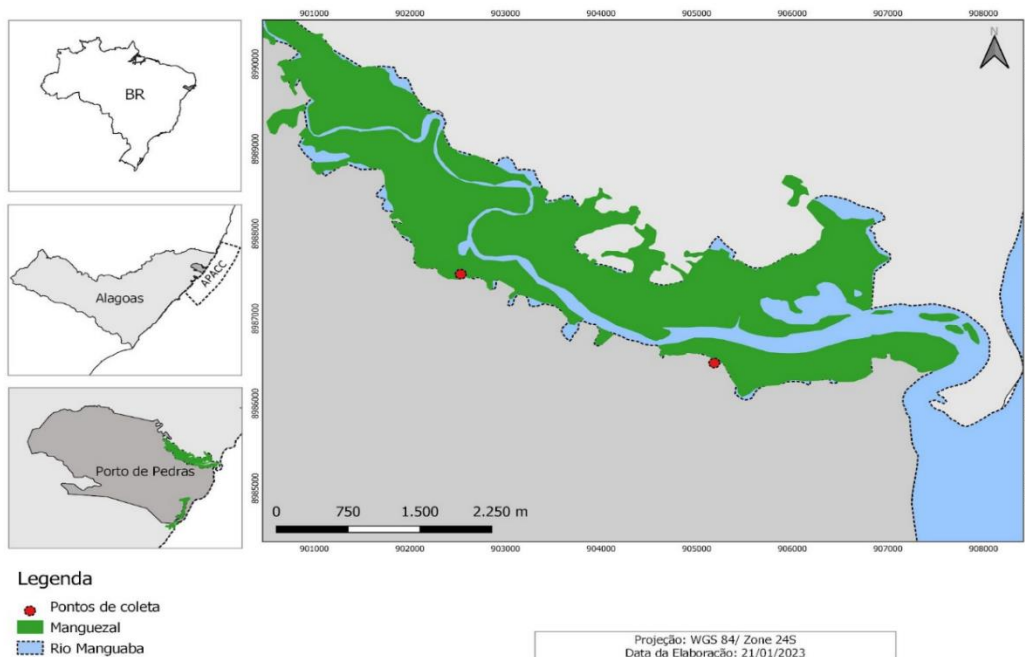
2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O manguezal avaliado neste estudo está localizado no rio Manguaba (Figura 01), próximo ao município de Porto de Pedras (-09° 09' 29" S; 35° 17' 46" W), situado no litoral Norte do estado de Alagoas, Brasil. O município faz parte da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais – APACC, uma Unidade de Conservação de Uso Sustentável (ICMBio, 2013) e está há 110 km da capital Maceió, tendo 257,105 km em extensão territorial e uma população estimada em 7.618 habitantes (IBGE, 2021).

A bacia hidrográfica do rio Manguaba é considerada a mais importante do litoral norte alagoano, interligando as cidades de Porto Calvo, Japaratinga e Porto de Pedras. Este rio já foi muito utilizado para o fluxo de mercadorias e comércio entre portugueses e holandeses e, atualmente, além da irrigação de lavouras de cana-de-açúcar, é uma fonte de recursos naturais como peixes e mariscos, além da água de abastecimento das cidades por onde passa, revelando assim seu potencial socioeconômico para a população local (COUTINHO et al., 2022). A coleta foi feita em dois pontos do manguezal, sendo o primeiro localizado a 21 km e o segundo a 37 km de distância de uma usina açucareira (Figura 01).

Figura 01- Mapa de localização da área de estudo e pontos de coleta.



Fonte: Elaborado por Rosy Valéria Lopes, exclusivamente para este trabalho (2023).

2.2 Amostragem

A amostragem foi realizada no mês de junho de 2022 e para cada ponto de coleta, foi delimitada uma parcela triangular onde foram coletadas amostras de sedimento, raiz e folhas de indivíduos de *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. f.. As amostras foram coletadas em triplicata, a uma distância de 10 m entre si, totalizando dezoito amostras.

A coleta do sedimento (n=3) ocorreu próximo à raiz da árvore. O sedimento abaixo de 15 cm de profundidade foi coletado com o auxílio de um trado, homogeneizado em uma bandeja de polietileno e as amostras obtidas foram acondicionadas em sacos de polietileno para transporte até o laboratório.

A *L. racemosa* é uma espécie da família Combretaceae, conhecida como mangue branco, devido a sua característica de apresentar casca externa branca e lisa. Além disso, suas folhas jovens são brancas, o que contribui para o nome popular. A espécie foi selecionada por ser considerada uma espécie bioindicadora de manguezais poluídos (KUMARI et al., 2020).

Foram coletadas 1 amostra de raiz e 20 unidades de folhas de *L. racemosa* da mesma árvore. Foi determinada uma área de 10 cm de diâmetro por 10 cm de profundidade para a coleta das raízes, as quais foram lavadas com água deionizada, e, assim como as folhas, acondicionadas em sacos de polietileno e mantidas sob refrigeração até a etapa de tratamento das amostras (RODRIGUES et al., 2013).

