



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Instituto de Química - INQUI
Programa de Pós-Graduação em Química



Jéssica Girello Mota Viana

**ESTUDO DA BIOMAGNIFICAÇÃO DO MERCÚRIO TOTAL E ORGÂNICO NA
CADEIA TRÓFICA AQUÁTICA NO RIO MADEIRA-RO**

Orientador: Prof. Dr. Felipe André dos Santos

Campo Grande - 2023



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Instituto de Química - INQUI
Programa de Pós-Graduação em Química



Jéssica Girello Mota Viana

**ESTUDO DA BIOMAGNIFICAÇÃO DO MERCÚRIO TOTAL E ORGÂNICO NA
CADEIA TRÓFICA AQUÁTICA NO RIO MADEIRA-RO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Química da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Química.

Orientador: Prof. Dr. Felipe André dos Santos

Campo Grande - 2023

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA
MESTRADO E DOUTORADO**

TERMO DE DEFESA

(X) – Dissertação () – Qualificação () – Tese

ALUNA
JÉSSICA GIRELLO MOTA VIANA

TÍTULO DO TRABALHO
ESTUDO DA BIOMAGNIFICAÇÃO DO MERCÚRIO TOTAL E ORGÂNICO NA CADEIA TRÓFICA AQUÁTICA NO RIO MADEIRA-RO

Defesa de Dissertação de Mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Química – Mestrado e Doutorado (Resolução nº 8/2019) da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos necessários para a titulação no curso.

COMISSÃO EXAMINADORA		
NOME	INSTITUIÇÃO DE ENSINO	ASSINATURA
Felipe André dos Santos	UFMS	_____
Diovany Doffinger Ramos	UFMS	_____
Lincoln Carlos Silva de Oliveira	UFMS	_____
Juliane Cristina Forti	UFMS	_____
Joao Batista Gomes de Souza	UFMS	_____

Campo Grande, 25 de agosto de 2023.

Dedico ao meu esposo Rafael pelo incentivo e por todo apoio.

Ao meu filho Uriel que me dá forças todos os dias para continuar.

Aos meus pais e ao meu querido sogro que sempre acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Química da UFMS de Campo Grande-MS.

Ao Departamento de Ciências Químicas e Biológicas da UNESP de Araraquara-SP.

As empresas Venturo Consultoria Ambiental e Venturo Análises Ambientais.

À CAPES pela bolsa concedida.

Ao Prof. Dr. Felipe André dos Santos pela orientação.

Ao Prof. Dr. Lincoln Carlos Silva de Oliveira por ter me apresentado ao meu orientador, tornando possível que eu fizesse parte desse projeto.

RESUMO

Nesta pesquisa buscou-se compreender de forma mais aprofundada o processo de bioacumulação e biomagnificação do mercúrio, além dos mecanismos de toxicidade deste metal na cadeia trófica aquática do rio Madeira, a fim de identificar se existe contaminação nos organismos primários (base da cadeia) até os quaternários (topo da cadeia) e a partir dos resultados, observar se existem riscos de prejuízos à saúde humana dos que se alimentam de peixes de tal região, baseando-se nas quantidades máximas preconizadas pelas legislações vigentes. Foram coletadas ao longo do rio Madeira, na região de Porto Velho-RO, amostras de águas superficiais, fitoplânctons, zooplânctons, invertebrados e peixes (Branquinha - *Potamorhina latior*, Dourada - *Brachyplatystoma flavicans*). Foram quantificados HgT e MetilHg em água pela técnica de espectrofotometria de fluorescência acoplada a sistema de geração de vapor frio e pré-concentração em coluna de ouro (CVFAS). Para HgT em plânctons, invertebrados e peixes utilizou-se espectrômetro de absorção atômica (AAS) especializado em medir a quantidade de mercúrio em amostras sólidas; para metilHg utilizou-se espectrômetro de fluorescência atômica (AFS). Os resultados quantificados mostraram que a água tem concentração média de HgT 0,024 ug/kg e metilHg ficou abaixo do limite de quantificação, para os fitoplânctons média de HgT 293,132 ug/kg e de metilHg 29,713 ug/kg, para os zooplânctons média de HgT 367,012 ug/kg e de metilHg 37,353 ug/kg, para os invertebrados de HgT 609,310 ug/kg e de metilHg 44,060 ug/kg, para a branquinha média de HgT 385,000 ug/kg e de metilHg 235,000 ug/kg e para a Dourada média de HgT 975,000 ug/kg e de metilHg 790,000 ug/kg. Obtendo assim um crescimento de HgT da seguinte forma: 1244093,5% da água para fitoplânctons, de 1557675,9% da água para o zooplâncton, de 66,0% do zooplâncton para o invertebrado e comparando os peixes um com o outro, pois a branquinha é detritívora, comparada a dourada que é carnívora o aumento é de 153,3%. Os resultados apontam para a evidência de bioacumulação e biomagnificação do mercúrio na teia alimentar aquática do rio Madeira, apesar disso, os peixes estão dentro dos limites estabelecidos pelo Mercosul para concentração de mercúrio, indicando que não apresentam níveis de contaminação que possam representar um risco direto à saúde humana, porém vale ressaltar que é de grande relevância a monitorização e busca pelo controle dessa contaminação para conservar a boa saúde dos ecossistemas aquáticos e garantir uma nutrição segura para as populações.

Palavras chave: Amazonas; xenobiótico; bioacumulação.

ABSTRACT

This research aimed to gain a deeper understanding of the processes of mercury bioaccumulation and biomagnification, as well as the mechanisms of toxicity associated with this metal in the aquatic trophic chain of the Madeira River. The goal was to determine whether contamination exists in organisms ranging from primary (base of the chain) to quaternary (top of the chain) levels. Based on the results, the study aimed to theorize whether there are risks of harm to human health for those consuming fish from this region, considering the maximum allowable quantities set by current regulations. Samples of surface water, phytoplankton, zooplankton, invertebrates, and fish (Branquinha - *Potamorhina latior*; Dourada - *Brachyplatystoma flavicans*) were collected along the Madeira River in the Porto Velho-RO region. Total mercury (HgT) and methylmercury (MeHg) were quantified in water using fluorescence spectrophotometry coupled with cold vapor atomic fluorescence spectrometry and pre-concentration on a gold column (CVAFS). For HgT in plankton, invertebrates, and fish, a specialized atomic absorption spectrometer (AAS) was used to measure mercury concentrations in solid samples. Methylmercury was measured using an atomic fluorescence spectrometer (AFS). The quantified results showed that the average concentration of HgT in water was 0.024 µg/kg, with methylmercury levels below the limit of quantification. For phytoplankton, the average HgT concentration was 293.132 µg/kg, and the average MeHg concentration was 29.713 µg/kg. Zooplankton had an average HgT concentration of 367.012 µg/kg and an average MeHg concentration of 37.353 µg/kg. Invertebrates showed an average HgT concentration of 609.310 µg/kg and an average MeHg concentration of 44.060 µg/kg. The Branquinha fish had an average HgT concentration of 385.000 µg/kg and an average MeHg concentration of 235.000 µg/kg, while the Dourada fish had an average HgT concentration of 975.000 µg/kg and an average MeHg concentration of 790.000 µg/kg. Consequently, the HgT growth occurred as follows: 1244093.5% from water to phytoplankton, 1557675.9% from water to zooplankton, 66.0% from zooplankton to invertebrates. When comparing the two fish species, the Branquinha, which is detritivorous, exhibited a 153.3% increase compared to the carnivorous Dourada. The results indicate evidence of mercury bioaccumulation and biomagnification in the aquatic food web of the Madeira River. Despite this, the fish remain within the limits established by Mercosur for mercury concentrations, suggesting that they do not pose a direct risk to human health. However, it is important to emphasize the significance of monitoring and controlling this contamination to preserve the health of aquatic ecosystems and ensure safe nutrition for populations.

Keywords: Amazon; xenobiotic; bioaccumulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo natural do mercúrio. Fonte: Bisinoti & Jardim, 2004.	16
Figura 2: Ciclo do mercúrio. Fonte: Selin, 2009 (adaptado).....	21
Figura 3: Ciclo do mercúrio vaporizado. Fonte: Francisco, 2021 ; Clarkson, 2003 (Adaptado).	21
Figura 4: Ciclo global do Hg. Fonte: Ramos, 2005; Azevedo, 2003 (Adaptado).	22
Figura 5: Ciclo local do Hg. Fonte: Ramos, 2005; Azevedo, 2003 (Adaptado).	23
Figura 6: Esquema da biomagnificação do mercúrio. Fonte: Autoria própria.....	31
Figura 7: Sistema de limpeza das vidrarias. Fonte: Nunes, 2019.	35
Figura 8: Representação do plano amostral do Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico na região influenciada diretamente e indiretamente pela UHE Jirau, no rio Madeira, e seus afluentes.	38
Figura 9: Espectrofotômetro de Fluorescência Atômica da Brooks Rand Modelo III equipado com coluna de ouro.	41
Figura 10: Espectrômetro de absorção atômica especializado em medir a quantidade de mercúrio em amostras sólidas – aparelho SMS 100 da Perkin Elmer.	42
Figura 11: Operação do aparelho SMS 100 da Perkin Elmer 54.	43
Figura 12: Espectrômetro de fluorescência atômica (AFS) - MERX total mercury and methymercury analyzer systems.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados da literatura com valores de Hg encontrados na região do rio Madeira-RO.	19
Tabela 2: Parâmetros físico-químico em alíquotas de água superficial.	44
Tabela 3: Dados da quantificação de HgT e metilHg em amostras de água superficial.....	47
Tabela 4: Concentração de HgT e metilHg em amostras de fitoplânctons.	49
Tabela 5: Concentração de HgT e metilHg em amostras de zooplânctons.	49
Tabela 6: Concentração de HgT e metilHg em amostras de invertebrados.....	50
Tabela 7: Concentração de HgT e metilHg em amostras de peixes.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS

A: Ampère
cm: Centímetros
d: Densidade
g: Gramas
g.mL⁻¹: Gramas por mililitro
g.mol⁻¹: Gramas por mol
L: Litro
mg/kg: Miligramas por quilo
mg/L: Miligramas por litro
mL: Mililitro
MM: Massa molar
mm: Milímetro
m.m⁻¹: Massa por massa
m.v⁻¹: Massa por volume
ng/L: Nanogramas por litro
NTU: Nephelometric Turbidity Unit
P.A: Padrão Analítico
pH: Potencial de hidrogênio
pg/mL: Picograma por mililitro
rpm: Rotação por minuto
s: Segundos
u: Unidade de massa atômica
ug.kg⁻¹: Microgramas por quilo
ug/g: Microgramas por grama
UHE: Usina hidrelétrica
μL: Microlitros
μm: Micrômetros
μS: Microsiemens
V: Volt
v.v⁻¹: Volume por volume
Ω: Ohms

