



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

LÍVIA LIMA GOMES

**AVALIAÇÃO DA BIOACUMULAÇÃO DE METAIS EM BRÂNQUIAS, FÍGADO E
MÚSCULO DE *Hemiodus unimaculatus* (BLOCH, 1794) NA REGIÃO FINAL DO
MÉDIO CURSO DO RIO TOCANTINS, MARANHÃO, BRASIL**

Imperatriz – MA

2025



LÍVIA LIMA GOMES

AVALIAÇÃO DA BIOACUMULAÇÃO DE METAIS EM BRÂNQUIAS, FÍGADO E MÚSCULO DE *Hemiodus unimaculatus* (BLOCH, 1794) NA REGIÃO FINAL DO MÉDIO CURSO DO RIO TOCANTINS, MARANHÃO, BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnológicas – CCENT, da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, do curso Ciências Biológicas.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Francisco da Silva

Imperatriz – MA

2025



G633a

Gomes, Lívia Lima

Avaliação da bioacumulação de metais em brânquiais, fígado e músculo de *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) na região final do médio curso do Rio Tocantins, Maranhão, Brasil. / Lívia Lima Gomes. – Imperatriz, MA, 2025.

50 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Ciências Biológicas) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Imperatriz, MA, 2026.

1. Contaminação – água. 2. Metais tóxicos. 3. Rio Tocantins. 4. Imperatriz - MA. I. Título.

CDU 616-022.35

Ficha elaborada pelo Bibliotecário: **Jennifer Rabelo Pires CRB13/987**



LÍVIA LIMA GOMES

AVALIAÇÃO DA BIOACUMULAÇÃO DE METAIS EM BRÂNQUIAS, FÍGADO E MÚSCULO DE *Hemiodus unimaculatus* (BLOCH, 1794) NA REGIÃO FINAL DO MÉDIO CURSO DO RIO TOCANTINS, MARANHÃO, BRASIL

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Francisco da Silva (Orientador)

Doutor em Biologia de Agentes Infecciosos e Parasitários
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Prof. Dr. Jorge Diniz de Oliveira

Doutor em Química
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Prof. Dr. Joaquim Paulo de Almeida Junior

Doutor em Ciência e Tecnologias Ambientais
Universidade Estadual da Região Tocantina Do Maranhão



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe e aos meus avós, onde encontrei cuidado, força e amor sem medida. Tudo o que sou e alcancei começa em vocês.



AGRADECIMENTOS

À minha mãe, alicerce da minha vida, que silenciosamente sempre me incentivou a estudar e nunca soltou minha mão, mesmo quando eu mesma duvidei de mim. Seu exemplo de força e coragem foram presentes em toda essa caminhada. Ao meu pai, pelo apoio financeiro que tornou a faculdade um sonho possível e por me ensinar, muitas vezes em silêncio, o valor do cuidado. Ao meu irmão, que dividiu o lar comigo durante essa trajetória e foi meu parceiro diário, sendo apoio e presença nos dias leves e nos dias difíceis. Aos meus avós, minhas raízes e meu maior orgulho, que sempre acreditaram em mim e se orgulharam de cada conquista, oferecendo amor, cuidado, apoio e sendo exemplos de bondade, força de vontade, amor, cuidado e persistência que moldaram quem sou hoje.

À minha namorada, meu agradecimento mais especial. Por ser refúgio, incentivo e paz em meio ao caos. Por compreender minhas ausências, acolher minhas inseguranças, celebrar cada conquista e permanecer firme ao meu lado quando o cansaço falava mais alto. Seu amor foi combustível, sua presença foi sustento e sua confiança em mim deu sentido a cada passo. Nada disso teria sido possível sem você, sem o seu amor e cuidado.

Aos meus amigos de faculdade, que dividiram comigo noites longas, dúvidas, cansaços, trabalhos, risadas, angústias e sonhos, e que se tornaram o melhor presente que a graduação me deu. Obrigada pela parceria, pela escuta, pelo apoio mútuo e por transformarem essa jornada acadêmica em um caminho mais leve e humano. Nada teria sido igual sem vocês.

Ao meu orientador, pela paciência, pela escuta atenta e pela condução sensível ao longo deste trabalho. Seus ensinamentos, dedicação e partilha de conhecimento foram decisivos para minha formação acadêmica e científica. Aos demais docentes e profissionais que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha trajetória, deixo meu sincero reconhecimento e gratidão.

Por fim, a todos que cruzaram meu caminho e, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade. Que este trabalho não represente apenas a conclusão de uma etapa, mas seja reflexo de uma construção coletiva, marcada por apoio, afeto e esforço.



EPÍGRAFE

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são”

(Aristóteles)



RESUMO

A contaminação de ambientes aquáticos por metais potencialmente tóxicos, frequentemente associada às atividades antrópicas, representa um problema relevante de ordem ambiental e de saúde pública, especialmente em regiões onde o consumo de pescado constitui uma importante fonte alimentar para a população. Objetivou-se avaliar o acúmulo de metais potencialmente tóxicos em *Hemiodus unimaculatus* da porção final do médio curso da bacia do rio Tocantins, bem como estimar os riscos à saúde humana decorrentes do consumo dessa espécie amplamente explorada pela pesca regional. A metodologia incluiu a coleta de 14 exemplares de *H. unimaculatus*, nos quais foram analisadas amostras de brânquias, fígado e músculo. As concentrações de cromo (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg), níquel (Ni), chumbo (Pb), zinco (Zn), arsênio (As) e alumínio (Al) foram determinadas por espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES). Para a avaliação dos riscos à saúde humana foram estimados parâmetros como a ingestão diária estimada (EDI), o quociente de risco não carcinogênico (HQ) e o índice de risco (HI), considerando diferentes cenários de consumo. Os dados obtidos foram organizados e analisados por meio de estatística descritiva, sendo apresentados em tabelas e gráficos. Os resultados revelaram a presença de todos os metais analisados nos tecidos dos peixes, com distribuição heterogênea, destacando-se maiores concentrações nas brânquias e no fígado, órgãos diretamente relacionados aos processos de respiração, metabolismo e detoxificação. No tecido muscular, destinado ao consumo humano, foram observadas concentrações médias de Hg, Pb e As superiores aos limites máximos estabelecidos por legislações nacionais e internacionais. A avaliação de risco indicou valores de HQ e HI superiores a 1 para Al, As e Hg, especialmente em cenários de consumo frequente, sugerindo potencial risco à saúde dos consumidores. Esses riscos são particularmente relevantes para populações ribeirinhas e consumidores habituais de pescado, que apresentam maior exposição aos contaminantes. Diante do exposto, evidencia-se a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade ambiental e do pescado, bem como a implementação de diretrizes de consumo, medidas de biossegurança na atividade pesqueira e ações de educação em saúde. Assim, os resultados obtidos subsidiam a formulação de políticas públicas voltadas à segurança alimentar, à conservação dos recursos pesqueiros e à proteção da saúde humana, estando em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) e o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar).

Palavras-chave: Bioacumulação; Metais potencialmente tóxicos; Avaliação de risco à saúde; Pescado; Rio Tocantins.



ABSTRACT

The contamination of aquatic environments by potentially toxic metals, often associated with anthropogenic activities, represents a relevant environmental and public health problem, especially in regions where fish consumption constitutes an important food source for the population. This study aimed to evaluate the accumulation of potentially toxic metals in *Hemiodus unimaculatus* from the final stretch of the middle course of the Tocantins River basin, as well as to estimate the risks to human health resulting from the consumption of this species, which is widely exploited by regional fisheries. The methodology included the collection of 14 specimens of *H. unimaculatus*, from which gill, liver, and muscle samples were analyzed. The concentrations of chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb), zinc (Zn), arsenic (As), and aluminum (Al) were determined using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). To assess risks to human health, parameters such as estimated daily intake (EDI), non-carcinogenic hazard quotient (HQ), and hazard index (HI) were calculated, considering different consumption scenarios. The obtained data were organized and analyzed using descriptive statistics and presented in tables and graphs. The results revealed the presence of all analyzed metals in fish tissues, with a heterogeneous distribution, with higher concentrations generally observed in the gills and liver, organs directly related to respiration, metabolism, and detoxification processes. In muscle tissue, intended for human consumption, mean concentrations of Hg, Pb, and As exceeded the maximum limits established by national and international regulations. Risk assessment indicated HQ and HI values greater than 1 for Al, As, and Hg, particularly under frequent consumption scenarios, suggesting a potential risk to consumer health. These risks are especially relevant for riverine populations and habitual fish consumers, who are more highly exposed to contaminants. In view of these findings, the need for continuous monitoring of environmental quality and fish products is evident, as well as the implementation of consumption guidelines, biosafety measures in fishing activities, and health education actions. Thus, the results support the formulation of public policies aimed at food safety, conservation of fishery resources, and protection of human health, in line with the Sustainable Development Goals, particularly SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture) and SDG 3 (Good Health and Well-Being).

Keywords: Bioaccumulation; Potentially toxic metals; Human health risk assessment; Fish; Tocantins River.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista lateral da jatuarana escama grossa <i>Hemiodus unimaculatus</i> (Bloch, 1794) (Characiformes, Hemiodontidae)	24
Figura 2. Localização da área de estudo e dos pontos de amostragem no rio Tocantins, nos municípios de Estreito e Governador Edson Lobão, Maranhão, Brasil	26
Figura 3. Mapa de calor das concentrações médias (mg/kg) de metais por tecido analisado	33
Figura 4. Distribuição das concentrações de metais (mg/kg) nos tecidos, representada por <i>boxplots</i>	34



LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites máximos permitidos de metais em pescado segundo a legislação brasileira, Codex Alimentarius e União Europeia	23
Tabela 2. Valores de RfD e CSF utilizados na avaliação de risco à saúde humana	28
Tabela 3. Concentração média (mg/kg) e desvio padrão (DP) de metais nos tecidos (músculo, fígado e brânquias) de <i>Hemiodus unimaculatus</i> coletados no rio Tocantins, Maranhão	30
Tabela 4. Comparação entre as concentrações médias de metais no músculo de <i>H. unimaculatus</i> (mg/kg) e os limites máximos permitidos pela legislação brasileira	35
Tabela 5. Valores médios e desvios padrão de EDI, HQ e LCR para os metais analisados	37
Tabela 6. Valores de HI estimados para as amostras analisadas	39



LISTA DE SIGLAS

MP – Metais Pesados

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

ROS – Reactive Oxygen Species

ARS – Avaliação de Risco à Saúde

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency

IGS – Índice Gonadossomático

CRs – Cancer Risks

HQ – Hazard Quotient

HI – Hazard Index

THQ – Target Hazard Quotient

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

LMT – Limites Máximos Tolerados

FAO – Food and Agriculture Organization

OMS – Organização Mundial da Saúde

POF – Pesquisa de Orçamentos Familiares

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

UHE – Usina Hidrelétrica

EDI – Estimated Daily Intake

LCR – Lifetime Cancer Risk

ICP-AES – Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado

RfD – Reference Dose

IRIS – Integrated Risk Information System

CSF – Cancer Slope Factor

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Metais no ambiente aquático: Fontes, comportamento e toxicidade	15
2.2 Mecanismos de bioacumulação em organismos aquáticos.....	16
2.3 Toxicidade dos metais em peixes	19
2.4 Riscos à saúde humana associados ao consumo de pescado contaminado	20
2.5 Legislação e Limites Máximos Permitidos para metais em alimentos.....	21
2.6 Características biológicas e ecológicas de <i>Hemiodus unimaculatus</i> (Bloch, 1794)..	23
3 OBJETIVOS	24
3.1 Objetivo Geral.....	24
3.2 Objetivos Específicos	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 Área de estudo.....	25
4.2 Plano de amostragem e coleta.....	26
4.3 Procedimentos de processamento das amostras e análise de dados.....	26
4.4 Tabulação dos dados.....	27
4.5 Avaliação de risco à saúde.....	27
4.5.1 Avaliação da exposição	27
4.5.2 Risco não carcinogênico.....	28
4.5.3 Avaliação do risco carcinogênico	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Concentração e distribuição de metais nos tecidos de <i>Hemiodus unimaculatus</i>	29
5.2 Comparação com limites legais para consumo humano	34
5.3 Avaliação integrada do risco à saúde humana associado ao consumo do pescado.	36
6 CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A água é essencial para a existência e o bem-estar do ser humano, devendo estar disponível em quantidade suficiente e em adequada qualidade, como garantia para a manutenção da vida (Freitas *et al.*, 2002). De acordo com Silva (2016), estas duas características estão intimamente ligadas, uma vez que a qualidade da água depende da quantidade de água existente para dissolver, diluir e transportar substâncias benéficas e maléficas para os seres que dela fazem uso.

A contaminação da água por metais pesados (MPs) é foco de grande preocupação por provocar sérios danos ao meio ambiente e à saúde de quem a consome (Ferraz *et al.*, 2018). De acordo com Siegel (2002) e Tuna *et al.* (2004), os MPs são contaminantes ambientais estáveis e persistentes, uma vez que não podem ser degradados e, dependendo das características físicas e químicas do ambiente aquático, podem reagir, dispersar-se ou ser mobilizados e depositados nos sedimentos, constituindo um perigo potencial devido à biodisponibilidade que podem adquirir.

Em virtude de suas propriedades, não são biodegradáveis; eles podem ser absorvidos no interior das células dos organismos, por difusão a partir do meio aquoso ou ao serem ingeridos ou inalados, podendo resultar na sua acumulação na célula, fenômeno denominado bioacumulação (Sharma *et al.*, 2022). Em ambientes aquáticos, os peixes podem acumular, ao longo de vários anos, os poluentes presentes no meio circundante em seus tecidos (Salaah; Zanaty; El-Naggar, 2022).

A presença de metais tóxicos em peixes indica potencial risco de contaminação humana associado ao consumo dos mesmos (Porto & Ethur, 2009), uma vez que, os peixes, especialmente as espécies pelágicas, são amplamente consumidos em razão de seu elevado valor nutricional, caracterizado pelo alto teor proteico, baixos níveis de gordura saturada e pela presença de ácidos graxos ômega (Maulu *et al.*, 2021). Nesse contexto, o monitoramento da presença de metais em peixes destinados ao consumo humano torna-se essencial para a avaliação da segurança alimentar e para a proteção da saúde pública.