Por fim, foram aferidos também os seguintes parâmetros físico-químicos da água: temperatura (°C), oxigênio dissolvido, pH e condutividade com o auxílio de uma sonda multiparâmetros AK88-AKSO.

2.3 Tratamento das amostras

Em laboratório, foi usado o liofilizador (Terroni LS300, São Carlos, Brasil) para secar as amostras de raiz e folha, para posterior tratamento. O sedimento foi seco em bandejas de polietileno à temperatura ambiente por

cerca de 3 a 4 dias. Após secagem, as amostras foram trituradas/homogeneizadas e acondicionadas em dessecador até a etapa de digestão. Com o auxílio de um micro-ondas com cavidade, Milestone (Ethos One, Sorisole, Itália), as amostras foram submetidas a uma digestão ácida para eliminação da matéria orgânica e compatibilização da matriz com a técnica analítica que seria utilizada para determinar a concentração de mercúrio. O procedimento de digestão, adaptado de Rodrigues et al. (2014), envolveu a pesagem de 0,500 g da amostra no frasco de teflon, adição de 6,0 mL de HNO₃ concentrado (14,4 mol L⁻¹) e 2,0 mL de H₂O₂ 30 % (v/v) e, em seguida, os frascos vedados foram submetidos à radiação de micro-ondas de acordo com os programas de aquecimento expressos nas Tabelas 01 e 02, a depender do tipo de amostra.

A determinação de mercúrio nas amostras digeridas foi realizada, em triplicata, no espectrômetro de fluorescência atômica com vapor frio (CV AFS) (PS Analytical, modelo 10.025 Millenium Merlin, Reino Unido). Em 4 mL de amostra, foram adicionados 5 mL de ácido clorídrico a 25%, 50 µL de uma solução mista (mix) de brometo/bromato de potássio, 0,1/0,017 mol L⁻¹, e 40 µL de ácido ascórbico, 12% (m/v). Em seguida, as amostras foram avolumadas com água ultrapura, condutividade de 18,2 MΩ, obtida a partir do sistema Gehaka (São Paulo, Brasil) para um balão de 25 mL e então submetidas à análise espectrométrica.

Tabela 01. Programa do forno de micro-ondas para digestão das amostras de sedimento.

Etapa	Tempo (min)	Potência (W)	Temperatura (°C)
1	10	1000	0 - 100
2	02	1000	100
3	08	1000	100 - 180
4	08	1000	180 - 100
5	08	1000	Ventilação

Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2013).

Tabela 02. Programa do forno de micro-ondas para digestão das amostras de folha e raiz.

Etapa	Tempo (min)	Potência (W)	Temperatura (°C)
1	15	1000	0 - 100
2	10	1000	100
3	10	1000	100 - 180
4	10	0	Ventilação

Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2013).

2.4 Impacto de risco ambiental

2.4.1 Índice de geoacumulação (Igeo)

O Igeo foi usado para determinar a intensidade do grau de contaminação de Hg no sedimento (Tabela 03) e foi calculado segundo a equação de Muller (1969):

Equação (1)

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{cn}{1,5 \cdot bn} \right)$$

No qual cn é a concentração do metal encontrado na amostra, 1,5 é o fator de correção de efeitos e bn a concentração referência, 0,12 mg/kg⁻¹, baseado em Araújo et al., 2021, que quantificou metais encontrados em um manguezal do litoral norte de Pernambuco.

Tabela 03. Classificação do Índice de Geoacumulação (Igeo)

Grau	Classe	Intensidade
< 0	0	Não contaminado
0-1	1	Não contaminado a moderadamente contaminado
1-2	2	Moderadamente contaminado
2-3	3	Moderadamente a fortemente contaminado
3-4	4	Fortemente contaminado
4-5	5	Fortemente a extremamente contaminado
>5	6	Extremamente contaminado

Fonte: Muller (1969).

2.4.2 Índice de Risco Ecológico (ER)

Esse índice foi utilizado para avaliar a saúde do ecossistema e a existência de algum risco ecológico iminente por contaminação de Hg (HAKANSON, 1980).

Equação (2)

$$Er = Thg \cdot Fi$$

Onde Er é o valor equivalente ao risco ecológico, Thg é o valor a concentração referência, cujo valor usado foi de $0,12\text{mg/kg}^{-1}$ com base no artigo de Araújo e colaboradores (2021), que fez uma quantificação em um manguezal do litoral norte de Pernambuco e Fi valor da concentração mg/kg^{-1} .

Tabela 04. Grau de Potencial Risco Ecológico (Er).

Er	Potencial Risco Ecológico
<40	Baixo
40-80	Moderado
80-160	Considerável
160-320	Alto
>320	Muito Alto

Fonte: Hakanson (1980).

Fator de Bioconcentração (BCF)

Esse índice é usado para determinar a capacidade das plantas de acumular metais não essenciais potencialmente tóxicos nas raízes ou folhas em relação às concentrações de metais pesados nos sedimentos (OOST et al., 2003). Valores <1 indicam bioconcentração de metais (DALLINGER, 1993).