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Justificativa	13
1.2. Mercúrio	15
1.3. Rio Madeira	18
1.4. Ciclo Biogeoquímico do Mercúrio	20
1.5. Acumulação de Mercúrio em Organismos Aquáticos.....	24
1.6. Efeitos da Contaminação por Mercúrio	26
1.7. Impactos do Mercúrio na Saúde Humana.....	27
1.8. Fontes de Mercúrio.....	28
1.9. Perfis de Concentração de Mercúrio na Extensão da Cadeia Trófica	30
1.10. Revisão de Pesquisas Prévias relatando Contaminação por Hg na Região da Amazônia	31
2. OBJETIVOS.....	33
2.1. Objetivo Geral.....	33
2.2. Objetivos Específicos	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1. Reagentes e Solução	35
3.2. Área de Estudo.....	36
3.3. Amostragem	37
3.3.1. Amostragem de água	38
3.3.2. Amostragem de plânctons.....	38
3.3.3. Amostragem de peixes.....	39
3.3.4. Amostragem de invertebrados	39
3.4. Parâmetros físico-químicos	39
3.5. Digestão de amostras para determinações de Hg total nas águas	40
3.6. Preparo de amostras sólidas para determinações de Hg total	40
3.7. Procedimento para extração de Hg orgânico em amostras sólidas.....	40
3.8. Determinações	40
3.8.1. Determinação de mercúrio total nas amostras de água.....	40
3.8.2. Determinação de Hg total nas amostras sólidas (peixes, plânctons, invertebrados).....	42
3.8.3. Determinação de metilmercúrio nas amostras sólidas.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1. Parâmetros Físicos E Químicos	44
4.2. Concentrações Das Espécies Mercuriais Na Água Superficial	46

4.3. Concentrações De Mercúrio Em Plânctons	48
4.4. Concentrações De Mercúrio Em Peixe	51
5. CONCLUSÃO	54
6. REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

O rio Madeira, um dos mais relevantes afluentes do rio Amazonas, banha praticamente todo o estado de Rondônia, com aproximadamente 3315 km de dimensão (FADANELLI, 2019 ; ANDRADE 2008). Assim como os demais rios da região amazônica, o Madeira contém antecedentes de altas concentrações de mercúrio, onde inicialmente tal contaminação foi relacionada à atividade garimpeira de ouro. Porém, pesquisas revelaram que as concentrações detectadas no decorrer da corrida do ouro são análogas em regiões onde esta atividade é inexistente e essas concentrações de mercúrio total excedem os limites estabelecidos pelas legislações brasileiras (SANTOS, 2013 ; FADINI & JARDIM, 2001).

No ecossistema aquático, encontra-se o mercúrio em diferentes formas químicas: inorgânica, orgânica e como sulfetos. Porém, é o metilmercúrio (metilHg) que causa maior preocupação do ponto de vista ecotoxicológico. Essa forma de mercúrio é tóxica e apresenta um grande poder de bioacumulação por afinidade, consumo de alimentos e por meio da cadeia alimentar aquática. Essa bioacumulação leva ao processo de biomagnificação, no qual o acúmulo de metilmercúrio aumenta na extensão da cadeia trófica em até um milhão de vezes (BISINOTI & JARDIM, 2004).

O metilHg é formado pela metilação do mercúrio inorgânico, o qual ocorre pela transferência de um grupo metil-carbânions (CH_3^-) e pode ocorrer por dois processos: biótico e abióticos. No processo biótico, as bactérias sulfato redutoras são uma das principais vias metilação do mercúrio, no entanto, para acontecer esse processo, precisa existir uma grande biodisponibilidade de mercúrio no ambiente, alinhada com algumas condições ambientais, por exemplo, pH, interações químicas com complexos inorgânicos e orgânicos, potencial redox, temperatura e oxigênio disponível. No processo abiótico, a metilação ocorre de forma química ou fotoquímica, isso acontece por meio de vias não enzimáticas ao reagir com metilcobalamina (excretadas por bactérias) ou por meio de doação de grupos metil provenientes de substâncias húmicas. Porém, em ambos os processos abióticos a reação é lenta e significamente inferior à via enzimática (SILVA & ESTANISLAU, 2015; BISINOTI & JARDIM, 2004).

A contaminação por mercúrio apresenta diversas implicações na saúde humana. O inorgânico, por exemplo, pode causar alterações no sistema neurológico, como distúrbios de personalidade, bem como afetar o fisiológico, resultando em perturbações do sono e sintomas de depressão. Por sua vez, o metilHg possui capacidade de atravessar a barreira hematoencefálica, que possui um arranjo para normalmente dificultar que substâncias nocivas presente no sangue cheguem até o sistema nervoso central, afetando-o, essa propriedade permite que este composto químico atinja diretamente tal sistema, causando danos significativos, além disso, possui a capacidade de atravessar a placenta, resultando em danos ao feto em desenvolvimento. Um exemplo famoso de exposição causada por metilHg, se deu no Japão, na baía de Minamata, onde foram documentados sérios impactos à saúde devido à exposição ao mercúrio (MIRANDA et. al., 2007).

Os peixes também são afetados pela intoxicação por mercúrio, apresentando uma série de problemas relacionados à sua exposição. A ingestão e difusão do mercúrio acontece principalmente nas brânquias e trato digestivo dos peixes, resultando em diversos efeitos negativos, como por exemplo, o enfraquecimento do sistema imunológico, redução da fecundação e inibição do crescimento, além disso, a contaminação pode causar doenças que, em alguns casos, podem levar à morte dos peixes (SILVA & ESTANISLAU, 2015 ; LIMA, 2013).

A contaminação dos peixes por mercúrio está diretamente relacionada à posição que ocupam na cadeia alimentar, em virtude do processo de biomagnificação. Isso significa que seus hábitos alimentares influenciam diretamente o grau de contaminação. Peixes carnívoros, que são predadores alfa, tendem a apresentar altas concentrações de mercúrio em comparação com peixes herbívoros e outros organismos da base da cadeia alimentar (MACHADO, 2016 ; BAIRD, 2011). Embora seja conhecido o processo da biomagnificação do mercúrio, ainda há a necessidade de uma compreensão mais aprofundada e clara desse processo de contaminação na cadeia trófica aquática.

1.2. Mercúrio

O mercúrio, cujo símbolo químico é Hg, era anteriormente conhecido como Hydrargyrum, que significa “prata da água”. No entanto, devido às suas características surpreendentes, como sua rápida mobilidade apesar de seu peso, o elemento recebeu um novo nome. Em homenagem ao Deus Mercúrio da mitologia romana, conhecido como um mensageiro veloz, o elemento recebeu tal nome, essa escolha foi feita devido sua fluidez, que se assemelha à agilidade do deus mencionado (SWIDERSKI, 2008).

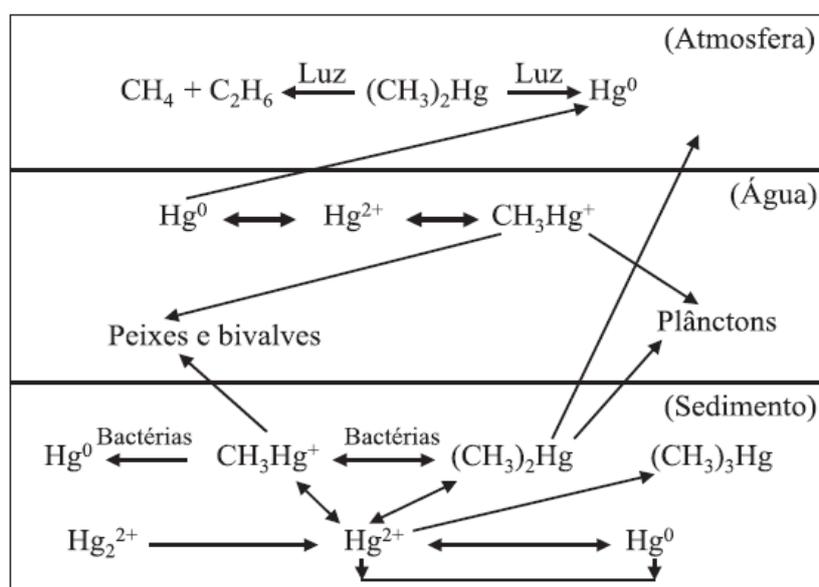
É um metal líquido em sua forma elementar, possui massa de 200,592 u e seu número atômico na tabela periódica é 80. Trata-se de um elemento potencialmente tóxico e apresenta uma alta força de coesão entre seus átomos, resultando em uma característica heterodoxa, o que significa que os átomos participantes nas ligações metálicas têm uma tendência a permanecerem juntos, evitando contato com o mundo exterior. Essa força de coesão é tão intensa que leva à formação de uma esfera, como observada na forma de Hg^0 . Embora seja líquido, o mercúrio não assume a forma do recipiente que foi acometido, ao contrário de outros líquidos, mantém-se em sua forma desejada (KEAN, 2011). Além disso, é um elemento inodoro, possui significativa condutividade elétrica e também insolubilidade em água, no entanto, solubilidade em ácido nítrico e possui a capacidade de formar compostos químicos classificados como orgânicos e inorgânicos (RUPPENTHAL, 2013).

Por não possuir nenhuma função biológica e ser um elemento tóxico, o mercúrio é perigoso e os efeitos nocivos para a saúde irão depender de características como concentração e período de exposição. É denominado xenobiótico, termo que define quais substâncias químicas são estranhas para a vida (ARAÚJO, et. al., 2021).

O ciclo do mercúrio, ilustrado na figura 1, é afetado pela atividade bacteriana e pela radiação solar. As bactérias desempenham um papel crucial na transformação do mercúrio inorgânico em orgânico, impulsionando sua entrada na cadeia alimentar (BISINOTI & JARDIM, 2004). Na atmosfera temos a presença de Hg^0 , isso é um aspecto relevante ao ciclo do mercúrio. Esse mercúrio retorna ao solo após ser solubilizado em água e pode ser reemitido para a atmosfera pelo sistema ar/água.

Esse processo contribui para a dispersão do mercúrio e sua posterior incorporação nos ecossistemas aquáticos. Nos sedimentos dos oceanos o mercúrio se encontra predominantemente em forma de sulfeto (HgS) insolúvel. No entanto, ocorrem processos químicos que transformam o inorgânico para mercúrio orgânico nas águas, proporcionando a base para sua entrada na cadeia trófica, começando pelos plânctons, peixes e bivalves e somando uma concentração muito maior em peixes de topo da cadeia. Essa transformação ocorre tanto nos sedimentos como na coluna d'água (MICARONI, BUENO & JARDIM, 2000).

Figura 1: Ciclo natural do mercúrio. Fonte: Bisinoti & Jardim, 2004.



Da classe de compostos de mercúrio, as espécies mais importantes do ponto de vista ecotoxicológico podem ser divididas em duas categorias: as espécies inorgânicas Hg^0 , Hg^{2+} e Hg_2^{2+} , e as espécies orgânicas, como metilmercúrio e dimetilmercúrio, tais espécies são de particular destaque devido à sua capacidade significativa de sofrer transformações químicas. O metilmercúrio é a espécie mais comum e com maior foco, devido ser uma substância tóxica para o sistema nervoso e ter capacidade de bioacumulação e também de biomagnificação, devido sua maior lipossolubilidade é facilmente absorvido pelo trato digestivo e membranas biológicas de várias espécies e isso facilita seu transporte e a permanência em ambientes aquáticos (MIRANDA, et.al., 2007).