A sub-bacia Manoel Alves Grande, também denominada sub-bacia 23 ou médio Tocantins, encontra-se situada no curso médio do rio Tocantins. A expansão das áreas agrícolas e o crescimento dos agrupamentos urbanos, cujos efluentes na maioria dos casos têm como destino o rio Tocantins ou seus afluentes, são fatores promotores de alterações na distribuição de metais neste trecho do rio. Ademais, nessa região, a pesca artesanal representa uma importante atividade socioeconômica, tornando relevante a avaliação da qualidade ambiental e

da segurança do pescado consumido pela população local. Dentre as espécies que compõem a ictiofauna da região, *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) apresenta ampla distribuição e potencial de consumo, justificando sua seleção como organismo modelo para a avaliação da bioacumulação de metais.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar a bioacumulação de metais nas brânquias, no fígado e no músculo de *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) na região final do médio curso do rio Tocantins, Maranhão, bem como verificar os potenciais riscos à saúde humana associados ao consumo dessa espécie.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Metais no ambiente aquático: Fontes, comportamento e toxicidade

Os metais pesados constituem um grupo de elementos caracterizados por elevada densidade e, principalmente, por propriedades químicas que conferem potencial toxicidade aos organismos (Santos *et al.*, 2018). A introdução desses elementos em águas e sedimentos ocorre tanto por processos naturais, como intemperismo e erosão, quanto por atividades antrópicas, destacando-se a industrialização e o avanço da agricultura, especialmente a partir do século XX (Baggio, 2008).

Diversos organismos necessitam de pequenas quantidades de determinados metais, como cobalto, cobre, manganês, molibdênio, vanádio, estrôncio e zinco, que desempenham funções fisiológicas essenciais. Entretanto, concentrações elevadas desses elementos podem tornar-se tóxicas. Outros metais, como mercúrio, chumbo e cádmio, não possuem função biológica conhecida e podem causar graves doenças quando acumulados, especialmente em mamíferos (Mello, 2011). A toxicidade dos metais está intimamente associada aos processos de bioacumulação e biomagnificação, que refletem a capacidade desses contaminantes de se acumularem nos tecidos dos organismos e de aumentarem progressivamente de concentração ao longo da cadeia alimentar. Dessa forma, indivíduos localizados em níveis tróficos superiores, como o ser humano, tendem a ser mais severamente impactados pela exposição a metais, cuja toxicidade é influenciada pelo tempo de permanência e pela meia-vida biológica (Ribeiro, 2010).

Estima-se que 59 elementos da tabela periódica possam ser classificados como MPs e apresentem potencial toxicidade (Ribeiro, 2010). Desses, 17 são considerados altamente tóxicos: arsênio (As), cobalto (Co), bismuto (Bi), níquel (Ni), cobre (Cu), zinco (Zn), estanho (Sn), selênio (Se), telúrio (Te), paládio (Pd), prata (Ag), cádmio (Cd), platina (Pt), mercúrio

(Hg), talio (Tl), chumbo (Pb) e antimônio (Sb), estando presentes em concentrações que podem representar risco ambiental. Entre eles, nove (Ag, As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb e Zn) são mobilizados em níveis muito superiores aos processos naturais devido à ação humana (Novotny, 1995).

As atividades agrícolas representam uma das principais fontes não pontuais de contaminação por metais, especialmente devido ao uso intensivo de fertilizantes e defensivos agrícolas, os quais podem conter resíduos metálicos, como Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Mn e Cr. Após a aplicação no solo, esses compostos podem atingir os corpos d'água por escoamento superficial, lixiviação ou percolação até os lençóis freáticos (Arias *et al.*, 2007; Martins *et al.*, 2018). A distribuição dos metais na água é influenciada por fenômenos físico-químicos, como complexação, adsorção e precipitação, e pode ser transportada para outros ambientes dependendo das condições do ambiente, como pH e matéria orgânica (Rebouças, 2003).

Uma vez introduzidos no ambiente aquático, metais e metaloides podem sofrer transformações físico-químicas que determinam sua mobilidade e biodisponibilidade. Eles podem ocorrer como íons livres hidratados, complexados a compostos orgânicos e inorgânicos, adsorvidos a partículas em suspensão ou incorporados à biota (Buffle, 1991 *apud* Gontijo *et al.*, 2017). De acordo com Mozeto (2001 *apud* Ribeiro, 2010), contaminantes associados ao sedimento podem continuar impactando a biota mesmo quando a coluna d'água apresenta concentrações dentro dos limites legais, evidenciando o papel dos sedimentos como reservatório de poluentes e fonte de contaminação secundária. Isso representa risco contínuo à biota, especialmente em ambientes sujeitos a perturbações hidrodinâmicas, como enchentes ou operações de barragens.

A contaminação por MPs permanece como um desafio ambiental relevante no Brasil, agravada pela ausência histórica de políticas de controle, pela ocupação desordenada de áreas ripárias e pelo manejo inadequado de resíduos industriais (Baggio, 2008). A legislação brasileira estabelece limites para metais em água, sedimento e biota (CONAMA 357/2005; CONAMA 454/2012), porém, na prática, muitos corpos d'água apresentam concentrações acima das recomendadas, especialmente em regiões sob pressão industrial e mineradora.

2.2 Mecanismos de bioacumulação em organismos aquáticos

A utilização de animais como bioindicadores constitui uma ferramenta extremamente útil na detecção de contaminantes e avaliação de impactos ambientais decorrentes de descargas de poluentes na biota aquática (Pereira; Santos; Sanches Filho, 2019). Entre os diferentes bioindicadores, os peixes representam um parâmetro particularmente eficaz para

indicar o estado real de qualidade de um sistema aquático, o qual não pode ser considerado satisfatório na ausência da presença e da adequada proliferação dessas espécies (Souza, 2001). A capacidade que possuem de absorver e acumular determinados metais, como As, Fe, Zn, Pb, Cu e Cd, em seus tecidos musculares e órgãos caracteriza os peixes como importantes indicadores biológicos de contaminação por metais pesados (Hassan *et al.*, 2018).

Zhou *et al.* (2008) ressaltam que os peixes recebem considerável atenção em programas de biomonitoramento da poluição hídrica devido a características biológicas intrínsecas relevantes, entre as quais se destacam: (a) tamanho relativamente grande, (b) ciclo de vida prolongado e (c) facilidade de crescimento. Além disso, os autores enfatizam que os peixes ocupam posição privilegiada na cadeia alimentar aquática e podem influenciar diretamente a saúde humana, o que reforça ainda mais sua importância como organismos biomonitoradores (Sáenz Isla, 2016).

A bioacumulação é compreendida como o acúmulo de contaminantes ao longo da vida de um organismo, de modo que a concentração desses elementos tende a aumentar proporcionalmente à sua idade e, no caso dos peixes, ao incremento de seu comprimento (Pouilly *et al.*, 2012). Essa bioacumulação resulta da interação entre os processos de absorção, biotransformação, armazenamento e excreção (Monteiro, 2022), ocorrendo quando os mecanismos de biotransformação e/ou excreção são mais lentos que os processos de ingestão e armazenamento (Ferreira, 2025). A biomagnificação, por sua vez, refere-se à transferência e amplificação de contaminantes ao longo da cadeia trófica, na qual espécies situadas em níveis tróficos superiores apresentam concentrações mais elevadas desses elementos (Di Benedetto *et al.*, 2013). Assim, ambos os fenômenos reforçam o uso dos peixes como indicadores biológicos para avaliar a qualidade ambiental de recursos hídricos.

A acumulação de metais em peixes é influenciada por diversos fatores, incluindo a localização geográfica, o comportamento alimentar, o nível trófico ocupado, a idade, o tamanho, o tempo de exposição aos metais e os mecanismos de regulação homeostática da espécie (Shankar *et al.*, 2006). Além desses aspectos, outros elementos ambientais também interferem no acúmulo de metais, como variações sazonais, concentração de oxigênio dissolvido, pH, temperatura e salinidade (Ozmen *et al.*, 2006; Pavanello *et al.*, 2019).

Os metais pesados entram nos peixes por absorção direta da água através das brânquias e da pele ou pela ingestão de alimentos contaminados (Hassan *et al.*, 2018). Uma vez absorvidos, esses metais são transportados pela circulação sanguínea, onde se ligam às proteínas plasmáticas e são distribuídos para diferentes órgãos e tecidos. Tendem a se concentrar preferencialmente em tecidos altamente perfundidos, como fígado, baço e rins, nos quais podem

se acumular em distintos níveis (Authman *et al.*, 2015). Nesses órgãos, os metais associam-se às estruturas celulares, e determinados íons metálicos ligam-se às metalotioneínas, acumulando-se em lipofuscinas ou em grânulos amorfos. Esse processo influencia a distribuição desses elementos no organismo e afeta sua biodisponibilidade no interior das células (Türkmen *et al.*, 2009), diminuindo sua liberação pelo organismo e permitindo que atinjam concentrações até mil vezes superiores às do ambiente (Lima Junior *et al.*, 2002).

Segundo Chambo (2011), as metalotioneínas são proteínas de baixa massa molecular que exercem um papel essencial na homeostase de metais como Zn e Cu, entre outros. O autor destaca que sua síntese é intensificada quando o organismo é exposto a concentrações elevadas de metais para os quais apresentam grande afinidade. Além disso, tanto as metalotioneínas quanto os lisossomos participam do acúmulo desses elementos e são encontradas em maior abundância nos tecidos parenquimatosos responsáveis pelos processos de captação, armazenamento e excreção metálica. A exposição crônica a metais pesados promove o aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical superóxido (O_2^-) e radical hidroxila (OH^-). Esse aumento pode desencadear estresse oxidativo, resultando em peroxidação lipídica, danos ao DNA e oxidação de moléculas presentes em membranas biológicas e tecidos (Ruttkay-Nedecky *et al.*, 2013; Savassi, 2019).

O contato direto das brânquias com o ambiente aquático a torna um órgão indicador no que diz respeito à contaminação ambiental, sendo particularmente sensíveis à presença de contaminantes no meio e os primeiros a reagir às condições desfavoráveis de um ambiente (Barreto, 2007). Devido à ampla superfície de contato e à fina camada de células que as separa da corrente sanguínea, fatores que reduzem a distância de difusão, as brânquias constituem a principal via de entrada de metais em peixes (Sáenz Isla, 2016). Conforme destacado por Moreira (2015), esse tecido é considerado um dos mais eficientes mecanismos de excreção de metais provenientes do metabolismo, em função de sua elevada área de contato e de sua intensa participação na troca de íons entre o meio externo e a circulação sanguínea (osmoregulação).

O fígado também é um órgão alvo destes elementos, pois participa intensamente do metabolismo animal promovendo a síntese e detoxicação do metabolismo (Chambo, 2011). Os metais podem, ainda, acumular-se em diversos tecidos, incluindo o músculo, que atua como local final de estocagem quando os processos de excreção via rins ou brânquias dos poluentes biotransformados não são plenamente eficazes; por esse motivo, espera-se que o tecido muscular apresente menor bioacumulação de metais em comparação com outros tecidos (Sáenz Isla, 2016). Dessa forma, o estudo de metais pesados em peixes pode ser delimitado por meio da análise das brânquias, da musculatura e das vísceras.

2.3 Toxicidade dos metais em peixes

Os peixes, por ocuparem diferentes níveis tróficos nas teias alimentares aquáticas e manterem interação direta e contínua com a água e o sedimento, são altamente suscetíveis à contaminação por metais pesados, o que os torna bioindicadores confiáveis da qualidade ambiental (Tenji *et al.*, 2020). Dessa maneira, o equilíbrio entre os processos de absorção e eliminação de metais pesados é essencial para a manutenção da saúde dos peixes; contudo, quando expostos a elevadas concentrações desses elementos, os organismos tornam-se mais suscetíveis ao estresse, demandando maior dispêndio energético para sua compensação (Zahran *et al.*, 2025). Entretanto, esses mecanismos podem ser excedidos, resultando na sobrecarga do organismo, o que compromete os processos de desintoxicação e, conseqüentemente, leva ao desenvolvimento de toxicidade (Jasim *et al.*, 2016).

O acúmulo de MPs em peixes acarreta múltiplas alterações na saúde e no funcionamento fisiológico desses organismos (Huang *et al.*, 2023). Embora certos metais sejam essenciais para a sobrevivência dos organismos vivos, a maioria deles representa um grande perigo, mesmo em quantidades mínimas (Ray & Vashishth, 2024). Além disso, diversos metais, tais como As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Ni, Se e Zn, apresentam elevado potencial tóxico (Emon *et al.*, 2023). Por exemplo, o Zn é um micronutriente essencial que exerce papel relevante no crescimento e na reprodução dos peixes; entretanto, em concentrações elevadas, o excesso de Zn provoca diversos efeitos adversos, comprometendo o crescimento, a reprodução, a homeostase, a ingestão alimentar e a formação óssea desses organismos (Gupta *et al.*, 2021; Emon *et al.*, 2023).

Conforme Ray e Vashishth (2024) a gravidade da toxicidade dos metais, incluindo seus efeitos carcinogênicos, teratogênicos e mutagênicos, varia de forma significativa em função de diversos fatores, como a espécie de peixe, a concentração dos agentes tóxicos e o tempo de exposição. Os autores também destacam que a toxicidade mediada por metais compromete o sistema nervoso dos peixes, prejudicando a capacidade de resposta a estímulos ambientais e a interação desses organismos com o meio.

Além disso, a contaminação por metais afeta negativamente o crescimento e a atividade reprodutiva dos peixes, resultando na redução do IGS, da fecundidade, das taxas de fertilização e de eclosão (Gupta *et al.*, 2021). Adicionalmente, a toxicidade desses metais compromete o crescimento e o desenvolvimento normais de embriões e larvas de peixes (Taslina *et al.*, 2022). Conforme destacado por Monteiro, Rantin e Kalinin (2013), determinados metais podem ainda reduzir a plasticidade das respostas cardiorrespiratórias, diminuindo as chances de

sobrevivência dos peixes sob condições de hipóxia, situação frequentemente observada em seus habitats naturais.