Equação (3)

$$BCF = \text{concentração de planta} / \text{concentração do sedimento}$$

2.5 Análise estatística

Para a análise dos dados obtidos neste estudo, foi utilizado um modelo linear generalizado (GLM), técnica amplamente utilizada para modelar a

relação entre variáveis independentes e dependentes em dados que não seguem uma distribuição normal. Neste estudo, testamos a relação entre a concentração de mercúrio (variável resposta), o tipo de amostra (sedimento, raiz e folha), a distância em relação à usina açucareira e a interação entre as duas variáveis preditoras. O modelo considerou a função de distribuição da família Gaussiana devido à variável resposta (i.e., concentração de Hg) ser do tipo quantitativa contínua, e função de ligação *identity*, uma vez que este é um modelo linear padrão (Da Silva et al., 2022). A análise foi desenvolvida através da função *GLM* do *stats*, pacote base do ambiente estatístico R, versão 4.2.1 (R Core Team 2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação dos metais com o sedimento depende de aspectos físico-químicos como o estado redox, teor de matéria orgânica, salinidade, temperatura, pH, granulometria, dentre outros parâmetros do ambiente natural (ZHAO et al. 2014). Daí a importância de se determinar os parâmetros físico-químicos numa amostragem de campo. A Tabela 05 apresenta dos dados dos parâmetros aferidos na amostragem. De acordo com os dados obtidos, pode-se inferir que o corpo d'água do ecossistema em estudo encontra-se dentro dos limites estabelecidos para águas salobras de classe 1, a qual foi utilizada a título de comparação com o presente trabalho.

Tabela 05- Características físico-químicas dos pontos de coleta

	Ponto 01	Ponto 02
Oxigênio Dissolvido (DO)	6,72	6,68
pH	6,39	6,42
Condutividade	0,55	0,57
Salinidade	2,98	3,09
Temperatura (C°)	24,8	24,6

A Tabela 06 apresenta os resultados analíticos de concentração de Hg nas amostras do manguezal, seus respectivos desvios padrão e desvios padrão relativos. De acordo com esses dados, se verifica que a concentração

de Hg variou no sedimento entre 0,18 e 0,20 mg/kg, valores abaixo do limite de 0,3 mg/kg estabelecido pelo CONAMA para material a ser dragado (Brasil,2012). Nas raízes e folhas as concentrações de Hg variaram entre 0,15 e 0,19 mg/kg, 0,09 e 0,11 mg/kg, respectivamente.

Tabela 06. Média da concentração de Hg encontrado nos pontos de amostragem 01 e 02

AMOSTRAS	Ponto 01	Concentração (mg/kg)	±	sd	RSD (%)	Ponto 02	Concentração (mg/kg)	±	sd	RSD (%)
Sedimento	A1	0,2037	±0,0016		0,80	A1	0,1844	± 0,0005		0,29
	A2	0,1999	± 0,0014		0,70	A2	0,1896	± 0,0028		1,50
	A3	0,2020	±0,0020		0,98	A3	0,2055	± 0,0011		0,56
Raiz	A1	0,1900	±0,0027		1,42	A1	0,1515	± 0,0010		0,66
	A2	0,1974	± 0,0066		3,33	A2	0,1642	± 0,0057		3,44
	A3	0,1976	± 0,0047		2,39	A3	0,1680	± 0,0059		3,41
Folha	A1	0,0952	± 0,0009		0,93	A1	0,1122	± 0,0059		5,22
	A2	0,0913	± 0,0017		1,89	A2	0,1170	± 0,0003		0,23
	A3	0,0923	± 0,0012		1,26	A3	0,1097	±0,0022		1,99

Fonte: a autora, 2023.

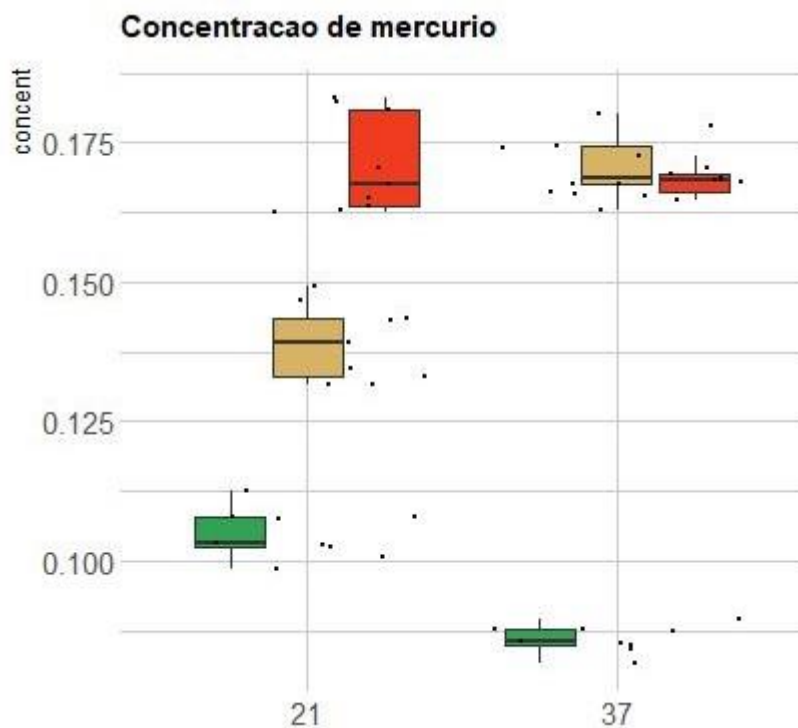
A partir do tratamento estatístico do modelo linear generalizado (Tabela 07) foi possível avaliar a relação entre as variáveis (tipo de amostra e distância