Em sua forma orgânica, o mercúrio tende a ter maior toxicidade do ponto de vista ecotoxicológico, pois estas são neurotoxinas com grande poder de

bioacumulação e biomagnificação, que acontece devido sua alta lipossolubilidade e grande compatibilidade com as proteínas, especificamente nos grupos sulfidrilas (MIRANDA, et. al., 2007).

No organismo ocorre a capacidade de bioacumular por meio da absorção e retenção do mercúrio, junto a sua lenta eliminação e isso ocorre por meio das rotas de contaminação e exposição, bem como pela dieta alimentar. Já a biomagnificação trata-se da relação do aumento da concentração do contaminante ao longo da cadeia trófica e por isso traz prejuízos maiores ao topo da cadeia, sendo assim, os mais prejudicados somos nós, os humanos bem como os peixes carnívoros que são consumidores quaternários. A transferência de mercúrio orgânico por meio dos níveis tróficos por ingestão de alimentos contaminados é o que consiste a biomagnificação, por ser este o meio de transportar essa substância química xenobiótica, resulta na maioria das vezes em maiores concentrações no organismo consumidor comparado ao seu alimento. O mercúrio orgânico, resultante do processo de metilação, é excessivamente tóxico, no qual é absorvido por membranas biológicas e pelo trato digestivo de várias espécies, devido sua lipossolubilidade, o que colabora com sua conservação e carreamento em ambientes aquáticos, além de sua bioacumulação e biomagnificação (FIGUEIREDO, 2015).

Além da cadeia alimentar, outros fatores ambientais desempenham um papel importante na biomagnificação do mercúrio. Por exemplo, a temperatura da água, o fornecimento de nutrientes, o pH e a existência de substâncias químicas podem influenciar a taxa de biomagnificação. Explorar essas influências pode fornecer uma compreensão mais abrangente dos processos envolvidos (LOPES, 2009). A taxa de biomagnificação do mercúrio pode variar entre diferentes espécies de peixes e em diferentes ecossistemas aquáticos. Alguns peixes podem apresentar maior capacidade de acumular e magnificar o mercúrio em comparação a outros. Compreender as razões por trás dessas variações é fundamental para avaliar os riscos específicos associados à contaminação por mercúrio em diferentes áreas e para diferentes organismos (MOURA, 2017).

O entendimento da biomagnificação do mercúrio na cadeia trófica aquática pode contribuir para a evolução no desenvolvimento de estratégias de monitoramento e mitigação da contaminação. Isso pode envolver implementar medidas para controlar

fontes de poluição, por exemplo, programas de monitoramento de qualidade das águas, busca da preservação da biota aquática e a adoção de práticas de manejo sustentável de recursos pesqueiros visando reduzir a propagação do mercúrio.

O consumo de peixes contaminados pode levar à exposição humana ao mercúrio, com potenciais efeitos negativos na função neurológica e no desenvolvimento infantil. Além disso, a contaminação por mercúrio pode afetar a biodiversidade e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos, impactando a flora, a fauna e os processos ecológicos (MENESES, 2016).

A alimentação com peixes trata-se da maior fonte de contaminação em seres humanos, os impactos causados por esta contaminação por mercúrio são amplos, ocorrem na saúde humana e também no ambiente aquático. Um ponto importante a ser considerado é o ciclo do mercúrio, devido à alta toxicidade do metilHg, seu potencial acumulativo na biota e biomagnificação na cadeia trófica aquática, o ciclo que forma tal espécie mercurial é interesse em estudos e isso cresce em grande escala desde o acidente em Minamata (BISINOTI & JARDIM, 2004).

1.3. Rio Madeira

O Madeira, rio afluente do Amazonas, em volume d'água, trata-se de um dos maiores do mundo, correspondente à 1/5 da bacia amazônica, porém possui altos índices de mercúrio. Formado por vários tributários, o sistema do rio Madeira tem o curso sul-norte maior que qualquer outro rio dentro do mesmo trópico (AYRES, 2004).

Segundo Malm (1998) tal histórico de contaminação por mercúrio é de fonte antrópica, para ele, tal feito é proveniente da atividade do garimpo, que foi destacada na década de 80, ano em que considerando a América do Sul, o Brasil ocupou o primeiro lugar em mineração de ouro, extraindo praticamente de 100 a 200 toneladas por ano e quase 90% desse total advindo de garimpos, o que corresponde a aproximadamente 3000 toneladas de mercúrio que foram lançadas no ambiente amazônico para conseguir realizar a extração desta quantidade de Au.

Porém, Fadini & Jardim (2001) analisaram mercurio em regiões do rio Negro, Amazonas, onde não se tem reconhecimento de atividades de garimpo, encontrando assim concentrações de Hg de 5 a 10 vezes maiores do que em regiões de garimpo,

como no Madeira por exemplo. Com os resultados encontrados, concluíram que o mercúrio está presente em grande estoque naturalmente nos solos da região, podendo ser liberado gradativamente por meio de reações que englobam a transformação geoquímica.

Segundo Siqueira (2013) após analisar sedimentos encontrou quantidades de mercúrio que variam de 24,55 a 473,57 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ no rio Madeira e alguns afluentes, sendo estas concentrações iguais aos níveis relatados pela literatura, confirmando a contaminação por mercúrio destes solos. Já Moraes (2014) analisou mercúrio no tecido dos peixes e os resultados foram: dourada 331 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, pacu 81 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ e jaraqui 132 $\mu\text{g.kg}^{-1}$. Outra pesquisa de Bastos & Lacerda (2004) expõe dados de peixes coletados e analisados entre os anos de 1996 e 2000 disponíveis no Laboratório da UNIR, que foram realizados por pesquisadores da área de Biogeoquímica em Rondônia e os valores encontrados foram entre 60 e 680 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ de Hg. A tabela 01 expõe tais dados da literatura.

Tabela 1: Dados da literatura com valores de Hg encontrados na região do rio Madeira-RO.

Rio Madeira		
Sedimentos	Peixes	
Siqueira	Moraes	Bastos & Lacerda
24,55 - 473,57 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	Pacu 81 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	60 - 680 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
	Jaraqui 132 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	
	Dourada 331 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	

É importante ressaltar que o rio Madeira está sendo desmatado, cerca de 12% da sua vegetação já foi eliminada e a maior parte desse percentual ocorreu no território brasileiro (SOUZA, et. al., 2022). O mercúrio contido no solo desmatado escorre para os rios e com isso, atinge a cadeia trófica aquática após sua metilação (RAMOS, et. al., 2020 ; GUIMARÃES, et. al., 2000). Diante deste fato, esta pesquisa buscou analisar se é possível que ocorra comprometimento na qualidade das águas

em relação a quantidade de mercúrio presente no quesito de bioacumulação e biomagnificação deste metal.

1.4. Ciclo Biogeoquímico do Mercúrio

Sobre esse processo natural, devemos destacar o envolvimento da interação entre a atmosfera, a biosfera e a litosfera, ocorrendo por meio de reações químicas redox ativas. Esse ciclo abrange uma série de transformações complexas, incluindo a estruturação de ligações covalentes, além da ocorrência de uma forma volátil do mercúrio (DEMERS & ZAK, 2013).

A liberação, transporte e transformação desse metal pesado ocorrem tanto na atmosfera quanto nos ecossistemas terrestres e aquáticos (ALMEIDA, 2005). O mercúrio atmosférico alcança os corpos d'água doce por meio de processos diretos ou por escoamento de bacias hidrográficas. A espécie predominante é o Hg(II), que passa a Hg(0) por redução e, posteriormente, volatiliza e difunde em direção da atmosfera, como ilustrado na figura 2. Uma parcela do Hg(II) é convertida em metilmercúrio por meio de processos biológicos alimentados por bactérias redutoras de ferro e sulfatos. O metilHg apresenta uma notável habilidade de se bioconcentrar em organismos e, subsequentemente, ocorre a biomagnificação na extensão de toda cadeia trófica. Esse processo é impulsionado pelo fato de que as presas contaminadas com metilHg contribuem para uma maior concentração do metal nos tecidos dos predadores. Como resultado, observam-se concentrações elevadas de metilHg em peixes predadores em comparação à água, em um fator superior a 10^6 (SELIN, 2009).

Ao compreender melhor o ciclo biológico do mercúrio, é possível obter um maior conhecimento sobre a toxicidade desse elemento e de seus compostos. Por exemplo, o vapor de Hg⁰ é emitido por vulcões como mostrado na figura 3 e evapora da superfície da terra, incluindo solos e águas. Após a evaporação o mercúrio se transforma em Hg²⁺ solúvel, que retorna à terra juntamente com a água da chuva e pode ser convertido novamente em vapor por meio de bactérias, sendo lançado novamente na atmosfera. Esse processo permite que o mercúrio circule por longos períodos no ambiente (FRANCISCO, 2021; CLARKSON, 2003). As fontes naturais de

mercúrio incluem o vulcanismo, erosão de rochas e solos e processos biogeoquímicos em corpos d'água (GROTZINGER, 2013).

Figura 2: Ciclo do mercúrio. Fonte: Selin, 2009 (adaptado).