Assim, o aumento da entrada de MPs nos ambientes aquáticos pode resultar em altos níveis de acumulação destes contaminantes nos peixes e seus consumidores, representando um risco para os ecossistemas e para a saúde humana (Arantes *et al.*, 2016). Dessa forma, a presença de metais em organismos aquáticos não representa apenas um risco ecológico, mas também um potencial problema de saúde pública, uma vez que o consumo de pescado constitui uma das principais vias de exposição humana a esses contaminantes.

2.4 Riscos à saúde humana associados ao consumo de pescado contaminado

Os metais pesados podem penetrar no organismo por meio da inalação de ar contaminado, da ingestão de água e alimentos contaminados, bem como pelo contato dérmico com superfícies poluídas (Al Osman; Yang; Massey, 2019). Os peixes e outros organismos aquáticos que bioacumulam os contaminantes podem expor outros animais, incluindo humanos, que os utilizam como fonte de alimento (Ray & Vashishth, 2024). O consumo de peixes contaminados por MPs pode causar sérios problemas de saúde (Salaah; El-Khayat; Gaber, 2025).

A concentração de metais nos organismos está diretamente relacionada ao tempo de exposição, à dose recebida, à forma química e física do elemento, bem como à via de ingestão pelo indivíduo (Angheben, 2020). Os efeitos tóxicos dos metais pesados manifestam-se em função da dose ingerida e podem se disseminar por todo o organismo, afetando diversos órgãos e modificando processos bioquímicos, além de comprometerem organelas e membranas celulares (Campos & Nakano, 2017).

Danos neurológicos, doenças cardiovasculares, disfunção renal, hepatotoxicidade, problemas respiratórios e distúrbios reprodutivos estão entre os problemas de saúde associados à toxicidade dos MPs (Järup, 2003; Ray & Vashishth, 2024). A exposição prolongada também pode provocar doenças neurológicas, musculares e sistêmicas em humanos, incluindo Parkinson, Alzheimer e esclerose múltipla (Ray & Vashishth, 2024). Além disso, muitas pessoas desenvolvem reações alérgicas, e a exposição contínua a determinados metais apresenta potencial carcinogênico (Kotte *et al.*, 2015). Acredita-se que pessoas idosas e crianças sejam mais susceptíveis às substâncias tóxicas (Corrêa, 2014).

A ARS proposta pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) é uma ferramenta valiosa que oferece uma metodologia abrangente para avaliar os potenciais riscos à saúde associados à exposição a contaminantes químicos específicos (Mustatea &

Ungureanu, 2024). Essa abordagem envolve a avaliação de diversos parâmetros, incluindo a dose de exposição e a análise de riscos não carcinogênicos e carcinogênicos (CRs). A avaliação de risco não carcinogênico estima a probabilidade de ocorrência de efeitos adversos à saúde decorrentes da exposição a um determinado contaminante dentro de um período específico, utilizando indicadores como o quociente de risco (HQ) e o índice de risco (HI) ou quociente de risco total (THQ) (Mustatea & Ungureanu, 2024). Por sua vez, o risco carcinogênico (CR) avalia a probabilidade de um indivíduo desenvolver um tipo de câncer ao longo da vida após a exposição a um agente potencialmente carcinogênico (Osae *et al.*, 2023).

Dessa maneira, a avaliação do consumo seguro de pescado depende do monitoramento contínuo das concentrações de metais, aliado à aplicação de limites regulamentares, visando à proteção da população e à mitigação dos impactos sobre a saúde pública.

2.5 Legislação e Limites Máximos Permitidos para metais em alimentos

A proteção da saúde humana frente à exposição a metais pesados em ambientes aquáticos e alimentos depende da integração entre normas ambientais e sanitárias. No Brasil, a qualidade das águas superficiais é regulamentada principalmente pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005, que estabelece a classificação dos corpos d'água, os usos preponderantes e os padrões de qualidade ambiental, além de definir limites para o lançamento de efluentes (Brasil, 2005). Complementarmente, outras resoluções do CONAMA, como a nº 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, e a nº 454/2012, relacionada ao gerenciamento de sedimentos de dragagem, contribuem para o controle de fontes pontuais e difusas de poluição, reduzindo o risco de contaminação dos ecossistemas aquáticos e, conseqüentemente, do pescado destinado ao consumo humano (Brasil, 2011; 2012).

No que se refere à segurança alimentar, a ANVISA é o órgão responsável por estabelecer os limites máximos tolerados de contaminantes em alimentos. Em 2022, a ANVISA publicou a Resolução RDC nº 722/2022 e a Instrução Normativa nº 160/2022, que consolidam e atualizam os LMT para contaminantes químicos, incluindo metais pesados, em diferentes categorias de alimentos, entre elas o pescado (Brasil, 2022a; 2022b). Essas normas estabelecem valores de referência para elementos como arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio, considerando o tipo de alimento, a espécie e a forma de apresentação do produto (inteiro, eviscerado ou processado). Todavia, a referida Instrução Normativa não estabelece limites máximos para cobre, níquel e zinco, sendo esses parâmetros ainda contemplados pela Instrução Normativa nº

88/2021 e o Decreto nº 55.871, de 26 de março de 1965 (Brasil, 1965; 2021; Gomes *et al.*, 2024).

Esses instrumentos regulatórios são fundamentais para a avaliação da conformidade sanitária do pescado comercializado no país e para a proteção da saúde da população, uma vez que o consumo de peixes contaminados representa uma das principais vias de exposição humana aos metais pesados. A legislação brasileira está alinhada a diretrizes internacionais amplamente reconhecidas, como as do Codex Alimentarius, programa conjunto da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) e da OMS, que estabelece níveis máximos de contaminantes em alimentos com base em evidências científicas e avaliações de risco (Codex Alimentarius, 1995).

No contexto internacional, destaca-se também a legislação da União Europeia, especialmente o Regulamento (UE) 2023/915, que consolida os níveis máximos permitidos para diversos contaminantes em alimentos, incluindo metais pesados em pescado (União Europeia, 2023). Esses regulamentos são frequentemente utilizados como referência comparativa em estudos científicos e avaliações de risco, permitindo a análise da adequação dos padrões nacionais frente a critérios internacionais mais restritivos ou atualizados. Nesse contexto, a Tabela 1 sintetiza os valores de referência adotados no Brasil, no âmbito da ANVISA e do Decreto nº 55.871/1965, bem como aqueles estabelecidos por organismos internacionais, como o Codex Alimentarius e a União Europeia.

A relevância dessas normas torna-se ainda mais evidente quando se considera o consumo de pescado no Brasil. Dados da POF 2017–2018, conduzida pelo IBGE, indicam que o consumo médio domiciliar per capita anual de pescados no Brasil foi de 5,66 kg nesse período. Observa-se que domicílios localizados em áreas rurais apresentaram consumo médio anual per capita de 12,08 kg, valor superior ao dobro daquele registrado em domicílios situados em áreas urbanas (4,56 kg). Sob a perspectiva regional, os maiores níveis de consumo foram observados na região Norte, com média de 17,70 kg anuais per capita, seguida pelas regiões Nordeste (8,25 kg), Centro-Oeste (3,69 kg), Sul (3,36 kg) e Sudeste (2,73 kg), respectivamente (IBGE, 2019; Wagner; Coelho; Travassos, 2023).

Tabela 1. Limites máximos permitidos de metais em pescado segundo a legislação brasileira, Codex Alimentarius e União Europeia.

Metal	Brasil (ANVISA / Decreto nº 55.871/1965)	Codex Alimentarius	União Europeia – Reg. (UE) 2023/915
Hg	0,5 mg/kg (peixes em geral) 1,0 mg/kg (espécies predadoras)	0,5 mg/kg (peixes) 1,0 mg/kg (espécies predadoras)	0,5 mg/kg (peixes) até 1,0 mg/kg (espécies específicas)
Pb	0,30 mg/kg	0,30 mg/kg	0,30 mg/kg
Cu	30 mg/kg	-	-
Cr	0,10 mg/kg	-	-
Ni	5,0 mg/kg	-	-
Zn	50 mg/kg	-	-
As	1,00 mg/kg	-	-
Al	-	-	-

Fonte: Brasil (1965; 2021; 2022a; 2022b); Codex Alimentarius (1995); União Europeia (2023).

2.6 Características biológicas e ecológicas de *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794)

Hemiodus unimaculatus pertence à ordem Characiformes, considerada uma das mais representativas entre os peixes de água doce da América do Sul, abrangendo espécies com hábitos alimentares variados, incluindo formas herbívoras, onívoras, iliófagas e carnívoras (Santos Filho, 2016). A espécie integra a família Hemiodontidae, a qual é composta por cinco gêneros e cerca de 33 espécies distribuídas amplamente pela América do Sul. Essa família ocorre em diversas bacias hidrográficas importantes, como as dos rios Amazonas, Tocantins, Capim, Amapá, Mearim, Parnaíba, Itapecuru, Oiapoque, além dos sistemas fluviais do Suriname, Guiana Francesa, Orinoco e Paraná–Paraguai (Langeani-Neto, 1996; Reis *et al.*, 2003). São conhecidos popularmente como voadores, ubaranas, jatuaranas, piaus-banana e cruzeiros-do-sul (Maquiaveli, 2006).

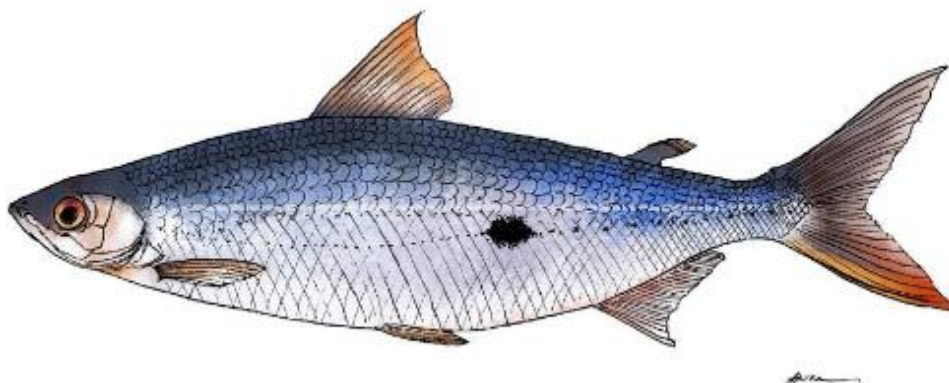
O gênero *Hemiodus*, descrito por Müller (1842), é o mais representativo da subfamília Hemiodontinae, reunindo cerca de 20 espécies, o maior número dentro da família Hemiodontidae (Langeani, 1999; Maquiaveli, 2006). Entre elas, destaca-se *H. Unimaculatus* (Bloch, 1794), conhecida como jatuarana-escama-grossa, um peixe de hábito alimentar onívoro, frequentemente encontrado nas margens de rios e lagos. A espécie apresenta desova parcelada e atinge a primeira maturação sexual por volta dos 13 cm de comprimento (Santos; Mérona; Juras & Jégu, 2004).

Segundo Santos Filho (2016), *H. unimaculatus* apresenta hábito alimentar iliófago-detritívoro, com tendência à onivoria; trata-se de uma espécie com estratégia alimentar generalista, embora haja predominância de itens como fitoplâncton e detrito. Estudos realizados no rio Tocantins, no trecho entre Imperatriz e Estreito, indicam que variou de iliófaga para herbívora ao longo do ano (Braga, 1990).

O *Hemiodus unimaculatus* possui corpo alongado, fusiforme e roliço, lembrando o formato de um torpedo, revestido por pequenas escamas, sendo as escamas dorsais menores que as da região ventral (Figura 1). Apresenta olhos grandes e boca pequena, dotada de dentes multicuspidados pouco desenvolvidos na maxila superior. Sua coloração é uniformemente cinza-prateada (Santos Filho, 2016). A espécie ocorre amplamente em todas as bacias hidrográficas da Amazônia brasileira. No rio Tocantins, especialmente na área de influência do reservatório da UHE Tucuruí (entre Marabá e Limoeiro do Ajurú), destaca-se como um dos principais recursos pesqueiros desembarcados na região (Cintra *et al.*, 2013).

Braga (1990) descreve que o período reprodutivo de *H. unimaculatus* ocorre de outubro a fevereiro-março, fase em que se observa redução da atividade alimentar e acúmulo de gordura visceral. Santos, Jégu & Mérona (1984) registraram que, no rio Tocantins, a espécie realiza desova anual entre novembro e março. Já Trindade (2012) constatou que, no rio Araguari, no estado do Amapá, a desova de *H. unimaculatus* ocorreu entre novembro de 2009 e janeiro de 2010.

Figura 1. Vista lateral da jatuarana escama grossa *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) (Characiformes, Hemiodontidae)



Fonte: Adaptado de Cintra *et al.* (2013). Ilustração: A. A. Inada.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar a bioacumulação de metais nas brânquias, fígado e músculo de *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) na região final do médio curso do rio Tocantins, Maranhão, Brasil, bem como verificar os potenciais riscos à saúde humana associados ao consumo dessa espécie.

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar as concentrações de metais nas brânquias, no fígado e no músculo dos peixes coletados;
- Comparar os níveis de metais entre os diferentes tecidos analisados (brânquias, fígado e músculo);
- Comparar os resultados das concentrações de metais encontrados no músculo com os limites máximos permitidos pela legislação brasileira para contaminantes em alimentos;
- Calcular indicadores de risco à saúde humana, incluindo ingestão diária estimada (EDI), quociente de risco (HQ), índice de risco (HI), e risco carcinogênico ao longo da vida (LCR), considerando o consumo do pescado pela população local.