da usina sucro-alcooleira) e sua influência na concentração de Hg. De acordo com os dados, todas as relações foram significativas, não havendo, portanto, sobreposição dos dados. A partir da Tabela 07 foi plotado um gráfico de box-plot em que se evidencia a diferença de concentração de Hg nas amostras em função da distância da usina. No ponto mais próximo (21 km), a distribuição do Hg apresentou um perfil coerente e de acordo com o esperado, uma vez que maior teor foi encontrado no sedimento, seguido de raiz e folhas. Por outro lado, no ponto mais distante da usina, o teor de Hg esteve distribuído de forma similar entre sedimento e raiz, havendo uma menor migração desse elemento na planta, uma vez que as folhas apresentaram as menores concentrações de Hg, até inferiores às do ponto 01.

Tabela 07. Coeficientes de regressão e estatísticas do modelo GLM que relaciona a concentração de mercúrio ao tipo de amostra (folha, raiz e sedimento) e à distância da coleta em relação à usina açucareira em manguezal do Rio Manguaba, Alagoas, Brasil.

Variável	Coeficiente	Erro-padrão	Valor t	Valor p
Intercepto	-1,99	0,05	-40,02	<0,001
Folha x Raíz	-0,25	0,06	-4,11	<0,001
Folha x Sedimento	0,25	0,06	4,34	<0,001
Distância	-0,01	0,002	-7,10	<0,001
(Folha x Raíz) x Distância	0,03	0,002	12,3	<0,001
(Folha x Sedimento) x Distância	0,01	0,002	5,68	<0,001

Figura 02. Concentração de mercúrio na folha (verde), raiz (marrom) e sedimento (vermelho) nos pontos mais próximo (21 km) e mais distante (37 km) em relação à usina açucareira.



Fonte: A autora, 2023.

O sedimento é considerado um dos principais acumuladores de metais em ambientes aquáticos e a depender da profundidade oferece informações de datação de contaminação (SANYALA et al., 2015). Os dados do presente trabalho estão coerentes no que se refere à maior concentração de Hg no sedimento em relação às amostras de *L. racemosa*. Entretanto, como os teores foram baixos e não excederam o limite estabelecido pelo CONAMA, esse local pode ser considerado uma zona remota (ambiente relevante) cujas concentrações de Hg podem ser atribuídas como background para monitoramentos futuros. Vale salientar a importância de se calcular o fator de bioacumulação do Hg devido aos possíveis impactos tanto a vida aquática como da população que tenha contato direto com esse ecossistema ao longo dos anos.

A partir dos dados obtidos nas amostras de raízes e folhas, constatou-se que não há contaminação por Hg em *L. racemosa*. Essa constatação pode ser justificada pela identificação de um baixo potencial de translocação de metais para a parte aérea desta espécie de mangue, o que pode ser decorrente da baixa disponibilidade desse elemento no solo (ZHOU et al., 2011). Por ser uma espécie que se desenvolve em ambiente encharcado e ter uma interação do sistema radicular com o solo, a *L. racemosa* desenvolve placas de ferro, que são barreiras protetoras localizadas na superfície das raízes que podem condicionar o transporte para outras partes das plantas e até imobilizar o metal em sua estrutura (DU et al., 2013; LI et al., 2016). A baixa concentração de Hg nas folhas pode se dar pela ação de microorganismos presentes nas rizosferas que podem oxidar compostos que interagem com metais diminuindo assim sua disponibilidade e translocação no ecossistema, o que é comum em algumas espécies de mangue (MEI et al., 2021).

As amostras de sedimento do ponto mais distante da usina sucrocooleira apresentaram Igeo entre 0,0159 e 0,0164, enquanto o ponto mais próximo teve médias variando de 0,0148 a 0,0164 (Tabela 08).

As médias dos resultados do índice Er variaram de 0,0238 a 0,0244 e de 0,0221 a 0,0247, nos respectivos pontos P1 e P2 (Tabela 08). Ambos os pontos se enquadram, portanto, no grau de classificação de 0-1 (não contaminado a moderadamente contaminado).

O índice de Fator de Risco Ecológico encontrado foi abaixo de 40 para todas as amostras, se encaixando na categoria de baixo risco ecológico. Embora nesta coleta o Er tenha sido baixo, vale salientar que esse valor foi resultado de uma coleta única e que seria necessária a realização de mais coletas para inferir acerca do fator de risco ecológico a longo prazo.