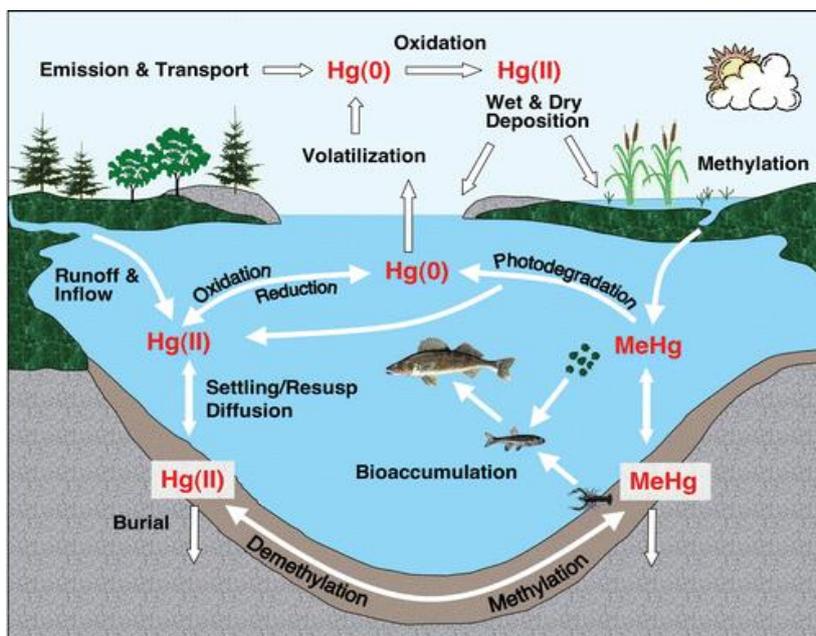
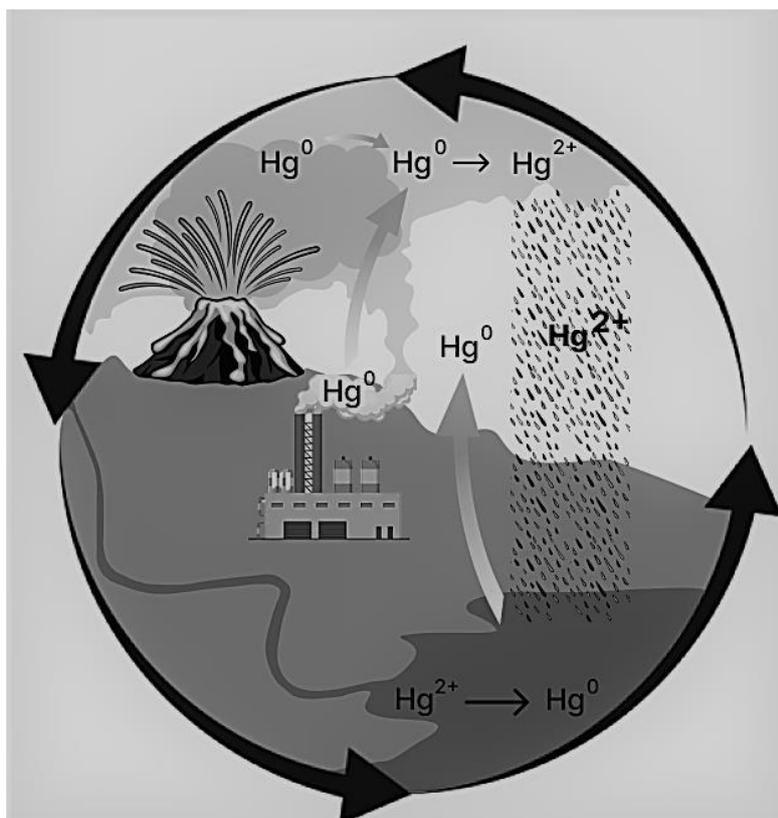
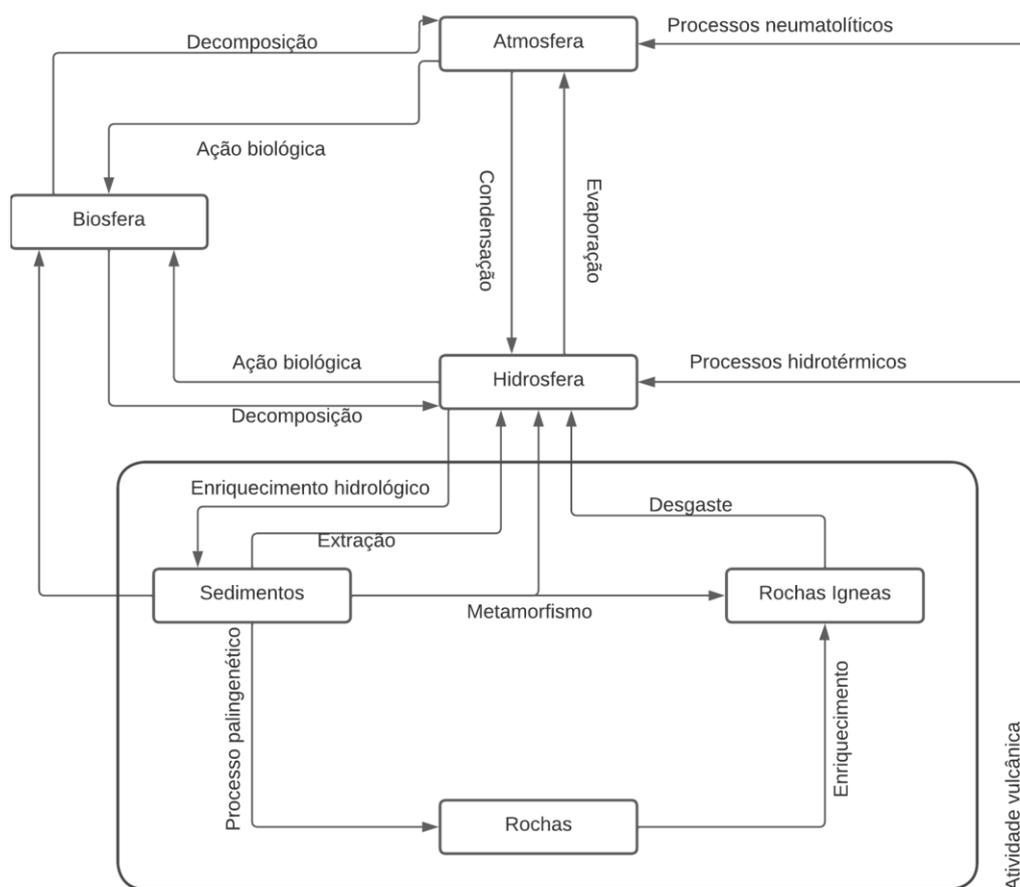


Figura 3: Ciclo do mercúrio vaporizado. Fonte: Francisco, 2021 ; Clarkson, 2003 (Adaptado).



O ciclo do mercúrio no meio ambiente é capaz de ser descrito em dois componentes distintos: ciclo global e ciclo local. Esses ciclos desempenham um papel importante na disposição e carreamento do mercúrio. O global abrange processos naturais de evaporação do mercúrio a partir da desgaseificação da crosta terrestre, ocorrendo tanto em áreas terrestres quanto aquáticas. Esse mercúrio vaporizado é transportado pela circulação atmosférica e, posteriormente, retorna à crosta terrestre através de chuvas e precipitações. A figura 4 ilustra esse ciclo global do mercúrio (RAMOS, 2005; AZEVEDO, 2003).

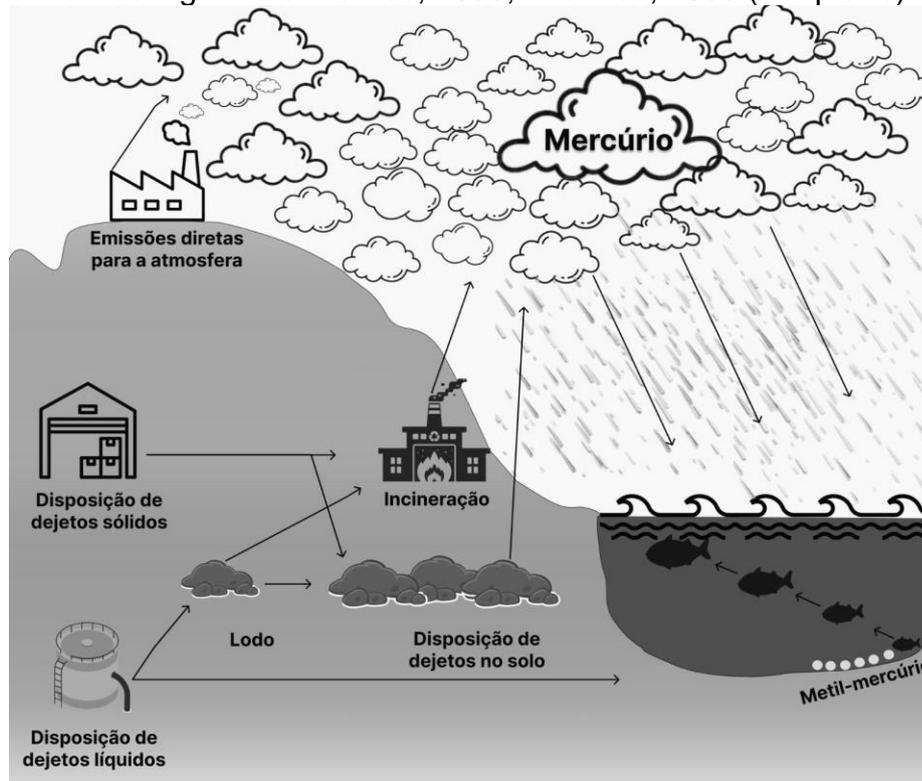
Figura 4: Ciclo global do Hg. Fonte: Ramos, 2005; Azevedo, 2003 (Adaptado).



Por outro lado, o ciclo local está diretamente relacionado às atividades humanas e envolve a emissão de mercúrio proveniente de fontes antropogênicas. Um fator essencial nesse ciclo é a metilação do mercúrio inorgânico, que ocorre através de processos biológicos. A metilação transforma o mercúrio inorgânico em metilmercúrio, uma forma altamente tóxica e facilmente absorvida pelos organismos vivos. Essa transformação é impulsionada principalmente pela atividade de bactérias

redutoras de ferro e sulfatos. A figura 5 apresenta uma representação simplificada desse ciclo local do mercúrio (RAMOS, 2005; AZEVEDO, 2003).

Figura 5: Ciclo local do Hg. Fonte: Ramos, 2005; Azevedo, 2003 (Adaptado).



Compreender esses dois ciclos é essencial para entender a estruturação e os impactos do Hg na natureza. O ciclo global representa as fontes naturais de mercúrio e sua circulação entre a atmosfera, a crosta terrestre e os corpos d'água. Já o ciclo local destaca o papel das atividades humanas na emissão e na transformação do mercúrio, enfatizando a importância da metilação do mercúrio inorgânico. Portanto, ao considerar tanto o ciclo global quanto o ciclo local, podemos obter uma visão mais abrangente do ciclo biogeoquímico do mercúrio e dos fatores que influenciam sua distribuição e contaminação dos ecossistemas.

Os fatores que influenciam o ciclo do mercúrio são diversos e desempenham um papel fundamental na transformação e na mobilidade deste metal nos ecossistemas. Condições ambientais como temperatura, pH, níveis de oxigênio e disponibilidade de nutrientes desempenham um papel fundamental neste ciclo. Alterações nessas condições podem afetar a velocidade das reações químicas e a solubilidade do mercúrio, influenciando sua transformação entre diferentes formas químicas e sua disponibilidade para os organismos (PIMENTEL, 2011).

Além dos fatores ambientais, a atividade humana exerce uma influência significativa no ciclo do mercúrio. Atividades como a mineração de metais nobres como Au e Ag são fontes importantes na liberação de Hg para o ambiente. Durante a atividade de extração desses metais, o Hg é frequentemente utilizado, resultando nas emissões significativas que vão para o ar e a água (DA SILVA, 2020).

A combustão de combustíveis que são fontes de energia também contribui para o espalhamento de mercúrio atmosférico. As emissões provenientes da queima são dispersas na atmosfera e podem ser depositadas nos corpos d'água por meio da chuva ou do escoamento das bacias hidrográficas. Esse mercúrio depositado passa por transformações químicas e biológicas nos ecossistemas aquáticos, afetando a contaminação dos organismos aquáticos (SANTOS, et. al., 2019).

Além disso, o desmatamento tem um impacto significativo no ciclo do mercúrio. Com a remoção da cobertura vegetal, os solos anteriormente protegidos ficam expostos, permitindo o carreamento do mercúrio para o meio aquático por intermédio do escoamento superficial. Esse fato contribui para aumentar a concentração do Hg em ecossistemas hídricos e afeta a contaminação nos organismos presentes na cadeia alimentar (SOUZA, 2020).