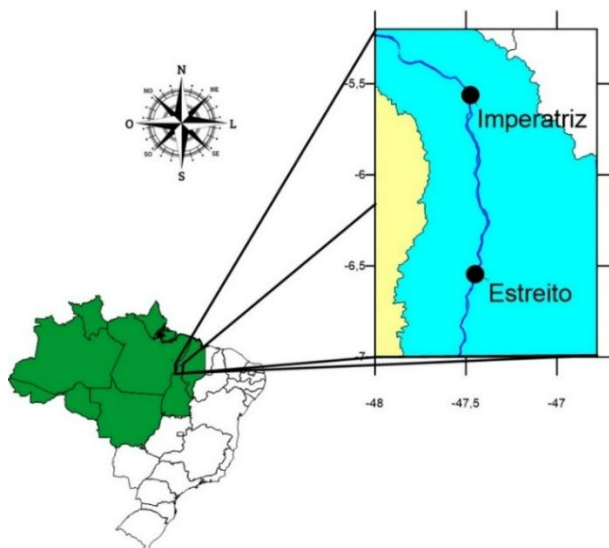
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia tem uma configuração alongada e está localizada inteiramente no território brasileiro, com 938.368 km² (IBGE, 2021), cerca de 11% do território brasileiro, abrangendo os estados de Goiás (21,4%), Tocantins (30,2%), Pará (30,3%), Maranhão (3,3%), Mato Grosso (14,7%) e Distrito Federal (0,1%) (Obeso, 2023). Onde o trecho médio do rio Tocantins é constituído pelas sub-bacias 22 e 23. A sub-bacia 23, denominada Manoel Alves Grande, drena uma área aproximada de 83.000 km², abrangendo 78 municípios dos estados do Tocantins, Maranhão e Pará. A porção final dessa sub-bacia é conhecida como Bico do Papagaio e ocupa a região norte do estado do Tocantins, onde ocorre a confluência dos rios Tocantins e Araguaia, estando inserida na porção inicial da Amazônia Legal brasileira (Barbosa; Carvalho; Silva, 2024).

É nesse contexto hidrográfico que se localizam as áreas de amostragem do presente estudo, situadas na seção terminal do médio curso do rio Tocantins, conforme ilustrado no mapa da área de estudo (Figura 2). As coletas foram realizadas em duas localidades distintas: no reservatório da UHE Estreito, situado a jusante do município de Estreito (MA), e no trecho fluvial do rio Tocantins correspondente ao município de Governador Edson Lobão (MA), próximo à cidade de Imperatriz. Essas áreas estão inseridas em um setor do rio caracterizado por intensa intervenção antrópica, associada principalmente à implantação de empreendimentos hidrelétricos, atividades urbanas e práticas de pesca artesanal e profissional.

Figura 2. Localização da área de estudo e dos pontos de amostragem no rio Tocantins, nos municípios de Estreito e Governador Edson Lobão, Maranhão, Brasil.



Fonte: Autora, 2025.

A escolha desses pontos de amostragem justifica-se por sua relevância ecológica e socioeconômica. Além disso, trata-se de regiões onde o consumo de pescado é frequente, o que reforça a importância do monitoramento ambiental e biológico para a compreensão dos potenciais riscos associados à contaminação por metais em espécies de interesse alimentar.

4.2 Plano de amostragem e coleta

No ano de 2023, exemplares de *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) foram obtidos por intermédio de pescadores profissionais nas duas localidades distintas situadas na seção terminal do médio curso do rio Tocantins. No lago da UHE de Estreito foram amostrados quatro espécimes, enquanto na região do Rio Tocantins correspondente ao município de Governador Edson Lobão foram amostrados dez espécimes, totalizando quatorze indivíduos. Todos os exemplares destinados às análises conduzidas neste estudo permaneceram sob conservação em congelamento até o momento do processamento laboratorial.

4.3 Procedimentos de processamento das amostras e análise de dados

Para a determinação dos teores de metais potencialmente tóxicos nos peixes, foram coletadas amostras de tecido provenientes das brânquias, fígado e musculatura dorsal, previamente isentas de escamas, pele e espinhas, utilizando-se bisturi com lâmina de aço inoxidável (Angheben *et al.*, 2019; Gomes *et al.*, 2024). As amostras foram submetidas à secagem em estufa a 60 °C durante 48 horas e, posteriormente, pesadas. A extração dos metais para o meio líquido foi realizada em 10 mL de solução extratora composta por água, ácido clorídrico e ácido nítrico, na proporção de 8:1:1, sob temperatura de 120 °C por uma hora em

autoclave. A leitura e quantificação dos elementos metálicos foram conduzidas por ICP-AES, no Laboratório de Química Instrumental da UEMASUL. Os resultados obtidos pelo ICP-AES foram inicialmente expressos em mg/L e, posteriormente, convertidos para mg/kg, permitindo a estimativa dos níveis de Pb, Cu, Cr, Hg, Ni, Zn, Al e As.

As análises foram conduzidas de acordo com o objetivo específico de cada etapa do estudo. A comparação das concentrações de metais entre os diferentes tecidos (brânquias, fígado e músculo) foi realizada exclusivamente com indivíduos coletados no ambiente Rio Tocantins (n = 10, AVO1 a AVO10), uma vez que, no ambiente Lago da UHE de Estreito, apenas amostras de músculo foram obtidas.

Para as análises de conformidade com os limites máximos estabelecidos pela legislação brasileira e para a avaliação de risco à saúde humana, foram consideradas todas as amostras de tecido muscular disponíveis (AVO1 a AVO14), provenientes tanto do ambiente Rio quanto do Lago, por se tratar do tecido efetivamente consumido pela população.

4.4 Tabulação dos dados

Os dados obtidos neste estudo foram inicialmente organizados em tabelas no programa *Microsoft Excel*, contendo os valores de concentração dos metais analisados em cada espécime amostrado. Essas informações serviram de base para o cálculo dos indicadores de risco à saúde humana, incluindo EDI, HQ, HI e o LCR. Posteriormente, a análise exploratória dos dados foi realizada na linguagem estatística R, por meio da qual foram elaborados gráficos comparativos, permitindo a visualização da distribuição das concentrações dos metais entre os diferentes tecidos dos peixes (brânquias, fígado e músculo).

4.5 Avaliação de risco à saúde

A avaliação de risco à saúde humana consiste na estimativa da probabilidade de ocorrência de efeitos adversos à saúde em indivíduos expostos a metais em ambientes contaminados, abrangendo a análise da exposição e a avaliação dos riscos não carcinogênicos e carcinogênicos (Osae *et al.*, 2023). No presente estudo, a avaliação do risco à saúde humana foi realizada considerando indivíduos adultos com peso corporal médio de 70 kg, de acordo com os parâmetros estabelecidos pela USEPA (2012).

4.5.1 Avaliação da exposição

A EDI foi utilizada para estimar a exposição humana a metais pesados por meio da ingestão direta, conforme a Equação (1), de acordo com Salaah, El-Khayat e Gaber (2025).

$$EDI = \frac{Mc \times IR}{BW} \quad (\text{Eq.1})$$

Em que Mc representa a concentração do metal; IR corresponde à taxa de ingestão (kg/dia), adotada com base em dados do IBGE para a região Nordeste, que estimam um consumo per capita anual de 8,25 kg, equivalente a 0,0226 kg/dia (IBGE, 2019; Wagner; Coelho; Travassos, 2023); e BW refere-se ao peso corporal médio de adultos.

4.5.2 Risco não carcinogênico

A avaliação do risco não carcinogênico à saúde consiste na estimativa da probabilidade de que a exposição a uma determinada quantidade de uma substância provoque efeitos adversos à saúde ao longo de um período específico (Osae *et al.*, 2023). Essa avaliação foi conduzida por meio do cálculo do HQ e HI.

O quociente de risco (QR) foi calculado conforme a Equação (2) e corresponde à razão entre a exposição potencial a uma substância e o nível de exposição abaixo do qual não são esperados efeitos adversos à saúde, conforme estabelecido pela USEPA (1989). As doses de referência individuais (RfD) para os metais estão apresentadas na Tabela 2, com base no estudo de Miletic, Lucic e Onjia (2023), os quais indicam os valores de RfD e de fator de inclinação carcinogênica (CSF) mais comumente adotados na literatura. Para o Al foi utilizado dados disponíveis no Sistema Integrado de Informação sobre Riscos (IRIS) da USEPA (2025).

$$HQ = \frac{EDI}{RfD} \quad (\text{Eq.2})$$

Com $HQ \leq 1$ indicando risco improvável e $HQ > 1$ indicando potencial risco à saúde humana.

Tabela 2. Valores de RfD e CSF utilizados na avaliação de risco à saúde humana.

Metal	RfD	CSF
Cr	3×10^{-3}	0.5
Cu	4×10^{-2}	-
Hg	3×10^{-4}	-
Ni	2×10^{-2}	1.7
Pb	3.5×10^{-3}	8.5×10^{-3}
As	3×10^{-4}	1.5
Zn	3×10^{-1}	-
Al	4×10^{-4}	-

Nota: RfD = Dose de Referência; CSF = Fator de Inclinação Carcinogênica.

Fonte: Miletic, Lucic e Onjia (2023); USEPA (2025).

O HI foi utilizado para avaliar o potencial geral de risco não carcinogênico à saúde representado por muitos contaminante. O índice de perigo para uma mistura de poluentes é

determinado usando a Equação (3) (USEPA, 1989):

$$HI = \sum HQ \quad (\text{Eq.3})$$

Quando o valor do HI é inferior a 1, é pouco provável que a população exposta apresente efeitos adversos evidentes à saúde. Por outro lado, valores de HI superiores a 1 indicam a possibilidade de ocorrência de efeitos adversos à saúde (USEPA, 1989).

4.5.3 Avaliação do risco carcinogênico

Os riscos carcinogênicos são estimados por meio do cálculo da probabilidade de um indivíduo desenvolver câncer ao longo da vida em decorrência da exposição a um agente potencialmente carcinogênico (Osae *et al.*, 2023). O risco carcinogênico à saúde é determinado utilizando o fator de inclinação carcinogênica, conforme apresentado na Equação (4). Esse fator representa uma estimativa da probabilidade de desenvolvimento de câncer associada à exposição contínua a uma substância química ao longo de uma vida média de 70 anos (Osae *et al.*, 2023).

$$LCR = EDI \times CSF \quad (\text{Eq.4})$$

Onde *LCR* é o risco de câncer ao longo da vida e *CSF* é o fator de inclinação do câncer (mg/kg/dia). Valores de *LCR* superiores a 1×10^{-4} são considerados inaceitáveis, enquanto riscos inferiores a 1×10^{-6} não são considerados significativos para a saúde. Valores situados entre 1×10^{-4} e 1×10^{-6} são geralmente considerados dentro de uma faixa aceitável (USEPA, 1989). Os *CSFs* individuais, conforme adotados de Miletić, Lučić e Onjia (2023), são apresentados na Tabela 2.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Concentração e distribuição de metais nos tecidos de *Hemiodus unimaculatus*

As concentrações médias dos metais Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, As e Al nos tecidos de *Hemiodus unimaculatus* encontram-se apresentadas na Tabela 3. De modo geral, observou-se uma distribuição heterogênea dos metais entre os diferentes tecidos analisados, evidenciando padrões distintos de bioacumulação conforme o elemento químico e o tecido avaliado.

Tabela 3. Concentração média (mg/kg) e desvio padrão (DP) de metais nos tecidos (músculo, fígado e brânquias) de *Hemiodus unimaculatus* coletados no rio Tocantins, Maranhão.

		Cr mg/Kg	Cu mg/Kg	Hg mg/Kg	Ni mg/Kg	Pb mg/Kg	Zn mg/Kg	As mg/kg	Al mg/kg
Músculo	Média	0,07	0,08	1,57	2,37	0,65	2,57	2,46	6,19
	DP	0,03	0,07	0,80	0,87	0,34	1,37	0,79	7,34
Fígado	Média	0,01	1,92	0,47	1,43	0,31	7,35	1,12	16,40
	DP	0,00	0,99	0,56	0,89	0,39	2,53	0,80	20,27
Brânquia	Média	0,14	0,64	3,43	2,67	2,19	5,78	2,41	12,19
	DP	0,17	0,86	1,07	0,76	1,36	1,60	0,66	11,44

Fonte: Autora, 2025.

As brânquias apresentaram as maiores concentrações médias para diversos metais, notadamente Hg (3,43 mg/kg), Ni (2,67 mg/kg), Pb (2,19 mg/kg), As (2,41 mg/kg), Zn (5,78 mg/kg) e Al (12,19 mg/kg). Em comparação com os demais tecidos, as brânquias exibiram os maiores valores médios de Hg, Pb, Ni e Cr.

O acúmulo expressivo de Hg, Ni, Pb e As nas brânquias observado neste estudo pode estar associado ao contato direto e contínuo desse órgão com a coluna d'água, permitindo a absorção eficiente. Estudos conduzidos no estuário de São Vicente, com *Mugil curema*, demonstraram que metais como Cr e Ni tendem a se acumular preferencialmente nas brânquias, enquanto elementos como Zn e Cu apresentam maiores concentrações no fígado, em função dos distintos mecanismos de depuração e detoxificação associados a esses órgãos (Carmo *et al.*, 2011). Resultados semelhantes foram observados por Cruz *et al.* (2015) em peixes da região amazônica, nos quais as brânquias apresentaram concentrações relativamente elevadas de metais não essenciais, como Pb, reforçando o papel desse tecido como indicador sensível da contaminação ambiental recente.

De acordo com Lacerda e Malm (2008), ambientes aquáticos tropicais caracterizados por elevada carga de matéria orgânica dissolvida, intensa atividade microbiana e condições subóxicas ou anóxicas favorecem os processos de metilação do Hg, aumentando sua biodisponibilidade para a biota. Essas condições são frequentemente observadas em grandes sistemas fluviais amazônicos e em áreas sob influência de barramentos, como ocorre em trechos do rio Tocantins. Dessa forma, a combinação entre absorção direta pelas brânquias e incorporação trófica ao longo da cadeia alimentar contribui para o padrão de distribuição do Hg observado entre os tecidos analisados.

Os elevados teores de Al observados nas brânquias de *Hemiodus unimaculatus* corroboram o padrão descrito por Cruz *et al.* (2015), que identificaram as brânquias como o tecido com maior concentração desse metal em diferentes espécies de peixes amazônicos,

incluindo *Brachyplatystoma rousseauxii*. Embora os valores absolutos observados no presente estudo sejam inferiores ($\approx 12,19 \mu\text{g g}^{-1}$) aos relatados pelos autores (até $2497,09 \mu\text{g g}^{-1}$), o padrão de distribuição entre os tecidos é semelhante.