Apesar dos dois pontos avaliados terem sido classificados como não contaminados a moderadamente contaminados, não se descarta a possibilidade de que o ambiente esteja em processo de contaminação, visto que o acúmulo de Hg em sedimento não depende exclusivamente de fatores ambientais. O escoamento de resíduos industriais e residenciais contribui diretamente para o acúmulo deste metal, o qual mesmo em baixa concentração, pode causar a poluição da água e tornar o ambiente impróprio para desenvolvimento de plantas, animais de vida sésil e para quem se

alimenta deles, chegando até ao consumo humano (MADHAV et al., 2020; STANKOVIC et al., 2014; WARD et. al., 2010).

Tabela 08. Média dos índices encontrados nos sedimentos dos pontos 01 e 02.

Ponto 01	IGeo	ER	Ponto 02	IGeo	ER
A1	0,0164	0,0244	A1	0,0148	0,0221
A2	0,0159	0,0242	A2	0,0152	0,0228
A3	0,0162	0,0238	A3	0,0164	0,0247

Fonte: a autora, 2023.

Os valores do BCF para raiz variaram de 0,92 a 0,99 para o ponto mais distante e de 0,82 a 0,87 para o ponto mais próximo da usina (Tabela 09). Para o índice aplicado às folhas, os valores variaram entre 0,45 e 0,47 no ponto mais distante e entre 0,53 e 0,62 no mais próximo. Apesar do ponto mais distante apresentar valores maiores de concentração em relação ao ponto mais próximo da usina, a vegetação apresentou, de modo geral, uma baixa bioconcentração de Hg.

Laguncularia racemosa pode ser um excelente bioindicador de metais com alto potencial tóxico (BERNINI et al., 2010), e seu uso como bioindicador de ecossistemas costeiros têm implicações importantes para monitoramento e gestão ambiental (LI et al., 2020). Ao monitorar as concentrações de metais nos seus tecidos, é possível avaliar o grau de contaminação no ambiente circundante, identificar potenciais fontes de poluição e avaliar a eficácia de estratégias de gestão para reduzir os níveis de contaminação (GÓMEZ-BERNAL et al., 2021). Os resultados indicam que as raízes apresentaram maior concentração de Hg que outros tecidos vegetais, reforçando evidências encontradas em estudos prévios (e.g., MOLINA et al., 2006; MARRUGO-NEGRETE et al., 2015; 2016). Apesar disso, experimentos recentes indicam ainda que *L. racemosa* pode ser um sumidouro atmosférico de mercúrio, pois suas folhas podem absorver Hg pelo ar (TANG et al., 2021), além de transportar Hg do sedimento para a parte superior através da corrente de transpiração (ZHOU et al., 2021).

A acumulação de metais nas raízes ocorre por meio do transporte molecular na membrana radicular, criando um complexo transporte de metais para o xilema (WILDA et al., 2020). Os metais tendem a se fixar mais na raiz devido ao seu córtex externo, não transferindo metal para as outras partes das plantas (WANG et al., 2021). A pressão das raízes que impulsiona o fluxo de água ao longo da planta, transpiração foliar e capilaridade do xilema são fatores que influenciam o transporte de substância pela planta (RUNGKU et al., 2017).

Tabela 09. Média do índice de bioacumulação das raízes e folhas no ponto 01 e 02

	Ponto 01	BCF	Ponto 02	BCF
Raiz	A1	0,92	A1	0,82
	A2	0,99	A2	0,87
	A3	0,98	A3	0,82
Folha	A1	0,47	A1	0,61
	A2	0,45	A2	0,62
	A3	0,46	A3	0,53

Fonte: a autora, 2023.

O grau de resiliência de *L. racemosa* a elementos tóxicos, associada à sua capacidade de absorvê-los do ambiente, revela o potencial da espécie para remediação de manguezais contaminados (VICTÓRIO et al., 2023). Assim, dada a crescente problemática de conversão do uso da terra e constante degradação na costa atlântica brasileira, a supressão de *L. racemosa* só aumentaria a perda de funções importantes do ecossistema.

CONCLUSÃO

Ao determinar o teor de Hg no manguezal do rio Manguaba, identificou-se um baixo grau de contaminação considerando os índices Igeo e Er para o sedimento e BCF para raiz e folhas. É importante destacar que esta foi uma coleta pontual, e que é preciso manter a vigilância sobre a presença de mercúrio no manguezal.

A ampla distribuição e adaptabilidade de *L. racemosa* a torna uma ferramenta valiosa para monitorar a contaminação por Hg em ecossistemas de manguezais. Porém, o uso desta espécie como bioindicador não está isento de limitações já que fatores como idade, tamanho e condições ambientais podem influenciar os padrões de acúmulo de metais nos tecidos vegetais, e mais pesquisas são necessárias para entender melhor esses fatores e aumentar a precisão da abordagem de bioindicadores.

Os dados obtidos revelam a possibilidade de se utilizar esse ambiente como referência de contaminação de Hg o qual poderá ser utilizado como parâmetro em monitoramentos futuros. Outrossim, é essencial que se mantenha a realização de monitoramento e controle de atividades humanas que possam contribuir para a inserção de Hg no ambiente natural, visando minimizar os impactos negativos de possíveis contaminações.