Como visto neste tópico, o ciclo do Hg faz parte de um processo que engloba liberação, transporte e transformação desse metal pesado na atmosfera, nos ecossistemas terrestres e aquáticos. O mercúrio atmosférico atinge corpos d'água, onde pode ser transformado em metilmercúrio por meio de processos biológicos. Esse metilmercúrio se bioacumula nos organismos e se biomagnifica na cadeia alimentar, resultando em concentrações elevadas em peixes predadores. Compreender e gerenciar o ciclo do mercúrio é fundamental para mitigar problemas ambientais e relacionados à saúde humana que ocorrem em vista da contaminação por mercúrio.

1.5. Acumulação de Mercúrio em Organismos Aquáticos

A acumulação de mercúrio em organismos aquáticos é complexa e acontece na extensão da cadeia trófica e pode levar à biomagnificação desse metal tóxico. O mercúrio presente no ambiente aquático pode ser absorvido por uma variedade de

organismos, desde os microrganismos até os predadores de topo da cadeia alimentar (KEHRIG, 2011).

A principal forma de mercúrio que se acumula nos tecidos biológicos é o metilmercúrio (CH_3Hg^+), uma forma altamente tóxica e facilmente absorvida pelos organismos. O metilmercúrio é formado a partir do mercúrio inorgânico (Hg^{2+}) por meio de reações químicas que ocorrem principalmente em ambientes aquáticos, especialmente em sedimentos e solos alagados. As bactérias presentes nesses ambientes desempenham um papel principal na conversão do mercúrio inorgânico em metilmercúrio (GOMES, 2014).

Assim que o metilmercúrio é formado, ele pode ser facilmente absorvido pelas plantas aquáticas e pelos organismos que se alimentam delas, como zooplâncton e outros pequenos invertebrados. Esses organismos absorvem o metilmercúrio principalmente através da água, mas também por meio da ingestão de partículas suspensas ou sedimentos contaminados. Conforme a cadeia alimentar avança, o metilmercúrio acumulado nos organismos de níveis tróficos inferiores é transferido para os consumidores subsequentes. Os organismos de níveis tróficos mais altos, como peixes predadores ou mamíferos aquáticos, geralmente apresentam os níveis mais elevados de mercúrio em seus tecidos. Isso ocorre porque o metilmercúrio é acumulado e retido nos tecidos ao longo do tempo, devido à sua tendência de se ligar fortemente a proteínas e outros componentes biológicos (COSTA, 2018).

A biomagnificação do mercúrio é um processo em que os níveis desse metal aumentam progressivamente ao longo da cadeia alimentar, resultando em uma contaminação mais alta nos predadores alfa. Isso ocorre nos organismos que alimentam-se de outros organismos, os quais passam a acumular todo o mercúrio que foi absorvido por suas presas, além do que eles próprios absorveram. Dessa forma, o mercúrio se concentra cada vez mais em níveis tróficos mais altos, levando a níveis perigosos desse metal em predadores no topo da cadeia, como peixes grandes ou mamíferos aquáticos (LIMA, 2013).

A biomagnificação do mercúrio nos organismos aquáticos é preocupante, pois pode levar a efeitos adversos na saúde dos organismos e também na saúde humana, caso os peixes contaminados sejam consumidos por seres humanos (ANGHEBEN,

2019). Essa acumulação de mercúrio em organismos aquáticos é um fenômeno globalmente relevante e precisa ser monitorada e compreendida para melhor gerenciamento dos recursos aquáticos e proteção da saúde dos ecossistemas e das populações humanas.

1.6. Efeitos da Contaminação por Mercúrio

A contaminação por mercúrio apresenta efeitos prejudiciais significativos em organismos aquáticos que dependem do Rio Madeira como habitat. Peixes, aves e mamíferos são particularmente afetados pela presença desse metal tóxico em seus sistemas.

Os peixes, por exemplo, são sensíveis à contaminação por mercúrio devido à sua capacidade de acumulá-lo em seus tecidos, especialmente no músculo, que é frequentemente consumido pelos seres humanos. Altos níveis de mercúrio podem levar a danos neurológicos e imunológicos, alterações bioquímicas, problemas reprodutivos e até mesmo a morte (SANTOS, 2022 ; LIMA, 2013).

As aves que se alimentam de peixes contaminados também sofrem os efeitos negativos do mercúrio. Esse metal pode interferir em seu sistema nervoso, afetando a coordenação motora, a capacidade de voo e a reprodução. Além disso, aves que consomem presas contaminadas podem transferir o mercúrio para seus ovos, comprometendo o desenvolvimento dos embriões (VIEIRA, 2000 ; SCHEUHAMMER, 1987).

Mamíferos que dependem do Rio Madeira, como botos e golfinhos de água-doce, também estão expostos aos efeitos da contaminação por mercúrio. Assim como nos peixes e aves, altos níveis de mercúrio podem causar danos ao sistema reprodutivo desses animais, deficiência do sistema imunológico e até mesmo eventos esporádicos de morte (MOURA, 2009 ; FOSSI & MARSILI, 2003 ; LUEBKE et al., 1997).

Vale destacar que a contaminação por mercúrio no Rio Madeira não afeta apenas os organismos aquáticos diretamente, mas também pode ser um grande perigo para os humanos, pois a alimentação com peixes contaminados,

principalmente os predadores, é fonte comum de ingestão direta de mercúrio, mais relevante em comunidades ribeirinhas.

Portanto, a contaminação por mercúrio apresenta um impacto significativo nos organismos aquáticos do Rio Madeira, afetando peixes, aves e mamíferos que habitam essa região. A proteção e preservação desse ecossistema são fundamentais para evitar a exposição e minimizar os efeitos prejudiciais do mercúrio na fauna aquática e nas comunidades que dependem desses recursos naturais.

1.7. Impactos do Mercúrio na Saúde Humana

O impacto na saúde humana relacionado à ingestão de peixes contaminados com mercúrio no Rio Madeira é uma preocupação importante, uma vez que o sujeito é submetido a um longo período de alimentação com altas concentrações de mercúrio, ocorrem efeitos adversos significativos. O mercúrio trata-se de um metal nocivo, que na maioria das vezes afeta diversos órgãos e sistemas do corpo humano (SISINNO, 2021).

Quando peixes e outros organismos aquáticos consomem alimentos contaminados com mercúrio, eles acumulam esse metal em seus tecidos nas partes mais gordurosas, especialmente o mercúrio orgânico (ALVES, 2016). Se a população local consome esses peixes de forma regular e em quantidades significativas, podem estar em risco de exposição crônica ao mercúrio.

O principal composto de mercúrio preocupante é o metilmercúrio, que é a forma mais tóxica e de maior ocorrência nos peixes contaminados (SIA, 2016 ; JINADASA, 2014). O metilmercúrio pode ser absorvido pelo trato gastrointestinal humano. Estudos mostram que cerca de 95% do metilHg absorvido pelo organismo é resultado da ingestão de peixes contaminados e, em seguida, se distribui para diversos órgãos e tecidos, incluindo o sistema nervoso central (FRANCISCO, 2021 ; HONG, 2012 ; MEADOWS-OLIVER, 2012).

A exposição crônica ao mercúrio desencadeia diversos problemas de saúde, por exemplo, o sistema nervoso é altamente suscetível aos efeitos adversos do mercúrio, especialmente durante o desenvolvimento fetal e em crianças pequenas. A exposição ao mercúrio nessa fase crítica pode resultar em danos significativos ao

sistema nervoso, levando a consequências graves, como distúrbios neurológicos e deficiências intelectuais severas (MARTINS, 2022). A exposição ao mercúrio pode causar danos neurológicos (KHOURY, 2012), incluindo problemas de desenvolvimento cognitivo (LIMA, 2018 ; CARVALHO & GUERRA, 2010), atrasos no desenvolvimento motor (PINHEIRO, 2014 ; SOUZA, et. al., 2014), problemas de memória, distúrbios do comportamento (MEDEIROS, 2022 ; CARDOSO, 2013) e dificuldades de aprendizado (CARVALHO, 2015 ; DUTRA, MONTEIRO E CÂMARA, 2010).

Além disso, o mercúrio também pode afetar o sistema cardiovascular, os rins e o sistema imunológico (GUERRA, 2014). A exposição crônica ao mercúrio tem sido associada a problemas cardiovasculares, que envolvem a elevação da pressão arterial e risco de doenças no coração (DA SILVA GONÇALVES, 2018). Em relação aos rins, o mercúrio pode causar danos aos glomérulos renais e levar a problemas de função renal (REBELO, 2016).

A população local que depende do Rio Madeira como fonte de alimentos e subsistência pode estar em risco de exposição ao mercúrio. Portanto, é essencial implementar medidas de segurança para proteger a saúde dessas comunidades.

1.8. Fontes de Mercúrio

O Rio Madeira, como muitos outros corpos d'água ao redor do mundo, enfrenta a problemática da contaminação por mercúrio. Diversas fontes contribuem para a presença desse metal no rio, resultando em potenciais impactos negativos para os ecossistemas aquáticos e as comunidades que dependem dele. A seguir, serão discutidas algumas das fontes significativas de Hg no Rio Madeira.

Mineração de ouro: Esta atividade trata-se de uma das fontes mais significativas de despejo de mercúrio no meio ambiente. O mercúrio é frequentemente utilizado na extração de ouro por amalgamação, formando uma liga com o metal precioso. No entanto, durante esse processo, uma quantidade significativa de mercúrio acaba sendo liberada no ambiente, podendo alcançar os rios e cursos d'água, através do despejo de efluentes e rejeitos de mineração (POZZETTI, 2022).

Atividades industriais: Algumas indústrias também podem ser fontes de contaminação por mercúrio. Processos industriais que utilizam ou liberam mercúrio, como a produção de cloro e soda cáustica (GUZMÁN, 2020 ; ASPO, 2006), a fabricação de lâmpadas fluorescentes, baterias e de defensivos agrícolas (DE SOUZA GAMA, 2020 ; LACERDA, 1997), podem contribuir para a contaminação do Rio Madeira. Efluentes industriais contendo mercúrio podem ser liberados diretamente nos corpos d'água, resultando em uma potencial contaminação.

Descarte inadequado de resíduos: O descarte inadequado de resíduos contendo mercúrio é outra fonte relevante de contaminação (ARRUDA, et. al., 2023 ; PRIMACK & RODRIGUES, 2001). Lâmpadas fluorescentes, termômetros, pilhas e baterias são exemplos de produtos que podem conter mercúrio e, quando descartados de maneira incorreta, podem contaminar o solo e a água, chegando ao Rio Madeira por meio de escoamentos e lixiviação.

Sedimentos naturais e atividades vulcânicas: Embora as atividades humanas sejam importantes fontes de mercúrio, também é importante considerar as fontes naturais desse metal. O mercúrio pode ser encontrado naturalmente nos sedimentos dos rios e ser liberado em pequenas quantidades durante processos erosivos (GARCIA, 2019 ; FERREIRA, 2006). Além disso, atividades vulcânicas podem liberar mercúrio para a atmosfera, que pode ser depositado nos corpos d'água por meio da chuva (FRANCISCO, 2021; CLARKSON, 2003).