No fígado, destacaram-se as concentrações médias de Al (16,40 mg/kg) e Zn (7,35 mg/kg), seguidas por Cu (1,92 mg/kg), Ni (1,43 mg/kg) e As (1,12 mg/kg). As concentrações de Hg, Pb e Cr foram relativamente menores nesse tecido. O fígado apresentou elevada variabilidade para alguns metais, especialmente Al, refletida pelos altos valores de desvio padrão.

O padrão de acúmulo de Al observado no fígado no presente estudo encontra respaldo em investigações realizadas com *Cyprinus carpio*, nas quais o Al figurou entre os metais com maiores concentrações tanto no fígado quanto nas brânquias, apresentando tendência semelhante de distribuição entre esses tecidos (Voigt; Silva; Campos, 2016). Nesse estudo, os metais Zn, Fe e Al foram os mais abundantes nos tecidos analisados, sendo que o Fe e o Al também apresentaram elevadas concentrações na água e no sedimento do Reservatório de Alagados, indicando que a interação com esses compartimentos ambientais constitui uma importante via de contaminação hepática.

O padrão de distribuição observado neste estudo, com maiores concentrações de Zn no fígado, está em consonância com o descrito por Labarrère *et al.* (2012), que identificaram o tecido hepático como o principal compartimento de acúmulo de Zn em peixes do rio São Francisco. Segundo os autores, essa tendência está associada à elevada atividade metabólica do fígado e à indução de proteínas ligantes de metais, como as metalotioneínas.

Resultados semelhantes aos do presente estudo foram reportados por Fernandes *et al.* (2008) em estudo realizado na lagoa de Esmoriz-Páramos, um ecossistema costeiro do noroeste de Portugal submetido a intensa pressão antrópica. Os autores avaliaram as concentrações de Cr, Cu, Pb e Zn na água, nos sedimentos e nos tecidos de *Liza saliens*, espécie dominante no local, e observaram que os metais apresentaram acúmulo preferencial no fígado em relação ao músculo. As concentrações hepáticas de Cu (262 mg/kg) e Zn (89 mg/kg) foram substancialmente superiores às registradas no tecido muscular ($<3 \text{ mg/kg}$ para Cu e 26 mg/kg para Zn), enquanto Pb e Cr não foram detectados nos tecidos analisados. Esse padrão foi atribuído tanto à elevada disponibilidade de metais nos sedimentos, que apresentaram a ordem relativa de concentração $\text{Zn} > \text{Cu} \approx \text{Pb} > \text{Cr}$, quanto aos hábitos alimentares detritívoros da espécie, sugerindo os sedimentos como a principal fonte de contaminação. Adicionalmente, a relação positiva encontrada pelos autores entre os níveis de Cu no fígado e o comprimento dos peixes indica que o tempo de exposição constitui um fator determinante na bioacumulação,

reforçando o papel do fígado como órgão central nos processos de detoxificação e armazenamento de metais em ambientes contaminados.

No tecido muscular, as maiores concentrações médias foram registradas para Al (7,77 mg/kg), As (2,71 mg/kg), Zn (2,67 mg/kg), Ni (2,43 mg/kg) e Hg (1,79 mg/kg). Os demais metais, como Pb, Cu e Cr, apresentaram concentrações médias inferiores a 1,0 mg/kg. De modo geral, o músculo apresentou menores concentrações para a maioria dos metais quando comparado às brânquias e ao fígado, embora alguns elementos tenham apresentado valores expressivos.

A ocorrência de concentrações elevadas de As no tecido muscular de *Hemiodus unimaculatus* pode ser compreendida à luz dos processos de bioacumulação descritos para outras espécies de peixes. Estudos realizados com peixes marinhos comercializados no Nordeste brasileiro indicam que o As pode atingir níveis relevantes mesmo no músculo, tecido que, em geral, apresenta menores concentrações de metais quando comparado ao fígado e às brânquias. No boletim técnico da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Silva e Santos (2016) registraram concentrações médias de As de até $1,30 \pm 0,34$ mg/kg no músculo de atuns comercializados em Aracaju, além de valores expressivos em espécies como bagre ($0,62 \pm 0,43$ mg/kg) e pescada amarela ($0,69 \pm 0,29$ mg/kg), evidenciando que esse elemento pode alcançar níveis de interesse ecotoxicológico e sanitário mesmo no filé consumível.

Segundo esses autores e de acordo com critérios da USEPA (1989), os maiores níveis de As estão associados tanto ao elevado nível trófico e hábito piscívoro, como observado para o atum, quanto a hábitos alimentares que favorecem maior interação com sedimentos contaminados, característica comum a espécies bentônicas. Embora *H. unimaculatus* apresente hábito alimentar onívoro, esse comportamento amplia significativamente as vias de exposição ao As, uma vez que a ingestão de invertebrados bentônicos, detritos orgânicos e material vegetal pode resultar na assimilação de As previamente bioconcentrado na base da cadeia alimentar aquática.

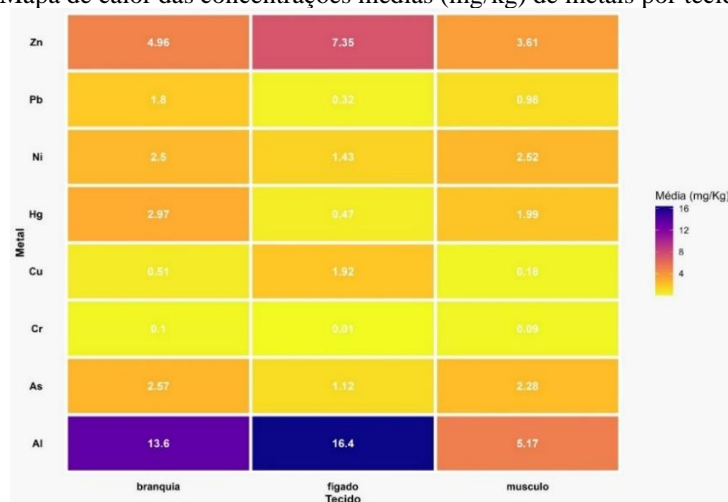
Ademais, estudos de bioacumulação em peixes de ambientes aquáticos impactados demonstram que o Al pode atingir concentrações expressivas no músculo, com médias em torno de 196,74 mg/kg e valores máximos de até 6050 mg/kg em peixes de vida livre, evidenciando grande variabilidade associada a condições ambientais adversas (Santos *et al.*, 2022). De forma semelhante, em peixes teleósteos do Rio Piracicaba (MG), foram registradas concentrações de Al no músculo da ordem de 259,15 mg/kg, superando inclusive as de outros metais como Pb e Zn (Morais, 2009). Esses achados foram associados à elevada disponibilidade ambiental de alumínio, à interação com sedimentos contaminados e à exposição crônica dos organismos,

fatores que favorecem a assimilação do metal pela dieta e sua retenção em tecidos menos ativos metabolicamente. Assim, os valores de Al registrados no músculo no presente estudo, embora inferiores aos máximos descritos na literatura, são compatíveis com aqueles observados em ambientes impactados.

As concentrações de Hg no músculo de *Hemiodus unimaculatus* observadas no presente estudo, embora inferiores às registrada nas brânquias, revelam-se relevantes quando comparadas a outros sistemas aquáticos. Estudos realizados em peixes comercializados no mercado de Fortaleza (CE) encontraram concentrações médias de Hg total no músculo variando de 14 a 509 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (0,014–0,509 mg/kg) em diferentes espécies (Lacerda *et al.*, 2016), indicando que níveis semelhantes aos observados em *H. unimaculatus* podem ocorrer em pescados submetidos a pressões antropogênicas semelhantes. Em sistemas aquáticos do Velky Kocelovicky pond (República Tcheca), os valores médios de Hg no músculo oscilaram entre 0,0036 e 0,1517 mg/kg, com predadores apresentando os maiores teores, embora ainda abaixo dos limites regulatórios internacionais (Sehonova, 2022). Esses comparativos sugerem que, mesmo quando os níveis de Hg no músculo estão abaixo dos limites máximos admissíveis para consumo humano (por exemplo, 0,5 mg/kg definidos pela Codex Alimentarius), a presença contínua de Hg em tecidos com menor capacidade de detoxificação merece atenção, especialmente em espécies bentônicas ou onívoras onde a assimilação via dieta pode resultar em acúmulo progressivo ao longo da vida dos organismos. Os resultados obtidos para este estudo merecem atenção, devido ao consumo humano associado à espécie analisada.

Os DPs indicaram elevada variabilidade individual para alguns metais, especialmente Al e Hg, sugerindo diferenças no grau de exposição ou na capacidade de acúmulo entre os indivíduos amostrados.

Figura 3. Mapa de calor das concentrações médias (mg/kg) de metais por tecido analisado.

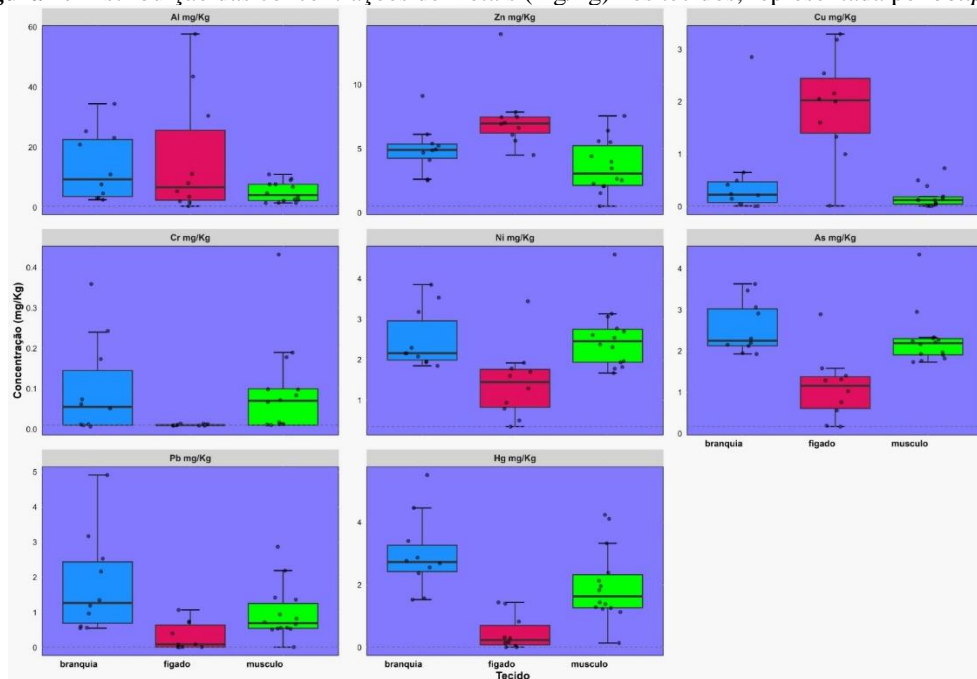


Fonte: Autora, 2025.

O mapa de calor (Figura 3) evidencia um padrão distinto de bioacumulação entre os tecidos, com maiores concentrações de Al e Zn no fígado, enquanto as brânquias apresentaram valores elevados de Hg, Pb e Ni, refletindo o contato direto com o meio aquático. O músculo, de modo geral, apresentou menores concentrações, embora Hg e As tenham exibido valores relativamente elevados, o que merece atenção devido às implicações para a saúde humana.

Os diagramas de caixa (*boxplots*) (Figura 4) demonstram elevada variabilidade nas concentrações de alguns metais, especialmente Al e Hg, com a presença de valores atípicos (*outliers*), os quais podem indicar diferenças individuais na exposição e na capacidade de bioacumulação entre os espécimes analisados.

Figura 4. Distribuição das concentrações de metais (mg/kg) nos tecidos, representada por *boxplots*.



Fonte: Autora, 2025.

5.2 Comparação com limites legais para consumo humano

A comparação das concentrações médias de metais detectadas no músculo dos espécimes com os limites máximos estabelecidos pela legislação brasileira para consumo humano encontra-se apresentada na Tabela 4.

Os resultados demonstraram que as concentrações médias de Hg (1,62 mg/kg), Pb (0,70 mg/kg) e As (2,36 mg/kg) no músculo excederam os limites máximos permitidos pela legislação brasileira para peixes (0,5; 0,30 e 1,0 mg/kg, respectivamente). Em contrapartida, os teores médios de Cu, Cr, Ni e Zn permaneceram abaixo dos valores legais estabelecidos. Embora o Al tenha apresentado concentrações relativamente elevadas no músculo, a ausência de limites

máximos definidos na legislação brasileira impede sua avaliação quanto à conformidade legal.

Tabela 4. Comparação entre as concentrações médias de metais no músculo de *H. unimaculatus* (mg/kg) e os limites máximos permitidos pela legislação brasileira.

Metal	Músculo (média ± DP) mg/kg	Limite (mg/kg)	Situação
Hg	1,62 ± 0,73	0,5 (peixes em geral)	Acima do limite
Pb	0,70 ± 0,36	0,30	Acima do limite
Cu	0,10 ± 0,10	30	Abaixo do limite
Cr	0,06 ± 0,05	0,10	Abaixo do limite
Ni	2,37 ± 0,73	5,0	Abaixo do limite
Zn	2,98 ± 1,45	50	Abaixo do limite
As	2,36 ± 0,69	1,0	Acima do limite
Al	6,50 ± 6,30	-	Sem limite estabelecido

Fonte: Brasil (1965; 2021; 2022a; 2022b).

Enquanto Arantes *et al.* (2016) alertam para riscos potenciais associados ao consumo frequente de peixes com concentrações de metais próximas aos limites de segurança, os resultados obtidos para *Hemiodus unimaculatus* evidenciam um cenário ainda mais crítico, no qual os teores de Hg, Pb e As no músculo excedem diretamente os padrões legais, indicando elevada contaminação ambiental e risco significativo à saúde humana.