REFERÊNCIAS

ADLA, Kahrić et al. Degradation of ecosystems and loss of ecosystem services. In: One Health. Academic Press, 2022. p. 281-327.

BERNINI, Elaine et al. Spatial and temporal variation of the nutrients in the sediment and leaves of two Brazilian mangrove species and their role in the retention of environmental heavy metals. Brazilian Journal of Plant Physiology, v. 22, p. 177-187, 2010.

BHAN, Ashima; SARKAR, N. N. Mercury in the environment: effect on health and reproduction. Reviews on environmental health, v. 20, n. 1, p. 39-56, 2005.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Portal Brasil em Síntese. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Atlas dos Manguezais do Brasil. Brasília, 2018. 176 p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA); Resolução No. 357, Dispõe sobre A Classificação dos Corpos de Água e Diretrizes Ambientais para o seu Enquadramento, bem como Estabelece as Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes, e dá outras Providências; Diário Oficial da União (DOU), Brasília, No. 53, de 18/03/2005, p. 58, available at <https://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>.

COPERTINO, Margareth S. et al. Zonas costeiras. MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM REDE, p. 307, 2017.

COUTINHO, Jandson; REGINA, Myrella; CAVALCANTE, Lucas. USO DE GEOTECNOLOGIAS NA IDENTIFICAÇÃO DO CONFLITO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE NA MARGEM DO RIO MANGUABA, PORTO CALVO-AL. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 7, n. 2, p. 25-25, 2022.

Da Silva FR, Gonçalves-Souza T, Paterno GB, Provete DB, Vancine MH. 2022. Análises ecológicas no R. Nupeea : Recife, PE, Canal 6 : São Paulo. 640 p. ISBN 978-85-7917-564-0.

DAS, Swagat Kumar; PATRA, Jayanta Kumar; THATOI, Hrudayanath. Antioxidative response to abiotic and biotic stresses in mangrove plants: A review. International Review of Hydrobiology, v. 101, n. 1-2, p. 3-19, 2016.

DE ALMEIDA RODRIGUES, Paloma et al. Mercúrio na contaminação da fauna aquática: uma revisão sistemática sobre sua dinâmica e potenciais riscos à saúde. Journal of Environmental Sciences , v. 84, p. 205-218, 2019.

DIAZ, Farith A.; KATZ, Lynn E.; LAWLER, Desmond F. Mercury pollution in Colombia: challenges to reduce the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in the light of the Minamata Convention. Water International, v. 45, n. 7-8, p. 730-745, 2020.

DINU, Cristina et al. Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants grown in a mining-contaminated soil. Journal of Soils and Sediments, v. 20, p. 2141-2154, 2020.

DU, Jingna; YAN, Chongling; LI, Zhaodeng. Formation of iron plaque on mangrove *Kandalar. Obovata* (SL) root surfaces and its role in cadmium uptake and translocation. Marine Pollution Bulletin, v. 74, n. 1, p. 105-109, 2013.

FERREIRA, Sergio LC et al. Use of pollution indices and ecological risk in the assessment of contamination from chemical elements in soils and sediments— Practical aspects. Trends in Environmental Analytical Chemistry, p. e00169, 2022.

FREITAS, Eriberto Vagner de Souza et al. Disponibilidade de cádmio e chumbo para milho em solo adubado com fertilizantes fosfatados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 6, p. 1899-1907, 2009.

GÓMEZ-BERNAL, Juan Miguel et al. Avaliação da acumulação de metais pesados em água, sedimentos e plantas de uma zona costeira do México. *Revista Água e Meio Ambiente*, v. 35, n. 2, pág. 606-616, 2021.

GROS, Meritxell et al. Removal of pharmaceuticals during wastewater treatment and environmental risk assessment using hazard indexes. *Environment international*, v. 36, n. 1, p. 15-26, 2010.

HAKANSON, Lars. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, v. 14, n. 8, p. 975-1001, 1980.

HAMALTON, Tresa; SAHANA, K. S. An Overview of the Adaptive Variations in Mangroves. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, v. 15, n. 4, p. 851-860, 2022.

JANNETTO, Paul J.; COWL, Clayton T. Elementary Overview of Heavy Metals. *Clinical Chemistry*, v. 69, n. 4, p. 336-349, 2023.

KUMAR, A.; MEMO, M.; MASTINU, A. Comportamento vegetal: uma resposta evolutiva ao ambiente?. *Biologia Vegetal*, v. 22, n. 6, pág. 961-970, 2020.

KUMARI, Priyanka; SINGH, Jitendra Kumar; PATHAK, Bhawana. Potential contribution of multifunctional mangrove resources and its conservation. In: *Biotechnological Utilization of Mangrove Resources*. Academic Press, 2020. p. 1-26.

KUMARI, Soni; MISHRA, Amarnath. Contaminação por metais pesados. In: *Contaminação do Solo - Ameaças e Soluções Sustentáveis*. IntechOpen, 2021.

LEE, S. Y.; et al. Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment. *Global Ecology and Biogeography, Australian*, v. 23, n. 7, p. 726-743, 2014.