A compreensão das fontes de mercúrio no Rio Madeira é essencial para o desenvolver ações de mitigação e domínio da contaminação. A regulamentação adequada das atividades de mineração, o tratamento de efluentes industriais, o incentivo ao descarte seguro de produtos contendo mercúrio, a implementação de ações sustentáveis para medidas de redução da contaminação por mercúrio e também proteger o ecossistema aquático do Rio Madeira envolvendo assim as comunidades que dependem dele. Além disso, a conscientização e a educação sobre os riscos associados ao mercúrio são fundamentais para promover a conservação ambiental e a saúde pública.

1.9. Perfis de Concentração de Mercúrio na Extensão da Cadeia Trófica

A fim de compreender o comportamento do mercúrio na extensão da cadeia trófica aquática no Madeira, é importante analisar os perfis de concentração do mercúrio em diferentes níveis tróficos. Essa análise permitirá identificar possíveis padrões de biomagnificação, ou seja, o aumento dos níveis de mercúrio à medida que se avança na cadeia alimentar. A seguir, vamos abordar os possíveis meios de se analisar o mercúrio nos níveis tróficos.

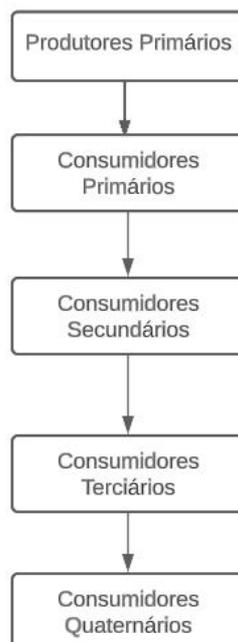
Os estudos iniciam com coletas de amostras de produtores primários, como algas (SILVA, 2018), macrófitas aquáticas (KUTTER, 2006) e os fitoplânctons (LACERDA & MALM, 2008), esses organismos realizam a fotossíntese, convertendo energia solar em energia química e servindo como base da cadeia trófica aquática (DOS SANTOS, 2007). Tais espécies são expostas principalmente ao mercúrio dissolvido na água e presentes no sedimento (ECOTOXICOL, 2007).

Em seguida, amostras de organismos herbívoros, como pequenos peixes, zooplânctons e crustáceos, que se alimentam dos produtores primários, são coletadas, estes são chamados de consumidores primários. Nessa etapa, observa-se se houve algum aumento significativo nos níveis de mercúrio em relação aos produtores primários. Isso pode indicar a presença de biomagnificação nos primeiros níveis tróficos (RODRIGUES, 2006 ; ODUM, 1988).

Ao prosseguir para níveis tróficos mais elevados, como peixes predadores medianos e grandes, também as aves e os mamíferos aquáticos, é esperado que os níveis de mercúrio sejam ainda mais elevados. Esses organismos consomem presas que já podem ter biomagnificado o mercúrio em seus tecidos, sendo assim, são mais prejudicados (USEPA, 2000). Na figura 6 vemos o esquema da biomagnificação do mercúrio.

Portanto, é fundamental analisar a concentração de mercúrio nesses predadores intermediários para verificar a ocorrência de biomagnificação. Esses resultados contribuem no entendimento que envolvem o processo da biomagnificação mercurial em ecossistemas aquáticos, como o do rio Madeira, fornecendo informações importantes para a avaliação de riscos ambientais e concomitantemente para os seres humanos.

Figura 6: Esquema da biomagnificação do mercúrio. Fonte: Autoria própria.



1.10. Revisão de Pesquisas Prévias relatando Contaminação por Hg na Região da Amazônia

HACON *et. al.*, 2020 em seu artigo “Mercury Exposure through Fish Consumption in Traditional Communities in the Brazilian Northern Amazon” aborda um estudo conduzido no Estado do Amapá, analisou a presença de Hg nos peixes de distintas regiões do estado. Foram selecionados cinco rios, coletaram exemplares de tecido de 428 peixes, sendo 45 espécies em 18 locais de amostragem. Analisou-se as concentrações de Hg total por espectrometria de fluorescência atômica de vapor frio, onde dados foram analisados para determinar divergências em concentrações de Hg nos locais de amostragem e de acordo com a hierarquia trófica dos peixes.

Os resultados mostraram que todos os peixes analisados demonstraram concentrações detectáveis de mercúrio, onde 28,7% deles excedem o parâmetro de mercúrio estabelecido pela OMS para consumo humano, estipulado em 0,5 ug/g. Os peixes carnívoros apresentaram as concentrações mais elevadas de mercúrio, seguidos pelos peixes onívoros e herbívoros. Foram observadas variações notáveis nos teores de mercúrio quando comparadas com os diferentes patamares tróficos dos peixes.

As amostras de peixes de nível trófico mais elevado, apresentaram concentrações de mercúrio significativamente mais altas em comparação com os peixes de grau trófico inferior. Essas diferenças ressaltam a bioacumulação do Hg ao nível trófico aquático e a importância em considerar a posição alimentar ao estudar os prejuízos à saúde humana e ao ecossistema aquático. Chegaram a conclusão que a presença de mercúrio em peixes nas regiões estudadas representa um risco para a saúde humana, especialmente para as comunidades que consomem quantidades significativas de peixe.

Já em seu artigo “The Influence of Changes in Lifestyle and Mercury Exposure in Riverine Populations of the Madeira River (Amazon Basin) near a Hydroelectric Project” de 2014, HACON *et. al.* descreve uma pesquisa que avaliou o contato com o mercúrio, as quantidades de mercúrio nos peixes, além dos hábitos de consumo de peixes em populações ribeirinhas nas margens do Madeira, perto da central hidroelétrica de Santo Antônio, antes do alagamento do reservatório no período de maio de 2009 a abril de 2011.

O estudo incluiu comunidades ribeirinhas ascendentes e descendentes do projeto da represa e optou por amostras de peixes que são mais consumidos pelos ribeirinhos. Foram aplicados questionários para obter informações sobre a situação socioeconômica, estilo de vida, demografia, histórico ocupacional, morbidade referida e consumo de peixe. Também foram coletadas amostras de cabelo para determinação de Hg total nos participantes. Em relação ao contato com mercúrio, encontraram-se diferentes concentrações nos peixes e nos cabelos dos participantes, dependendo da área de estudo.

Mais de 1500 espécimes de peixes analisadas para a quantificação de mercúrio total no músculo, utilizando o método de espectrofotometria de absorção atômica com vapor frio. A análise estatística revelou associações relacionadas à ingestão de peixe e o resultado da quantificação de mercúrio no cabelo. Isso indica que a ingestão de peixes contaminados pode influenciar diretamente nos níveis de mercúrio presentes no organismo humano, conforme indicado pela concentração detectada nos cabelos.

O artigo “Análise temporal da exposição ao mercúrio na população ribeirinha da Amazônia: revisão integrativa” dos autores GOMES *et. al.* de 2021, busca na literatura pesquisas científicas que foram publicados entres os anos de 2013 e 2021 sobre o mercúrio. O intuito do estudo foi observar os efeitos no emocional e na coordenação motora de ribeirinhos que estão em contato com o mercúrio na Amazônia e quantificar o teor de mercúrio em peixes e sedimentos de rios amazônicos.

Os resultados da pesquisa indicaram que os ribeirinhos da Amazônia estão em contato com o mercúrio devido ao consumo de peixes contaminados. Foram encontrados sinais de distúrbios motores e também emocionais, com maior concentração em algumas regiões. A exposição ao mercúrio foi associada a ingestão de peixe e foram encontradas maiores quantidades em adolescentes, também relacionou-se a presença de parasitas e baixa taxa de crescimento. Além disso, foi constatada alta concentração de Hg em peixes de rios amazônicos, mais relevante em peixes carnívoros, o que aumenta a exposição da população. No entanto, os níveis de mercúrio em peixes estão abaixo dos limites recomendados para consumo semanal. Foi constatada a biomagnificação de metilmercúrio em amostras de peixes, com concentrações variando de acordo com os seus hábitos alimentares.

Os resultados mostraram que as comunidades ribeirinhas dependem da pesca como fonte de alimento central e subsistência, aumentando sua exposição ao mercúrio. Além disso, a atividade de garimpo na região tem contribuído para a contaminação dos peixes com mercúrio. Os estudos também identificaram manifestações emocionais, motoras e neurológicas associadas à exposição ao mercúrio. Todavia, as concentrações de mercúrio encontradas nas amostras de peixes não ultrapassaram os limites recomendados para consumo semanal.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

- Investigar ao longo da cadeia trófica aquática a biomagnificação do mercúrio na bacia do rio Madeira, em Rondônia, buscando obter uma compreensão mais aprofundada de tal processo na localidade estudada.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a distribuição e determinar as concentrações de mercúrio total e metilmercúrio em água, plânctons, invertebrados e peixes;
- Avaliar a biodisponibilidade do mercúrio nesta região;
- Avaliar o impacto ambiental referente à ação antrópica desenvolvida na região estudada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os materiais e equipamentos necessários para a execução deste experimento foram adquiridos em parceria com a empresa Venturo de Araraquara/SP e INQUI - UFMS/MS. Utilizaram-se os seguintes equipamentos e materiais:

- Areia revestida com fina camada de ouro: Empregada na preparação das colunas de amostragem de vapor de mercúrio;
- Balança de precisão analítica Sartorius modelo 2432, com peso máximo suportado de 200 g;
- Cubas de Vidro de 5 L;
- Espectrômetro de absorção atômica por pirólise - dedicado, da marca Perkin Elmer, modelo SMS 100;
- Espectrômetro de fluorescência atômica, da marca Brooks Rand, modelo III;
- Tubos de quartzo com aproximadamente 7 mm de diâmetro e 10 cm de largura, usado para construção das colunas de amostragem;
- Medidor de pH transportável, da marca Orion modelo 250 A;
- Agitador orbital de rotação circular horizontal da marca Tecnal, modelo TE-145;
- Micropipetadores automáticos, com volumes fixos e variáveis das marcas VWR e Finnpipe Labsystems;
- Sistema de purificação/destilação de água Millipore-Multi-Q;

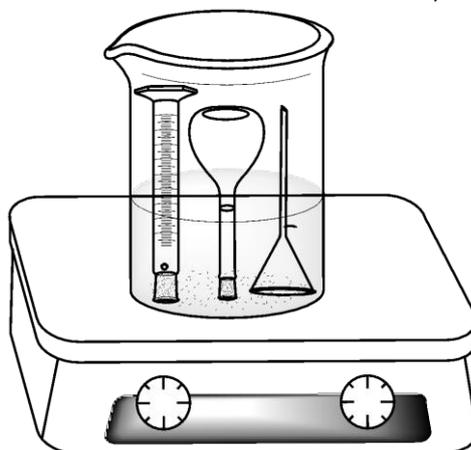
- Sonda multiparâmetros YSI 600Qs;
- Vidrarias de laboratório com alta precisão analítica.