No estudo de Duarte (2024) com *Pygocentrus nattereri* coletado no Espírito Santo, a concentração de alumínio (Al) no músculo foi de 2,5849 µg/g (equivalente a 2,58 mg/kg), sendo interpretada pelo autor como elevada e potencialmente associada a risco à saúde humana, mesmo na ausência de um limite máximo específico estabelecido pela legislação brasileira para esse metal. A legislação vigente no Brasil não define um valor legal para Al em músculos de peixes, o que impede uma avaliação normativa direta; contudo, o autor ressalta que avaliações de risco toxicológico, baseadas em parâmetros de ingestão e exposição, indicam que níveis elevados de Al podem representar preocupação para consumidores frequentes de pescado. No presente estudo com *H. unimaculatus*, observou-se também concentração elevada de Al no músculo (6,50 ± 6,30 mg/kg), valor superior ao reportado para *P. nattereri*, além de concentrações de Hg, Pb e As acima dos limites legais brasileiros. Essa consistência entre espécies distintas, pertencentes a diferentes níveis tróficos e ambientes, reforça que a presença de Al em níveis elevados no tecido muscular de peixes constitui um achado relevante do ponto de vista da saúde pública.

No trabalho de Angheben *et al.* (2019), realizado com peixes de diferentes níveis tróficos no Rio das Antas (RS), observou-se que o Cr apresentou concentrações acima do limite máximo permitido pela legislação brasileira em todas as amostras, enquanto Cu e Ni permaneceram abaixo dos limites legais e apenas duas amostras apresentaram Zn acima do permitido. Em contraste, Hg e Pb não foram detectados em níveis que ultrapassassem os limites

de detecção do equipamento utilizado. Esses achados corroboram parcialmente os resultados do presente estudo para Cu e Ni, mas destacam diferenças importantes para metais como Cr, Pb e Hg, que, em *H. unimaculatus*, apresentaram concentrações acima dos valores legais, indicando variações espaciais e distintas fontes de contaminação que merecem atenção na avaliação de riscos à saúde humana.

Os resultados do relatório preliminar de bioacumulação de metais em peixes, conduzido pelo Instituto Guaicuy, indicam que uma proporção significativa das amostras musculares apresentou concentrações de cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio acima dos limites máximos permitidos pela legislação brasileira (ANVISA, Instrução Normativa nº 160/2022), com registros que ultrapassaram em mais de 40 vezes o valor legal para Cd e em mais de cinco vezes para Pb. As maiores concentrações desses metais, especialmente Hg e Pb, foram observadas em espécies predadoras piscívoras, como *Acestrorhynchus* spp., *Cichla kelberi* e *Hoplias malabaricus*, evidenciando o processo de biomagnificação ao longo da cadeia trófica (Santos *et al.*, 2022).

No presente estudo, *Hemiodus unimaculatus*, espécie onívora com tendência herbívora-detrítivora, apresentou concentrações médias de Hg ($1,62 \pm 0,73$ mg/kg), Pb ($0,70 \pm 0,36$ mg/kg) e As ($2,36 \pm 0,69$ mg/kg) superiores aos limites legais estabelecidos para consumo humano (0,50; 0,30 e 1,00 mg/kg, respectivamente). Notadamente, esses valores foram comparáveis ou até superiores aos observados em algumas espécies predadoras descritas no referido relatório, o que contraria a expectativa de que maiores níveis de contaminação estejam restritos aos níveis tróficos superiores.

Esse padrão sugere elevada contaminação ambiental basal, com exposição significativa de *H. unimaculatus* a metais potencialmente tóxicos por meio do contato direto com sedimentos, perifíton e material particulado, componentes fundamentais de sua dieta. Dessa forma, os resultados reforçam que a contaminação por metais pesados em ecossistemas aquáticos brasileiros não se limita à biomagnificação em predadores de topo, podendo afetar também espécies de níveis tróficos intermediários ou inferiores, ampliando os riscos associados ao consumo humano. Esses achados evidenciam a recorrência da contaminação por metais na ictiofauna de diferentes bacias hidrográficas do Brasil e ressaltam a necessidade de ações contínuas de monitoramento ambiental e de estratégias eficazes de mitigação da poluição.

5.3 Avaliação integrada do risco à saúde humana associado ao consumo do pescado

A avaliação do risco à saúde humana associada ao consumo de espécimes de *H. unimaculatus* foi realizada por meio da estimativa de EDI, HQ, HI e LCR, considerando as

concentrações médias dos metais no tecido muscular. Os valores de EDI, HQ e LCR encontram-se apresentados na Tabela 5, enquanto os valores individuais e médios de HI estão dispostos na Tabela 6.

Os valores de EDI indicaram maiores contribuições de Al, As, Zn e Hg, reflexo das concentrações elevadas desses elementos no músculo dos peixes. Esse padrão sinaliza que os consumidores humanos podem estar sendo expostos a quantidades significativas desses contaminantes por meio da ingestão regular do pescado.

Tabela 5. Valores médios e desvios padrão de EDI, HQ e LCR para os metais analisados.

Metal	EDI (mg kg⁻¹ dia⁻¹)	HQ	LCR
Cr	$(1,85 \pm 1,60) \times 10^{-5}$	$(6,17 \pm 5,32) \times 10^{-3}$	$(9,0 \pm 8,0) \times 10^{-6}$
Pb	$(2,30 \pm 1,20) \times 10^{-4}$	$(6,5 \pm 3,3) \times 10^{-2}$	$(1,9 \pm 1,0) \times 10^{-6}$
Cu	$(3,11 \pm 3,33) \times 10^{-5}$	$(7,8 \pm 8,3) \times 10^{-4}$	—
As	$(7,6 \pm 2,2) \times 10^{-4}$	$2,54 \pm 0,74$	$(1,14 \pm 0,34) \times 10^{-3}$
Hg	$(5,2 \pm 2,3) \times 10^{-4}$	$1,74 \pm 0,78$	—
Zn	$(9,6 \pm 4,7) \times 10^{-4}$	$(3,2 \pm 1,6) \times 10^{-3}$	—
Ni	$(7,6 \pm 2,4) \times 10^{-4}$	$(3,8 \pm 1,2) \times 10^{-2}$	$(1,30 \pm 0,40) \times 10^{-3}$
Al	$(2,10 \pm 2,03) \times 10^{-3}$	$5,24 \pm 5,09$	—

Nota: EDI = Ingestão Diária Estimada; HQ = Quociente de Risco; LCR = Risco Carcinogênico ao Longo da Vida (Lifetime Cancer Risk).

Fonte: Autora, 2025.

A análise do HQ revelou que Al, As e Hg apresentaram valores médios superiores a 1, indicando potencial risco não carcinogênico associado ao consumo da espécie. O Al apresentou o maior HQ médio (5,24), seguido pelo As (2,54) e pelo Hg (1,74), enquanto os demais metais permaneceram abaixo da unidade.

Os índices de HQ evidenciaram que os valores médios de Al, As e Hg superaram a unidade, indicando potencial risco não carcinogênico associado ao consumo de *H. unimaculatus*, com destaque para o Al (HQ = 5,24) e o As (HQ = 2,54) (Tabela 5). Resultados semelhantes foram observados por Leite (2025) ao avaliar sardinhas enlatadas comercializadas no Brasil, onde o HQ para arsênio excedeu 1 em todas as faixas etárias, alcançando valores superiores a 2 para adultos e acima de 5 para crianças, evidenciando maior vulnerabilidade dos grupos mais jovens à exposição dietética a esse elemento.

Resultados de um estudo recente realizado com peixes comerciais no Amazonas revelaram que as estimativas de ingestão diária (EDI) para Hg, As e Cr podem exceder as doses de referência estabelecidas, o que representa um risco toxicológico à saúde humana associado ao consumo habitual desses pescados (Waichman *et al.*, 2025) Esses achados corroboram a interpretação de nossos valores de HQ > 1 para As e Hg em *H. unimaculatus*, sugerindo que exposições alimentares a esses metais são um problema replicado em diferentes espécies e contextos ambientais dentro do Brasil.

No estudo de Salaah *et al.* (2025) com *Mugil cephalus*, os valores de HQ/THQ para os metais avaliados (Fe, Zn, Cu, Pb e Cd) variaram amplamente conforme o tamanho do peixe e o padrão de consumo, alcançando até 0,986 para consumidores habituais, o que indica risco acumulado quando somado no HI e está associado a risco não carcinogênico ($HI > 1$) em todos os grupos. Esses resultados são metodologicamente comparáveis aos nossos índices de HQ, que indicaram valores médios superiores a 1 para Al (5,24), As (2,54) e Hg (1,74). Enquanto os elementos predominantes diferem entre os estudos (Salaah *et al.* enfocaram Fe, Zn, Cu, Pb e Cd; nosso estudo destacou Al, As e Hg), ambos indicam que a exposição habitual a metais traço via consumo de pescado pode ultrapassar limiares de segurança, resultando em risco não carcinogênico para o consumidor.

O HI médio de $7,81 \pm 5,60$ estimado para *H. unimaculatus* indica risco não carcinogênico acumulado, uma vez que todas as amostras apresentaram valores de HI superiores a 1, evidenciando que a exposição simultânea a múltiplos metais pode resultar em efeitos adversos à saúde humana, mesmo quando alguns elementos isoladamente apresentam $HQ < 1$. Observou-se elevada variabilidade entre as amostras, com destaque para AVO8 e AVO10, que apresentaram os maiores valores de HI (Tabela 6). Resultados semelhantes foram observados por Fernandes *et al.* (2025) em peixes de rios de Mato Grosso do Sul, onde o HI também excedeu 1 em todos os locais avaliados, com destaque para o cádmio (Cd) e o arsênio (As) como principais contribuintes ao risco não carcinogênico acumulado, além de riscos carcinogênicos ($CR > 1 \times 10^{-4}$) associados a As, Cd e Cr.

Ademais, HI calculado por Leite (2025) ao avaliar sardinhas enlatadas também foi superior a 1, com valores médios que variaram aproximadamente entre 4 e 9, sendo o arsênio o principal contribuinte para o risco não carcinogênico total. Tal confluência entre os estudos reforça que a exposição combinada a múltiplos metais, mesmo quando alguns apresentam HQ individuais abaixo de 1, pode resultar em risco à saúde humana quando considerada de forma integrada.

A convergência entre os resultados reforça que, embora os metais predominantes variem entre regiões e espécies, Al, As e Hg no presente estudo, Cd e As em Fernandes *et al.* (2025) e As em Leite (2025), o padrão de risco cumulativo elevado decorrente do consumo habitual de pescado contaminado permanece consistente.

Em relação ao risco carcinogênico ao longo da vida, os valores estimados de LCR para As, Ni, Pb e Cr excederam o intervalo considerado aceitável pela USEPA (10^{-6} a 10^{-4}), com maiores contribuições do As ($1,14 \times 10^{-3}$) e do Ni ($1,30 \times 10^{-3}$), indicando potencial risco carcinogênico associado ao consumo crônico de *H. unimaculatus* (Tabela 5), os achados se

alinham com os de Waichman *et al.* (2025) no contexto amazônico. No estudo dos autores, a avaliação de risco humana para 10 elementos traço em peixes comerciais da Amazônia mostrou que exposições crônicas a Cr e As podem gerar riscos carcinogênicos elevados, com os valores de CR/LCR estimados para Cr variando aproximadamente entre $1,39 \times 10^{-3}$ e $3,55 \times 10^{-3}$ e valores de CR/LCR para As também acima de 1×10^{-4} em diversas espécies analisadas (por exemplo, $CR = 5,79 \times 10^{-4}$ para *Myleus sp.* e $CR = 5,43 \times 10^{-4}$ para *Prochilodus nigricans*), resultando em índices de risco combinados (HI para carcinogenicidade) da ordem de 10^{-3} a 10^{-3} para diferentes espécies.

Esses valores confirmam que tanto Cr quanto As têm potencial carcinogênico relevante via consumo de pescado na região amazônica, corroborando a interpretação de que exposições crônicas observadas no presente estudo também podem trazer riscos à saúde ao longo da vida.

Tabela 6. Valores de HI estimados para as amostras analisadas.

Amostra	HI
AVO1	5,34
AVO2	5,35
AVO3	5,72
AVO4	8,46
AVO5	3,90
AVO6	7,10
AVO7	13,25
AVO8	24,73
AVO9	7,87
AVO10	15,79
AVO11	6,04
AVO12	10,87
AVO13	9,50
AVO14	13,97
Média	7,81
DP	5,60

Nota: HI = Índice de Risco.

Fonte: Autora, 2025.

Do ponto de vista de saúde pública, a ingestão crônica dos metais e metaloides identificados no músculo de *H. unimaculatus* pode representar riscos variados à saúde humana, a literatura internacional aponta os possíveis efeitos adversos causados. A exposição ao As inorgânico está associada a câncer de pele, pulmão e bexiga, além de efeitos sobre o sistema cardiovascular, imunológico e neurológico (WHO, 2010; ATSDR, 2012). O Hg, principalmente na forma metilada presente em peixes, pode causar comprometimento neurológico, déficits cognitivos em crianças e efeitos renais e cardiovasculares em adultos (Clarkson *et al.*, 2003; WHO, 2017).

O Al tem sido relacionado a alterações neurotóxicas e possivelmente ao

desenvolvimento de doenças neurodegenerativas em exposições crônicas (Exley, 2013). O Zn, essencial em pequenas doses, pode causar toxicidade gastrointestinal, alterações hematológicas e imunoestimulantes em níveis elevados (Prasad, 2013). O Ni pode induzir reações alérgicas, efeitos respiratórios e risco carcinogênico em exposições prolongadas (IARC, 2012). O Pb é conhecido por afetar o desenvolvimento neurológico, funções renais e cardiovasculares, com efeitos acumulativos especialmente prejudiciais em crianças (Needleman, 2004). O Cr, na forma hexavalente, apresenta potencial carcinogênico e pode afetar fígado, rins e sistema imunológico (IARC, 2012).

6 CONCLUSÃO

Nosso estudo examinou o acúmulo de metais potencialmente tóxicos em *Hemiodus unimaculatus* da porção final do médio curso da bacia do rio Tocantins, na Amazônia oriental brasileira. Se relacionando diretamente aos ODS 2 (Fome Zero) e 3 (Saúde e Segurança), ao identificar os riscos de consumo de uma espécie de pescado amplamente consumido pela população regional. Os resultados mostraram níveis elevados de metais potencialmente tóxicos e riscos à saúde dos consumidores.

A presença desses contaminantes nos tecidos do pescado reflete a influência de processos naturais e, sobretudo, de atividades antrópicas que afetam a qualidade dos ecossistemas aquáticos da região. A análise integrada dos dados evidencia que a exposição crônica aos metais potencialmente tóxicos, por meio do consumo frequente de pescado, pode representar um fator de risco à saúde humana, especialmente para grupos populacionais mais vulneráveis, como comunidades ribeirinhas que dependem do peixe como principal fonte de proteína.