LI, Ruili et al. Distribution and accumulation of mercury and copper in mangrove sediments in Shenzhen, the world's most rapid urbanized city. *Environmental monitoring and assessment*, v. 188, p. 1-11, 2016.

LOVETT, Gary M. et al. Effects of air pollution on ecosystems and biological diversity in the eastern United States. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1162, n. 1, p. 99-135, 2009.

LOZANO-BILBAO, Enrique et al. Interdecadal variations of the mercury content in *Scomber colias* in Canary Islands. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 3, p. 8347-8353, 2023.

MACFARLANE, G. R.; BURCHETT, M. D. Photosynthetic pigments and peroxidase activity as indicators of heavy metal stress in the grey mangrove,

Avicennia marina (Forsk.) Vierh. Marine pollution bulletin, v. 42, n. 3, p. 233-240, 2001.

MADHAV, Sugghosh et al. Water pollutants: sources and impact on the environment and human health. Sensors in Water Pollutants Monitoring: Role of Material, p. 43-62, 2020.

MAIA, Rafaela Camargo et al. IMPACTOS AMBIENTAIS EM MANGUEZAIS NO CEARÁ: CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS. Conexões-Ciência e Tecnologia, v. 13, n. 5, p. 69-77, 2019.

MARRUGO-NEGRETE, José et al. Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. Chemosphere, v. 127, p. 58-63, 2015.

MARRUGO-NEGRETE, José et al. Screening of native plant species for phytoremediation potential at a Hg-contaminated mining site. Science of the total environment, v. 542, p. 809-816, 2016.

MEI, Kang et al. Low-level arsenite boosts rhizospheric exudation of low-molecular-weight organic acids from mangrove seedlings (*Avicennia marina*): Arsenic phytoextraction, removal, and detoxification. Science of the Total Environment, v. 775, p. 145685, 2021.

MELAKE, Bealemlay Abebe et al. Distribuição de metais na água, sedimentos e tecidos de peixes. Consequências para os riscos à saúde humana devido ao consumo de peixe no Lago Hawassa, Etiópia. Science of The Total Environment , v. 843, p. 156968, 2022.

Minamata Convention on Mercury. Nairobi: United Nations Environment Programme (<http://www.mercuryconvention.org/>, acesso a 01 de abril de 2023).

MÜLLER, G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. 1969. Geojournal, 2, 108–118.

MUÑOZ, Natalia Cadavid et al. Toxicological risk in individuals exposed to methylmercury and total mercury through daily-consumed foodstuffs in one of the mining regions of Bajo Cauca, Antioquia, Colombia. Emerging Contaminants, p. 100226, 2023.

NABEELAH BIBI, Sadeer et al. Etnofarmacologia, fitoquímica e distribuição global de manguezais — Uma revisão abrangente. Drogas marinhas , v. 17, n. 4, pág. 231, 2019.

O'CONNELL, Darren P. et al. Assessing mangrove restoration practices using species-interaction networks. Restoration Ecology, v. 30, n. 4, p. e13546, 2022.

OKRIKATA, E.; NWOSU, L. C. Heavy Metals and Pesticides as Hazardous Wastes and Strategies for Minimizing their Hazards. Journal homepage: www.ijrpr.com ISSN, v. 2582, p. 7421.

OLADOYE, Peter Olusakin; OLOWE, Olumayowa Mary; ASEMOLAYE, Michael Dare. Tecnologia de fitorremediação e impactos na segurança alimentar de

solos contaminados com metais pesados: uma revisão da literatura. *Chemosphere*, v. 288, pág. 132555, 2022.

PALMER, Carol; WOINARSKI, J. C. Z. Seasonal roosts and foraging movements of the black flying fox (*Pteropus alecto*) in the Northern Territory: resource tracking in a landscape mosaic. *Wildlife Research*, v. 26, n. 6, p. 823-838, 1999.

PIMENTEL VICTÓRIO, Cristiane et al. *Laguncularia racemosa* leaves indicate the presence of potentially toxic elements in mangroves. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 4845, 2023.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RABELO, Thiara Oliveira et al. A Contribuição da Geodiversidade na prestação dos Serviços Ecosistêmicos do manguezal. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 4, p. 281-297, 2018.

RAHMAN, Mohammed Mahabubur et al. A brief review on pollution and ecotoxicologic effects on Sundarbans mangrove ecosystem in Bangladesh. *International Journal of Environmental Engineering*, v. 1, n. 4, p. 369-383, 2009.

REHMAN, Ata Ur et al. Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, v. 321, p. 114455, 2021.

ROY, Madhumita et al. Remediação fitobiana integrada para o manejo sustentável de arsênico no solo e na água. *Environment international*, v. 75, p. 180-198, 2015.

RUNGKUT, W.; TIMUR, S. J.; FEBRIANA, E. Kandungan logam berat timbal (Pb) pada akar dan daun mangrove *avicennia marina* (forsk.) Di kawasan mangrove. 2017.