3.1. Reagentes e Solução

Todos os compostos químicos utilizados possuíam grau de pureza analítica, no preparo das soluções utilizou-se água deionizada, resultante do sistema de purificação/destilação.

A descontaminação dos recipientes plásticos e dos outros utensílios utilizados se deu pelo método de inserção em ácido nítrico 20% (v.v⁻¹) por 12h. As vidrarias utilizadas foram descontaminadas segundo o método proposto por TSCHOPEL *et al.*, de 1980, que consiste em submetê-las ao vapor concentrado de ácido nítrico. Mais precisamente, o método envolve posicionar a vidraria com o fundo voltado para cima em um suporte de vidro fixado dentro de um béquer de 5 litros com um volume de aproximadamente 300 mL de ácido nítrico concentrado e este sistema é fechado com vidro de relógio. Então o béquer é transferido para a chapa de aquecimento onde permanece continuamente em estado de refluxo por um tempo mínimo de duas horas (Figura 7). Posteriormente, a limpeza dos materiais é finalizada com H₂O deionizada e então podem ser colocados para secagem em temperatura ambiente.

Figura 7: Sistema de limpeza das vidrarias. Fonte: Nunes, 2019.



Os seguintes reagentes/soluções foram utilizados:

- Ácido Clorídrico (HCl), d (25°C) = 1,19 g.mL⁻¹, título = 37% (m.m⁻¹), MM = 36,46 g.mol⁻¹;
- Ácido Nítrico (HNO₃), MM = 63,012 g.mol⁻¹, 65% P.A, Synth;
- Ácido Nítrico (HNO₃) 20%, MM = 63,012 g.mol⁻¹: Pipetou-se 307,7 mL de HNO₃ concentrado (Synth) e introduziu-se para um balão com volume de 1000 mL e aferiu-se com H₂O deionizada até o menisco;
- Diclorometano (CH₂Cl₂) em grau HPLC, MM = 84,93 g. mol⁻¹, d (20°C) = 1,33 g.mL⁻¹, PanReac AppliChem;
- Cloreto de Potássio (KCl) P.A, MM = 74,55 g.mol⁻¹, d = 1,98 g.mL⁻¹, Synth;
- Cloreto de estanho (II) (SnCl₂.H₂O), 20% (m.v⁻¹), MM = 225,63 g.mol⁻¹: em um béquer pesou-se em balança analítica 20 g de SnCl₂ e utilizou-se 10 mL de HCl concentrado destilado, então este béquer permaneceu em chapa aquecedora até todo o sal se solubilizar. Esperou-se até o resfriamento da solução e transportou-se para um balão contendo um volume de 100 mL e aferiu-se a solução até o menisco com H₂O deionizada.
- Cloridrato de hidroxilamina (NH₂OH.HCl), MM = 69,49 g.mol⁻¹: Em um béquer pesou-se 1,5 g de cloridrato de hidroxilamina e dissolveu-se em H₂O deionizada, então foi transferido para um balão volumétrico de 50 mL e aferindo até o menisco com H₂O deionizada. Adicionou-se uma solução de 50 µL de cloreto estanhoso 20% m.v⁻¹ e purgou-se com N₂ livre de Hg por 1 hora;
- Hidróxido de sódio (NaOH), MM = 40,00 g mol⁻¹, 0,1 mol.L⁻¹: em um béquer mediu-se o peso de 4 g de NaOH, esta quantidade foi transferida para um balão volumétrico de 1000 mL e aferida com H₂O deionizada até o menisco.

3.2 Área de Estudo

O rio Madeira é um dos afluentes mais importantes do rio Amazonas, tem como características suas águas brancas (originárias da região Andina), ricas em sólidos suspensos (nutrientes e sais minerais), com pH neutro e com pouca quantidade de material orgânico. A variabilidade anual média do nível de água no rio tem variação

dentro da faixa de 10,8 - 12,4 metros, contendo de 50 - 68 mg/L de íons provenientes de sais e 15 - 359 mg/L de partículas sólidas sob suspensão (MARQUES, 2002 ; GAO *et al*, 2003). Devido à elevada quantidade de partículas suspensas e sedimentos que carrega, é categorizado como um meio de transporte e disseminação de contaminantes orgânicos e inorgânicos, como por exemplo os metais.

As ações antrópicas como a pesca, agricultura e a garimpagem de ouro são as principais atividades econômicas das populações ribeirinhas, porém em específico o garimpo de ouro perturba gravemente o ambiente, devido a liberação de mercúrio no ecossistema. Essa prática atingiu seu ponto máximo na década de 80 quando ocorreu a autorização da exploração da Reserva Garimpeira de Ouro do rio Madeira. Presume-se que aproximadamente 87 toneladas de mercúrio foram despejadas no ambiente (ROMANOWSKI, 2001).

Independente da origem do mercúrio, seja de procedência natural ou antrópica, ao ingressar nos ecossistemas aquáticos é incorporado em ciclos biogeoquímicos controlador por microrganismos, nos quais sofrerão transformações químicas que envolvem a bioacumulação e a biomagnificação nos níveis tróficos. Conseqüentemente, os peixes predadores podem acumular 16 níveis elevados de mercúrio e atuar como portadores deste elemento químico para seus consumidores, como répteis, aves e também seres humanos.

Todo o procedimento metodológico que engloba as atividades de campo, incluindo a definição das estações de coleta de amostras, foram realizadas por pesquisadores envolvidos no Programa de Monitoramento do Comportamento de mercúrio na Área da UHE Jirau, projeto este subsidiado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Os pontos amostrais do estudo estão apresentados de forma detalhada na Figura 8.

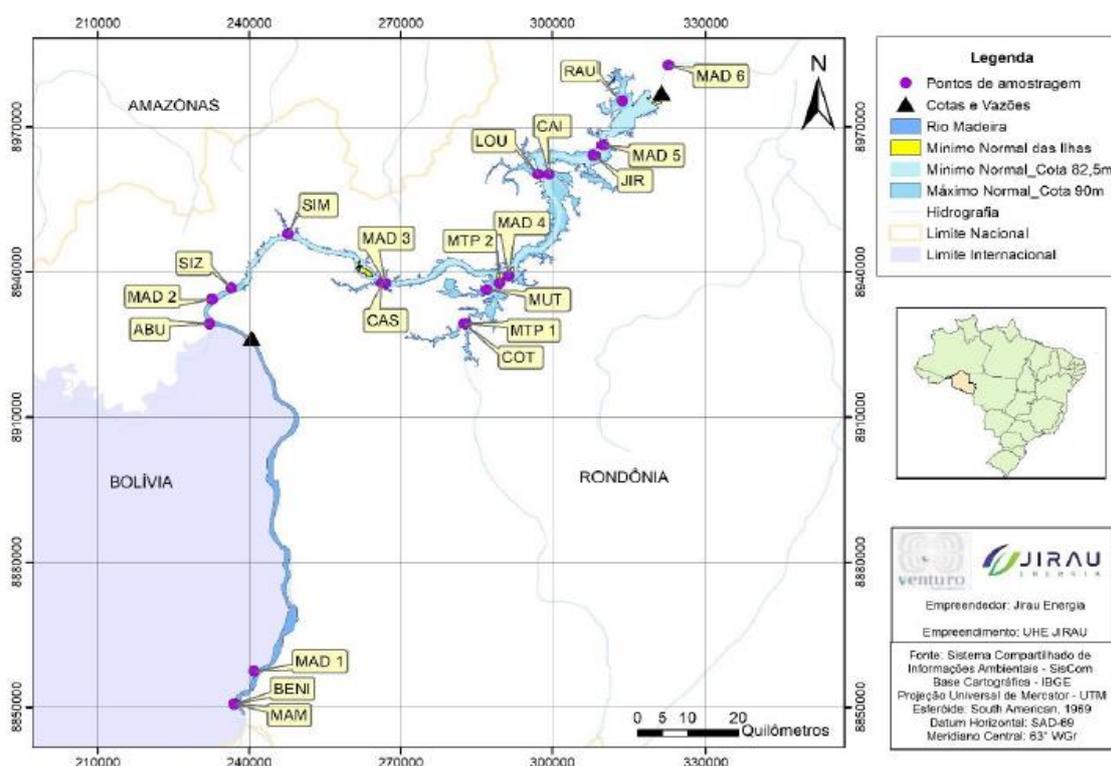
3.3. Amostragem

Neste estudo os pontos amostrais foram ao longo do rio Madeira sendo; Mad. 1, Mad. 2, Mad. 3, Mad. 4 localizados a montante da UHE e Mad. 5 e Mad. 6, localizados a jusante da UHE.

3.3.1. Amostragem de água

A coleta das amostras de água foram nos pontos citados acima do reservatório, devido ao ambiente aquático ser lótico, foi coletado apenas água superficial, aproximadamente 1 L por ponto, em seguida foram preservadas com solução de ácido nítrico (HNO_3 65% ultra puro, Merck), assegurando que o pH da amostra permaneça abaixo de 2,0 até a realização das análises, seguindo as diretrizes da EPA (Environmental Protection Agency). No campo, todas as amostras foram devidamente identificadas e mantidas a uma temperatura de 4°C até a realização das análises.

Figura 8: Representação do plano amostral do Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico na região influenciada diretamente e indiretamente pela UHE Jirau, no rio Madeira, e seus afluentes.



3.3.2. Amostragem de plânctons

As coletas das amostras de fitoplâncton foram realizadas por meio de uma rede com malha de abertura de 15 μm . Posteriormente, as amostras foram lavadas com água de elevada pureza e passaram por um processo de centrifugação para remover quaisquer sólidos em suspensão que estivessem aderidos. Cada amostra foi filtrada a partir de 1.000 L de água, utilizando uma rede de plâncton com abertura de malha de 15 μm . Todas as amostras foram identificadas no próprio local de coleta e, em

seguida, conservadas a uma temperatura de 4°C até o momento das análises. O mesmo processo ocorreu para os zooplânctons, porém, a rede possui abertura de malha de 68 µm.

3.3.3. Amostragem de peixes

Foram selecionadas espécies chaves para a avaliação da biomagnificação do Hg, uma que apresenta hábito alimentar herbívoro (*Potamorhina latior*) e outra com hábito carnívoro (*Brachyplatystoma avicans*), o qual potencializa os impactos da bioacumulação e biomagnificação do mercúrio devido ao consumo significativo dos povos tradicionais do rio Madeira. Após as coletas dos peixes, os mesmos foram eutanasiados por aprofundamento do plano anestésico em solução de eugenol a 450 mg L⁻¹ seguido de secção medular, pesados e medidos; e necropsiados para a coleta do tecido muscular. O tecido foi armazenado em sacos de polietileno e preservado sob congelamento até ser preparado e analisado.

3.3.4. Amostragem de invertebrados

As capturas dos invertebrados aquáticos foram realizadas por meio de rede de arrasto com malha de 250 µm para coletar sob a superfície da água. As amostras do substrato na superfície do sedimento foram coletadas com o auxílio da draga de Eckman e, posteriormente, passaram por peneiramento para assim separar os animais do material orgânico. Todas as amostras foram identificadas no local de coleta e mantidas sob refrigeração a 4°C até o momento da análise.