Os resultados obtidos destacam a importância de desenvolver e implementar diretrizes e recomendações para o consumo de peixe, principalmente para consumidores habituais, bem como o monitoramento e a avaliação contínuos de metais potencialmente tóxicos para proteger a saúde dos peixes, garantir a sustentabilidade dos estoques pesqueiros e salvaguardar a saúde humana.

As pesquisas futuras devem se concentrar nos mecanismos que ligam a poluição por metais potencialmente tóxicos, bem como na melhoria das medidas de biossegurança na atividade pesqueira para mitigar esses riscos. Nesse contexto, os achados apresentados podem subsidiar ações de monitoramento ambiental, vigilância sanitária e formulação de políticas públicas voltadas à segurança alimentar, à conservação dos recursos pesqueiros e à proteção da

saúde humana, contribuindo para o fortalecimento de práticas sustentáveis alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

REFERÊNCIAS

- AL OSMAN, M.; YANG, F.; MASSEY, I. Y. Exposure routes and health effects of heavy metals on children. **BioMetals**, v. 32, p. 563–573, 2019. DOI: 10.1007/s10534-019-00193-5.
- ANGHEBEN, F. M. **Bioacumulação de metais pesados em peixes de diferentes ambientes e implicações para a saúde humana**. Dissertação (Mestrado em Biologia). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2020.
- ANGHEBEN, F. M.; SCHNEIDER, V. E.; BACCIN, K.; POLETTO, M. Concentração de metais em peixes de diferentes níveis tróficos, ocorrentes no Rio das Antas, RS – Brasil. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v. 8, n. 4, p. 152–164, out./dez. 2019.
- ARANTES, F. P.; SAVASSI, L. A.; SANTOS, H. B.; GOMES, M. V. T.; BAZZOLI, N. Bioaccumulation of mercury, cadmium, zinc, chromium, and lead in muscle, liver, and spleen tissues of a large commercially valuable catfish species from Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, p. 137–147, 2016. DOI: 10.1590/0001-3765201620140434.
- ARIAS, A. R. L.; BUS, D. F.; ALBURQUERQUE, C.; INÁCIO, A. L.; FREIRE, M. M.; EGLER, M.; MUGNAI, R.; BAPTISTA, D. F. Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos. **Ciência & Saúde Coletiva**, p. 61-72, 2007.
- ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for arsenic. Atlanta: **US Department of Health and Human Services**, 2012.
- AUTHMAN, M. M. N.; ZAKI, M. S.; KHALLAF, E. A.; ABBAS, H. H. Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution. **Journal of Aquaculture Research & Development**, v. 6, art. 328, 2015. DOI: 10.4172/2155-9546.1000328.
- BAGGIO, H. F. **Contribuições naturais e antropogênicas para a concentração e distribuição de metais pesados em água superficial e sedimento de corrente na Bacia do Rio do Formoso, município de Buritizeiro, MG**. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- BARBOSA, A. S.; CARVALHO, A. E. F. B. de; SILVA, M. F. da. Dinâmica do fósforo nas águas superficiais em um reservatório tropical no médio curso do rio Tocantins. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA (SBPC), 76., 2024, Belém, PA. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBPC, 2024.
- BARRETO, T. de R. **Alterações morfofuncionais e metabólicas no teleósteo de água doce matrinxã, Brycon cephalus (GÜNTHER, 1869) exposto ao organofosforado metil paration (Folisuper 600 BR®)**. Dissertação (Mestrado em Ciências Fisiológicas). Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2007.

BRAGA, F. M. de S. Aspectos da reprodução e alimentação de peixes comuns em um trecho do rio Tocantins entre Imperatriz e Estreito, estado do Maranhão e Tocantins, Brasil. **Rev. Bras. Biol.**, v. 50, n. 3, p. 339-46, 1990.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Instrução Normativa nº 88, de 26 de março de 2021. Estabelece os limites máximos tolerados (LMT) de contaminantes em alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 31 mar. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-in-n-88-de-26-de-marco-de-2021-311655598>. Acesso em: 21 de dezembro de 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Instrução Normativa IN nº 160, de 7 de junho de 2022. Estabelece os limites máximos de contaminantes e resíduos em alimentos, incluindo metais pesados, e os procedimentos analíticos para avaliação de conformidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 7 jun. 2022a.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 722, de 1º de julho de 2022. Dispõe sobre os limites máximos tolerados (LMT) de contaminantes em alimentos, os princípios gerais para o seu estabelecimento e os métodos de análise para fins de avaliação de conformidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2022b.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 454, de 1º de novembro de 2012. Estabelece diretrizes gerais e procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 nov. 2012

BRASIL. Decreto no. 55871 de 26 de março de 1965. Modifica o Decreto no 50.040, de 24 de janeiro de 1961, referente a normas reguladoras do emprego de aditivos para alimentos, alterado pelo Decreto no 691, de 13 de março de 1962. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, 09 abr. 1965.

CAMPOS, M. J. A.; NAKANO, V. **Metais Pesados: Um Perigo Eminente**. Departamento de Microbiologia - Universidade de São Paulo (USP), 2017.

CARMO, C. A. do; ABESSA, D. M. de S.; MACHADO NETO, J. G. Metais em águas, sedimentos e peixes coletados no estuário de São Vicente-SP, Brasil. **O Mundo da Saúde**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 64–70, 2011.

CHAMBO, A. P. S. **Bioindicadores para determinação de metais pesados no reservatório da Itaipu Binacional, Paraná, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Marechal Cândido Rondon, 2011.

CINTRA, I. H. A.; ROCHA, J. C.; NAKAYAMA, L.; MARTINS, J. C.; SILVA, K. C. A. A pesca de *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) na área de influência da usina hidrelétrica de Tucuruí, Pará, Brasil. **Acta Fish. Aquat. Res.**, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2013.

CLARKSON, T. W.; MAGOS, L.; MYERS, G. J. The toxicology of mercury – current exposures and clinical manifestations. **New England Journal of Medicine**, v. 349, p. 1731–1737, 2003.

CODEX ALIMENTARIUS. **Codex general standard for contaminants and toxins in food and feed (CXS 193-1995)**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; World Health Organization, 1995. Disponível em: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf. Acesso em: 18 de dezembro de 2025.

CORRÊA, J. M. **Bioacumulação de metais pesados em peixes e avaliação de risco à saúde humana na região costeira do Ceará**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CRUZ, A. S.; PEREIRA JUNIOR, J. B.; CARVALHO, F. I. M.; NUNES, P. O.; ALVES, B. S. F.; PALHETA, D. C.; DANTAS FILHO, H. A.; DANTAS, K. G. F. Estudo da distribuição de metais em tecidos de peixes da região amazônica. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 1935–1951, 2015. DOI: 10.5935/1984-6835.20150114.

DI BENEDITTO, A.P.M., BITTAR, V.T., REZENDE, C.E., CAMARGO, P.B. & KEHRIG, H.A. Mercury and stable isotopes (15N and 13C) as tracers during the ontogeny of *Trichiurus lepturus*. **Neotropical Ichthyology**, 11: 211-216. 2013.

DUARTE, G. A. P. **Análise da concentração de metais em pescados e avaliação do risco do consumo humano**. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas). Universidade Vila Velha, Vila Velha, fev. 2024. Disponível em: <https://repositorio.uvv.br/server/api/core/bitstreams/b42ece81-e823-469c-bc3c9eb17cdc219e/content>. Acesso em: 29 de dezembro de 2025.

EMON, F. J.; ROHANI, M. F.; SUMAIYA, N.; JANNAT, M. F. T.; AKTER, Y.; SHAHJAHAN, M.; KARI, Z. A.; TAHILUDDIN, A. B.; GOH, K. W. Bioaccumulation and bioremediation of heavy metals in fishes—a review. **Toxics**, v. 11, n. 6, art. 510, 2023. DOI: 10.3390/toxics11060510.

EXLEY, C. Human exposure to aluminium. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 15, p. 1807–1816, 2013.

FERNANDES, C.; FONTAÍNHAS-FERNANDES, A.; CABRAL, D.; SALGADO, M. A. Heavy metals in water, sediment and tissues of *Liza saliens* from Esmoriz-Páramos lagoon, Portugal. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 136, n. 1–3, p. 267–275, 2008.

FERNANDES, M. R.; MELO, E. S. P.; ANCEL, M. A. P.; GUIMARÃES, R. D. C. A.; HIANE, P. A.; FREITAS, K. D. C.; BOGO, D.; TSCHINKEL, P. F. S.; ROSA, A. C. G.; MEDEIROS, C. S. A. Assessment of the risk to human health and pollution levels due to the presence of metal(loid)s in sediments, water, and fishes in urban rivers in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Urban Science**, v. 9, n. 4, p. 114, 2025. DOI: 10.3390/urbansci9040114.

FERRAZ, L. L.; DOURADO, A. A.; RODRIGUES, A.; ROCHA, F. A. Análise Da Presença De Metais Pesados Na Água Em Diferentes Reservatórios Subterrâneos No Município De Vitória Da Conquista - Ba. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, v. 3, n. 2, p. 45-55, 2018.

FERREIRA, L. G. P. **Avaliação da contaminação ambiental no estuário do Rio dos Cachorros: bioacumulação e percepção do risco químico de metais em peixes**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

FREITAS, V. P.; BRÍGIDO, B. M.; BADOLATO, M. I. C.; ALABURDA, J. Padrão físico-químico da água de abastecimento público da região de Campinas. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 61, n. 1, p. 51–8, 2002. <https://doi.org/10.53393/rial.2002.61.35018>.

GOMES, L. L.; SILVA, G. R. da; SANTOS, M. J. D. dos; SILVA, M. F. da. Bioacumulação de metais em tecido muscular de *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) na porção final do médio curso do rio Tocantins, Maranhão, Brasil. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 76., 2024, Belém, PA. **Anais/resumos da 76ª Reunião Anual da SBPC**. São Paulo: SBPC, 2024. Disponível em: <https://livro.sbpcnet.org.br/76ra>. Acesso em: 18 de dezembro de 2025. ISSN 2176-1221.

GONTIJO, E. S. J.; MONTEIRO, A. S. C.; ROSA, A. H. Especificação de metais e metaloides em ambientes aquáticos: conceitos, técnicas e aplicações. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 5, p. 1910-1929, 2017.

GUPTA, G.; SRIVASTAVA, P. P.; KUMAR, M.; VARGHESE, T.; CHANU, T. I.; GUPTA, S.; ANDE, M. P.; JANA, P. The modulation effects of dietary zinc on reproductive performance and gonadotropins' (FSH and LH) expression in threatened Asian catfish, *Clarias magur* (Hamilton, 1822) broodfish. **Aquaculture Research**, v. 52, p. 2254–2265, 2021.

HASSAN, A.; MOHARRAM, S.; EL HELALY, H. Role of Parasitic Helminths in Bioremediating Some Heavy Metal Accumulation in the Tissues of *Lethrinus mahsena*. **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v.18, n.3, p.435-443, 2018.

HUANG, F.; HU, J.; CHEN, L.; WANG, Z.; SUN, S.; ZHANG, W.; JIANG, H.; LUO, Y.; WANG, L.; ZENG, Y.; FANG, L. Microplastics may increase the environmental risks of Cd via promoting Cd uptake by plants: a meta-analysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 448, art. 130887, 2023. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130887.

IARC – International Agency for Research on Cancer. **Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans**. Volume 100C: Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts. Lyon: IARC, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Bacias e divisões hidrográficas do Brasil: 2021**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018: primeiros resultados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 69 p. ISBN 978-85-240-

4505-9. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101670.pdf>. Acesso em: 18 de dezembro de 2025.

JÄRUP, L. Hazards of heavy metal contamination. **British Medical Bulletin**, v. 68, p. 167–182, 2003. DOI: 10.1093/bmb/ldg032. Disponível em: <https://www.medicinacomplementar.com.br/biblioteca/pdfs/Cancer/ca-1557.pdf>. Acesso em 14 de dezembro de 2025.

JASIM, M. A.; SOFIAN-AZIRUN, M.; YUSOFF, I.; RAHMAN, M. M. Bioaccumulation and histopathological changes induced by toxicity of mercury (HgCl₂) to tilapia fish *Oreochromis niloticus*. **Sains Malaysiana**, v. 45, p. 119–127, 2016.

KOTTE, M.; SURENDRA, B.; RAVI, V.; RAMESH, K.; VENKATESWARA, P. Human health risk assessment of heavy metal accumulation through fish consumption from Machilipatnam Coast, Andhra Pradesh, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 6, p. 336, 2015.

LABARRÈRE, C. R.; MENEZES, B. D.; MELO, M. M. Avaliação dos teores de zinco em brânquias, carcaça, fígado e musculatura de diferentes espécies de peixes capturados no rio São Francisco (MG, Brasil). **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 20, n. 1, p. 86–91, 2012.

LACERDA, L. D.; BEZERRA, M. F.; COSTA, B. G. B.; BRAGA, T. M.; GOYANNA, F. A. de A. Mercury distribution in fish commercialized at the Mucuripe market, Fortaleza, Ceará State, Brazil. **Arquivos de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 49, n. 1, p. 50–54, 2016. DOI: 10.32360/acmar.v49i1.6159.

LACERDA, L. D.; MALM, O. Contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos: uma análise das áreas críticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 173–190, 2008. DOI: 10.1590/S0103-40142008000200011.

LANGANI-NETO-NETO, F. **Estudo filogenético e revisão taxonômica da família Hemiodontidae Boulenger, 1904 (sensu Roberts, 1974) (Ostariophysi, Characiformes)**. Tese (Doutorado em Zoologia) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

LANGANI-NETO-NETO, F. New species of *Hemiodus* (Ostariophysi, Characiformes, Hemiodontidae) from the rio Tocantins, Brazil, with commentes on color patterns and tooth shapes within the species and genus. **Copéia**, n. 3, p. 718-722, 1999.

LEITE, L. C. S. **Avaliação de risco à saúde humana devido ao consumo de conservas de sardinha comercializadas no Brasil**. Tese (Doutorado em Saúde e Desenvolvimento na Região Centro-Oeste) – Faculdade de Medicina. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2025.