SANTOS, Luciana Cavalcanti Maia et al. Socio-ecological assessment for environmental planning in coastal fishery areas: a case study in Brazilian mangroves. *Ocean & coastal management*, v. 138, p. 60-69, 2017.

SANTOS, Nayara Marques; DA SILVA COSTA, Diógenes Félix; CESTARO, Luiz Antonio. Identificação E Mapeamento Dos Serviços Ecosistêmicos De Provisão No Manguezal Do Rio Tijupá, Ilha Do Maranhão (Região Nordeste Do Brasil). *Caminhos de Geografia*, v. 22, n. 79, p. 276-294, 2021.

SANYAL, Tanmay; KAVIRAJ, Anilava; SAHA, Subrata. Deposition of chromium in aquatic ecosystem from effluents of handloom textile industries in Ranaghat-Fulia region of West Bengal, India. *Journal of advanced research*, v. 6, n. 6, p. 995-1002, 2015.

SARKER, Subrata et al. A review of bioturbation and sediment organic geochemistry in mangroves. *Geological Journal*, v. 56, n. 5, p. 2439-2450, 2021.

SCHAEFFER-NOVELLI, Yara. Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar. São Paulo: Caribbean Ecological Research, v. 7, 1995.

SHAHID, Muhammad et al. A critical review of mercury speciation, bioavailability, toxicity and detoxification in soil-plant environment: Ecotoxicology and health risk assessment. *Science of the total environment*, v. 711, p. 134749, 2020.

SINGH, Arun Dev et al. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies. *Chemosphere*, p. 137917, 2023.

SONONE, Swaroop S. et al. Water contamination by heavy metals and their toxic effect on aquaculture and human health through food Chain. *Lett. Appl. NanoBioScience*, v. 10, n. 2, p. 2148-2166, 2020.

SOUZA, C.A.; DUARTE, L.F.A.; JOÃO, M.C.A. & PINHEIRO, M.A.A. 2018. Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica, Cap. 1: p. 16-56. In: Pinheiro, M.A.A. & Talamoni, A.C.B. (Org.). *Educação Ambiental sobre Manguezais*. São Vicente: UNESP, Instituto de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista, 165 p.

SOUZA, Caroline A. et al. Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica. *Educação Ambiental sobre Manguezais*. São Vicente: Unesp, p. 16-56, 2018

STANKOVIC, Slavka; KALABA, Predrag; STANKOVIC, Ana R. Biota as toxic metal indicators. *Environmental chemistry letters*, v. 12, p. 63-84, 2014.

TAKARINA, Noverita Dian; PIN, Tjiong Giok. Bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) of heavy metals in mangrove trees of Blanakan fish farm. *Makara Journal of Science*, v. 21, n. 2, p. 4, 2017.

TANG, Bin et al. Mercury accumulation response of rice plant (*Oryza sativa* L.) to elevated atmospheric mercury and carbon dioxide. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 224, p. 112628, 2021.

USMAN, Kamal; AL-GHOUTI, Mohammad A.; ABU-DIEYEH, Mohammed H. The assessment of cadmium, chromium, copper, and nickel tolerance and bioaccumulation by shrub plant *Tetraena qataranse*. *Scientific reports*, v. 9, n. 1, p. 5658, 2019.

WANG, Junguang et al. Uptake and concentration of heavy metals in dominant mangrove species from Hainan Island, South China. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 43, p. 1703-1714, 2021.

WARD, Darren M.; NISLOW, Keith H.; FOLT, Carol L. Bioaccumulation syndrome: identifying factors that make some stream food webs prone to elevated mercury bioaccumulation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1195, n. 1, p. 62-83, 2010.

- WILDA, R.; HAMDAN, A. M.; RAHMI, R. A review: The use of mangrove for biomonitoring on aquatic environment. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 012083.
- WUANA, Raymond A.; OKIEMEN, Felix E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. International Scholarly Research Notices, v. 2011, 2011.
- XIONG, Xinni et al. Potentially toxic elements in solid waste streams: Fate and management approaches. Environmental pollution, v. 253, p. 680-707, 2019.
- YUDHA, Ruhuddien Pandu et al. Impact of logging on the biodiversity and composition of flora and fauna in the mangrove forests of Bintuni Bay, West Papua, Indonesia. Forest Ecology and Management, v. 488, p. 119038, 2021.
- ZEPPILLI, Daniela et al. Characteristics of meiofauna in extreme marine ecosystems: a review. Marine Biodiversity, v. 48, p. 35-71, 2018.
- ZHAO, Lei; MENG, Bo; FENG, Xinbin. Mercury methylation in rice paddy and accumulation in rice plant: A review. Ecotoxicology and environmental safety, v. 195, p. 110462, 2020.
- ZHAO, Shengnan et al. Seasonal variation of heavy metals in sediment of Lake Ulansuhai, China. Chemistry and Ecology, v. 30, n. 1, p. 1-14, 2014.
- ZHOU, Jun et al. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. Nature Reviews Earth & Environment, v. 2, n. 4, p. 269-284, 2021.
- ZHOU, Yan-wu et al. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangrove rhizosphere sediments. Environmental Earth Sciences, v. 64, p. 799-807, 2011.