LIMA-JUNIOR, S.E.; CARDONE, I.B.; GOITEIN, R. Determination of a method for calculation of Allometric Condition Factor of fish. **Acta Scientiarum**, v.24, n.2, p.397400, 2002.

MAQUIAVELI, C. C. **Dieta e morfologia trófica de duas espécies simpátricas de peixes voadores (*Hemiodus microlepis* e *Hemiodus unimaculatus*) na região da UHE Luís**

Eduardo Magalhães – TO. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas, Área Zoologia). Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2006.

MAULU, S.; NAWANZI, K.; ABDEL-TAWWAB, M.; KHALIL, H. S. Fish nutritional value as an approach to children's nutrition. **Frontiers in Nutrition**, v. 8, art. 780844, 2021. DOI: 10.3389/fnut.2021.780844.

MARTINS, R. O.; HOFF BRAIT, C. H.; SANTOS, F. F. Avaliação do teor de metais pesados e de parâmetros físico-químicos da água e sedimento do lago bonsucesso, Jataí -GO. **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 29, 2018. DOI: 10.5216/revgeoamb.v0i29.51072.

MELLO, V. F. B. **Otimização do tratamento de lixiviados e corantes por processos físico-químicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Geotecnia Ambiental). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MILETIĆ, A.; LUČIĆ, M.; ONJIA, A. Exposure factors in health risk assessment of heavy metal(loid)s in soil and sediment. **Metals**, v. 13, n. 7, art. 1266, 2023. DOI: 10.3390/met13071266.

MONTEIRO, D. A.; RANTIN, F. T.; KALININ, A. L. Cardiorespiratory responses to graded hypoxia in the neotropical fish matrinxã (*Brycon amazonicus*) and traíra (*Hoplias malabaricus*) after waterborne or trophic exposure to inorganic mercury. **Aquatic Toxicology**, v. 140, p. 346–355, 2013. DOI: 10.1016/j.aquatox.2013.06.011.

MONTEIRO, L. C. **Bioacumulação de mercúrio na cadeia trófica aquática e terrestre de uma planície de inundação neotropical.** Dissertação (Mestrado em Ecologia). Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

MOREIRA, V. A. **Distribuição de metais em espécies de peixes da Baía de Sepetiba – Rio de Janeiro.** Dissertação (Mestrado em Geociências – Geoquímica Ambiental). Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

MUSTATEA, G.; UNGUREANU, E. L. Assessing the presence and health risks of potentially toxic metals in food: a comprehensive overview. **Exploration of Foods and Foodomics**, v. 2, p. 471–496, 2024. DOI: 10.37349/eff.2024.00047.

NOVOTHY, V. Diffuse Sources of pollution by Toxic Metal and Impact on receiving Waters. In: SALOMONS, Win. **Heavy Metals: Problems and Solutions**. 4ed. New York: Springer, 1995. Cap. 3, p. 32-52.

NEEDLEMAN, H. Lead poisoning. **Annual Review of Medicine**, v. 55, p. 209–222, 2004.

OBESO, M. P. **Planejamento energético e a conservação da fauna de peixe na bacia Tocantins–Araguaia: estudo de caso na sub-bacia do Rio do Sono.** Tese (Doutorado em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2023.

OSAE, R.; NUKPEZAH, D.; DARKO, D. A.; KORANTENG, S. S.; MENSAH, A. Accumulation of heavy metals and human health risk assessment of vegetable consumption from a farm within the Korle lagoon catchment. **Heliyon**, v. 9, art. e16005, 2023.

OZMEN, M., GÜNGÖRDÜ, A.; KUCUKBAY, F.Z.; GÜLER, E.R. Monitoring the Effects of Water Pollution on *Cyprinus carpio* in Karakaya Dam Lake, Turkey. **Ecotoxicology**, v. 15, p. 157–169, 2006.

PAVANELLO, A. C. L.; MUCINHATO, R. M. D.; YAMAGUCHI, M. M.; BERTOZZI, J.; SILVA, M. G. G.; KLEINERT, J. J.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Avaliação da bioacumulação de metais em tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). In: **Tópicos em Ciências e Tecnologia de Alimentos: Resultados de Pesquisas Acadêmicas – Volume 3**. São Paulo: Editora Blucher, p. 350- 390, 2019. DOI: 10.5151/9788580392722-15.

PEREIRA, F. O. P.; SANTOS, L.; SANCHES FILHO, P. J. Avaliação da contaminação ambiental por metais pesados, através da análise de peixes coletados da Lagoa Mangureira – RS. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 180–194, 2019. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2019.001.0015.

PORTO, L.C.S.; ETHUR, E.N. Elementos traço na água e em vísceras de peixes da Bacia Hidrográfica Butuí-Icamaquã Rio Grande de Sul, Brasil. **Ciência Rural**, v.39, n.9, p.2512-2518, 2009.

POUILLY, M., PEREZ, T., REJAS, D., GUZMAN, F., CRESPO, G., DUPREY, J.L. & GUIMARAES, J.R.D. Mercury bioaccumulation patterns in fish from the Itenez river basin, Bolivian Amazon. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 83: 8-15. 2012.

PRASAD, A. S. Discovery of human zinc deficiency: its impact on human health and disease. **Advances in Nutrition**, v. 4, p. 176–190, 2013.

RAY, S.; VASHISHTH, R. From water to plate: reviewing the bioaccumulation of heavy metals in fish and unraveling human health risks in the food chain. **Emerging Contaminants**, v. 10, n. 4, art. 100358, 2024. DOI: 10.1016/j.emcon.2024.100358.

REBOUÇAS, A. C. Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v. 13, n. Especial, p. 341-345, 2003

REIS, R. E., KULLANDER, S. O., FERRARIS JR. C. J. **Check List of the Freshwater Fishes of South and Central America**. EDIPUCRS, Porto Alegre, p. 742, 2003.

RIBEIRO, E. V. **Avaliação da qualidade da água do Rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora - MG: metais pesados e atividades antropogênicas**. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RUTTKAY-NEDECKY, B.; NEJDL, L.; GUMULEC, J.; ZITKA, O.; MASARIK, M.; ECKSCHLAGER, T.; KIZEK, R. The role of metallothionein in oxidative stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 3, p. 6044–6066, 2013.

SÁENZ ISLA, L. A. **O uso de peixes em estudos experimentais ecotoxicológicos “in situ”, avaliando os efeitos da poluição aquática urbana em reservatórios**. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre). Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SALAAH, S. M.; EL-KHAYAT, H. M. M.; GABER, H. S. Size-dependent heavy metal and parasite bioaccumulation in *Mugil cephalus* from Lake Manzala: human health risks and fish histopathological lesions. **Scientific Reports**, v. 15, art. 32659, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-19372-1.

SALAAH, S. M.; ZANATY, N.; EL-NAGGAR, M. M. Evaluation of heavy metals contents and the possible risk in the surface water and fish of Lake Qarun, Egypt. **Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries**, v. 26, n. 4, p. 1067–1091, 2022.

SANTOS, A. T.; BEIRÃO, B. V.; SIQUEIRA, F. F. de; MARTINS, I. S.; AGRA, J. U. M.; RAMALHO, J. V.; LOUSADA, J. M.; FIRMIANO, K. R.; MENDES, M. M.; CAMPOS, M. C. S.; CARVALHO, R. P. B. de. Peixes: relatório parcial das análises de bioacumulação de metais e metalóides em peixes. **Instituto Guaicuy**, Belo Horizonte, 22 jul. 2022.

SANTOS FILHO, M. O. M. **Aspectos populacionais e reprodutivos do cubil *Hemiodus unimaculatus* (Ordem: Characiformes; Família: Hemiodontidae) na região de Itacoatiara, AM**. 2016. Relatório de pesquisa (Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia). Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, 2016.

SANTOS, G. M., JÉGU, M. & MÉRONA, B. Catálogo de peixes comerciais do baixo rio Tocantins. Manaus: **Eletronorte/CNPq/INPA**, 1984.

SANTOS, G. M, MÉRONA, B. & JURAS, A. A.; JÉGU, M. Peixes do baixo rio Tocantins: 20 anos depois da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Brasília: **Eletronorte**, 2004.

SANTOS, M. S.; BAGGIO F. H.; ARAÚJO, A. D.; FREITAS, M. O.; COSTA, T. M.; HORN, A. H. Análise da concentração e distribuição de metais pesados na água do Rio das Velhas entre a cidade de Várzea da Palma e o distrito de Barra do Guaicuí — MG. **Revista Cerrados**, v. 16, n. 1, p. 130-158, Montes Claros, 2018.

SAVASSI, L. A. **Efeitos da contaminação por metais pesados e biomarcadores de impacto ambiental em peixes da Bacia do Rio São Francisco, MG**. Tese (Doutorado em Ciências — Biologia Celular). Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SEHONOVA, P.; HARUSTIAKOVA, D.; MIKULA, P.; MEDKOVA, D.; MALACOVA, K.; SVOBODOVA, Z. Do the total mercury concentrations detected in fish from Czech ponds represent a risk for consumers? **Scientific Reports**, v. 12, article 553, 2022. DOI: 10.1038/s41598-021-04561-5.

SHARMA, P.; DUTTA, D.; UDAYAN, A.; NADDA, A. K.; LAM, S. S.; KUMAR, S. Role of microbes in bioaccumulation of heavy metals in municipal solid waste: impacts on plant and human being. **Environmental Pollution**, v. 305, 15 jul. 2022.

SIEGEL, F. R. **Environmental geochemistry of potentially toxic metals**. Berlin: Springer, 2002. 218 p.

SILVA, D. B. **Qualidade de água e sedimento em reservatório**. Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-08072016-103350/en.php>.

SILVA, C. A.; SANTOS, S. O. Avaliação do potencial risco à saúde humana de metais pesados em peixes marinhos consumidos em Aracaju, Maceió e Salvador, Brasil. Embrapa Tabuleiros Costeiros. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 126, Aracaju, 2016. 24 p. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1065517/1/BP126.pdf>. Acesso em: 29 de dezembro de 2025.

SHANKAR, G.; SINHA A.G. SANDHU, J.S. Pulsed Ultrasound Does Not Affect Recovery From Delayed Onset. **Muscle Soreness**, v. 1, n. 5, 2006.

SOUZA, P. A. P. Importância do uso de bioindicadores de qualidade: o caso específico das águas. In: FELICIDADE, N. *et al.* **Uso e gestão dos recursos hídricos no Brasil**. São Carlos: Rima, 2001. p.55-66.

TASLIMA, K.; AL-EMRAN, M.; RAHMAN, M. S.; HASAN, J.; FERDOUS, Z.; ROHANI, M. F.; SHAHJAHAN, M. Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish—A review. **Toxicology Reports**, v. 9, p. 858–868, 2022.

TENJI, D.; MICIC, B.; SIPOS, S.; MILJANOVIC, B.; TEODOROVIC, I.; KAISAREVIC, S. Fish biomarkers from a different perspective: evidence of adaptive strategy of *Abramis brama* (L.) to chemical stress. **Environmental Sciences Europe**, v. 32, art. 47, 2020. DOI: 10.1186/s12302-020-00316-7.

TRINDADE, P. A. A. **Biologia e ecologia trófica de *Hemiodus unimaculatus* (Bloch, 1794) (Characiformes: Hemiodontidae) no rio Araguari, na área de influência da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes, Amapá, Brasil**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

TUNA, C.; COSKUNTUNA, L.; KOC, F. Determination of nutritional value of some legume and grasses. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 7, p. 1750-1753, 2004.

TÜRKMEN, M.; TÜRKMEN, A.; TEPE, Y.; TÖRE, Y.; ATEŞ, A. Determination of metals in fish species from Aegean and Mediterranean Seas. **Food Chemistry**, v. 113, n. 1, p. 233–237, 2009.

UNIÃO EUROPEIA. **Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006**. Official Journal of the European Union, L 119, 5 May 2023, pp. 103–157. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/eng>. Acesso em: 18 de dezembro de 2025.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA Region III risk-based concentration (RBC) table**. Philadelphia: U.S. Environmental Protection Agency, Region III, 2012.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidance manual for assessing human health risks from chemically contaminated fish and**

shellfish. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1989. EPA-503/8-89-002.

USEPA– UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Integrated Risk Information System (IRIS) – Substance Number 5**. Washington, DC: USEPA, 2025. Disponível em: https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=5. Acesso em: 27 de dezembro de 2025.

VOIGT, C. L.; SILVA, C. P. da; CAMPOS, S. X. de. Avaliação da bioacumulação de metais em *Cyprinus carpio* pela interação com sedimento e água de reservatório. **Química Nova**, v. 39, n. 2, p. 180–188, 2016. DOI: 10.5935/0100-4042.20160014.

WAGNER, Y. G.; COELHO, A. B.; TRAVASSOS, G. F. Análise do consumo domiciliar de pescados no Brasil utilizando dados da POF 2017-2018. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 3, e250494, 2023. DOI: 10.1590/1806-9479.2022.250494.

WAICHMAN, A. V.; NUNES, G. S. S.; OLIVEIRA, R.; LÓPEZ-HERAS, I.; RICO, A. Human health risks associated to trace elements and metals in commercial fish from the Brazilian Amazon. **Journal of Environmental Sciences**, v. 148, p. 230–242, 2025. DOI: 10.1016/j.jes.2023.12.029.

WHO – World Health Organization. Arsenic. **Fact sheet**, 2010.

WHO – World Health Organization. Mercury and health. **Fact sheet**, 2017.

ZAHNAN, E.; MAMDOUH, A. Z.; ELBAHNASWY, S.; EL-SON, M. M. A.; RISHA, E.; ELSAYED, A.; EL BARBARY, M. I.; EL SEBAEI, M. G. The impact of heavy metal pollution: bioaccumulation, oxidative stress, and histopathological alterations in fish across diverse habitats. **Aquaculture International**, v. 33, art. 371, 2025. DOI: 10.1007/s10499-025-02045-1.

ZHOU, Q. F.; ZHANG, J.; FU, J.; SHI, J.; JIANG, G. Biomonitoring: an appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. **Analytica Chimica Acta**, v. 606, p. 135–150, 2008.