3.4. Parâmetros físico-químicos

Os parâmetros físico-químicos compreendem os descritos no “STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER” da AWWA (1998) 21ª edição. No local de coleta, os parâmetros como pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido (OD), turbidez e temperatura da água foram determinados utilizando dispositivos portáteis e também uma sonda multiparamétrica, YSI 600 QS previamente calibrada.

3.5. Digestão de amostras para determinações de Hg total nas águas

Primeiramente, as amostras de água foram transferidas de 0,5 mL para béqueres de 250 mL de capacidade. Em seguida, sob agitação, acrescentaram-se 3,0 mL de solução de peróxido de hidrogênio 30% (v/v) e as amostras foram deixadas em repouso por 12 horas. Após esse período, adicionaram-se alíquotas de 1,0 mL de ácido nítrico concentrado e 4,0 mL de ácido sulfúrico concentrado. Os béqueres foram cobertos com filme plástico contendo pequenos orifícios para permitir o refluxo e a saída dos vapores, e em seguida foram mantidos a 60°C por 2 horas em uma chapa aquecedora. Posteriormente, 15,0 mL de solução de permanganato de potássio foram adicionados sob leve agitação, e a mistura foi deixada em repouso por 12 horas. A solução resultante foi transferida para balões volumétricos de 25 mL e aferiu-se os volumes com água ultrapura (CHANG, 2006).

3.6. Preparo de amostras sólidas para determinações de Hg total

Não houve necessidade de efetuar a digestão das amostras mencionadas acima, pois a quantificação foi conduzida por um espectrômetro de absorção atômica, modelo SMS 100 da Perkin Elmer, que necessita apenas da secagem natural das amostras como tratamento prévio.

3.7. Procedimento para extração de Hg orgânico em amostras sólidas

Foram introduzidos 5,0 mL de uma solução de HCl 6,0 mol L⁻¹ em um recipiente de Teflon, contendo 0,5 - 2,0 g de das amostras (peixes, plânctons, invertebrados). Então a mistura foi submetida ao processo de ultrassom por 15 minutos. Em seguida, adicionou-se 10,0 mL de CH₂Cl₂ agitando-a por 12 horas a 150 rpm. A fase aquosa foi decantada e a fase orgânica, contendo o cloreto de metileno foi transferida para outro recipiente de Teflon contendo 100 mL de água ultrapura (BISINOTI, 2005).

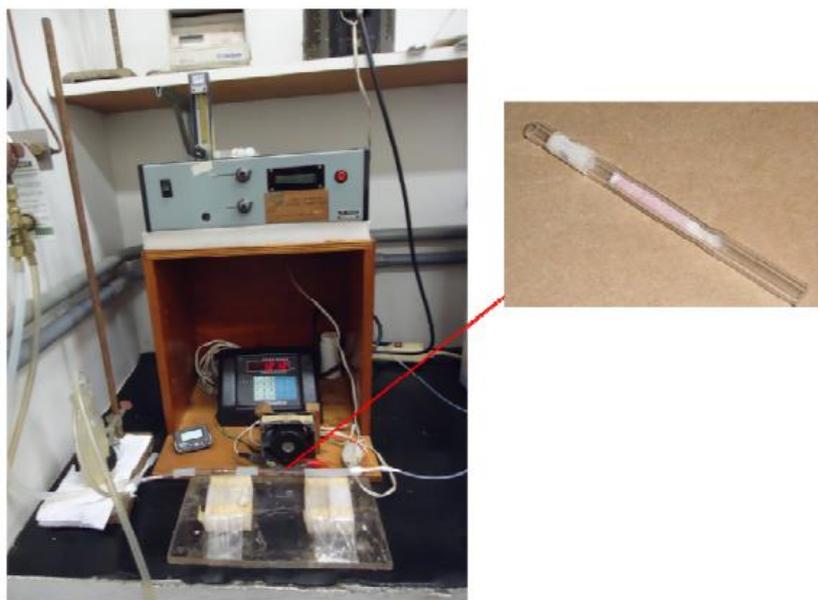
3.8. Determinações

3.8.1. Determinação de mercúrio total nas amostras de água

As determinações de mercúrio total nas amostras de água foram realizadas por espectrofotometria de fluorescência atômica de vapor frio (CVAFS), empregando

um equipamento da Brooks Rand Modelo III que pode ser visto na Figura 11. O gás de arraste utilizado foi o argônio e a medição foi realizada a um comprimento de onda de 254,0 nm. Por meio dessa técnica, é possível alcançar um limite de detecção super sensível, chegando a apenas 1,0 picograma por mililitro (pg/mL). Amostras digeridas em alíquotas de 100 mL foram transferidas para um frasco borbulhador, ao qual se adicionou SnCl_2 para converter Hg^{2+} a Hg^0 . O mercúrio elementar (Hg^0) é carregado pelo gás (argônio) e amalgamado em uma coluna de ouro. Posteriormente, essa coluna é aquecida a 450°C , resultando na liberação do mercúrio amalgamado para uma segunda coluna analítica. Após as amostras passarem pela segunda coluna, foram igualmente submetidas a um aquecimento de 450°C , permitindo que o mercúrio elementar liberado fosse conduzido até o detector do equipamento por uma corrente de argônio que havia sido previamente purificado em coluna preenchida com areia de ouro. É importante notar que, embora as espécies HgCl_2 , CH_3HgCl e CH_3HgCH_3 possam estar presentes no ar e serem facilmente amalgamadas, o espectrômetro de fluorescência atômica é capaz de detectar apenas o Hg^0 (MAGARELLI & FOSTIER, 2005).

Figura 9: Espectrofotômetro de Fluorescência Atômica da Brooks Rand Modelo III equipado com coluna de ouro.



3.8.2. Determinação de Hg total nas amostras sólidas (peixes, plânctons, invertebrados)

A determinação da quantidade de mercúrio total foi realizada empregando um analisador automatizado para a medição direta de mercúrio através de decomposição térmica e amalgamação em coluna de ouro, utilizando o equipamento SMS 100 Solid Mercury Analysis Systems da Perkin Elmer exposto na Figura 9.

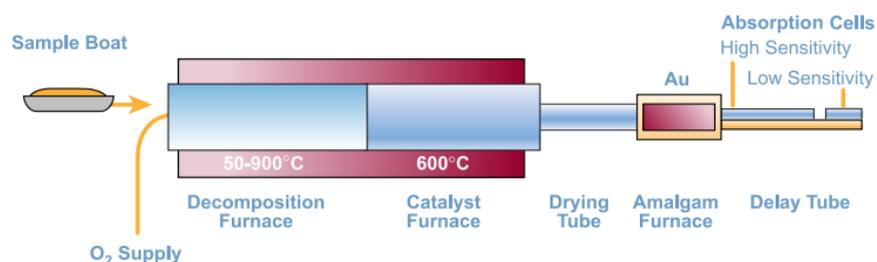
Após tratamento prévio de cada amostra, estas foram inseridas em suportes de níquel do tipo “barquinhas”, onde a massa foi apontada pelo equipamento. As “barquinhas” são automaticamente introduzidas no sistema de análise de mercúrio. O processo envolve a combustão (decomposição) das amostras em altas temperaturas na presença de oxigênio.

Os gases resultantes são conduzidos para um tubo catalítico aquecido, responsável por remover halogênios, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre. O mercúrio elementar (Hg^0) gasoso gerado passa pelo processo de amalgamação em uma coluna que contém areia de quartzo coberta com ouro, o que faz com este fique retido. Em seguida, a coluna é aquecida a uma temperatura suficiente para volatilizar o mercúrio, que é arrastado por um gás inerte (nitrogênio ou argônio) até o detector de absorção atômica, onde é quantificado a um comprimento de onda de 253,65 nm conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Espectrômetro de absorção atômica especializado em medir a quantidade de mercúrio em amostras sólidas – aparelho SMS 100 da Perkin Elmer.



Figura 11: Operação do aparelho SMS 100 da Perkin Elmer 54.



Após o término do ensaio, ao sair do aparelho as “barquinhas” saem limpas, sem nenhum resíduo da amostra que foi analisada (MANUAL do SMS 100).

3.8.3. Determinação de metilmercúrio nas amostras sólidas

O metilmercúrio foi quantificado por meio do Sistema de Analisador de Mercúrio Total e Metilmercúrio Merx, empregando a metodologia comum de metilmercúrio (EPA 1630), que consiste na redução de todo mercúrio em Hg^0 , o aparelho é exposto na Figura 12.

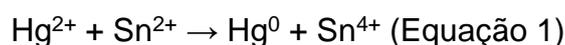
Figura 12: Espectrômetro de fluorescência atômica (AFS) - MERX total mercury and methylmercury analyzer systems.



Para a determinação de Hg orgânico preparou-se uma curva de calibração utilizando padrões referenciais de Hg com valores de 4 n.g -1 a 400 n.g -1 e utilizou-se o método de espectrometria de fluorescência atômica (AFS) (Figura 11). A metodologia de espectrometria de fluorescência atômica é executada aquecendo uma coluna de quartzo, revestida com ouro, por meio de uma resistência de níquel-cromo ($1,2 \Omega$) que é alimentada por uma tensão de 10 V (45s) libera mercúrio adsorvido da coluna para o detector do espectrômetro. O argônio (Ar) é utilizado como

gás de arraste é purificado ao atravessar uma coluna de quartzo, contendo uma coluna empacotada com areia de quartzo revestida com ouro. Este sistema conta com uma coluna extratora (onde ocorre a amalgamação), temporizador (programa-se o resfriamento (2 min) e o aquecimento (45s) e coluna analítica.

O processo de preparação da amostra para a quantificação de íons mercúrio a Hg^0 pela reação com Sn^{2+} (equação 1) ou borohidreto de sódio (equação 2) em solução de meio aquoso (HATCH, 1968) e possibilita a determinação de Hg devido à alta volatilidade do metal em sua forma metálica, permitindo sua quantificação no estado gasoso tornando desnecessário a utilização de atomizadores eletrotérmicos (OLIVEIRA, 2007).



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Parâmetros Físicos E Químicos

Os parâmetros físico-químicos da água afetam as reações químicas e as condições ambientais, no caso do mercúrio, podem desempenhar um importante papel em sua metilação, favorecendo ou não a transformação do mercúrio inorgânico para orgânico. Os resultados das propriedades físico-químicos determinadas sobre o Madeira estão expostos na Tabela 02.

Tabela 2: Parâmetros físico-químico em alíquotas de água superficial.

Pontos	pH	O.D. (mg L ⁻¹)	Turbidez (NTU)	Condutividade (μS cm ⁻¹)	Sólidos dissolvidos (mg L ⁻¹)	Temperatura da água (°C)
Mad 1	6,84	5,85	286	69,1	43,6	26,6
Mad 2	6,89	5,60	428	72,4	46,2	26,0
Mad 3	6,74	5,77	352	71,5	45,4	26,3

Mad 4	6,77	5,39	441	67,0	43,6	26,4
Mad 5	6,71	5,43	473	70,7	44,6	26,5
Mad 6	6,32	6,82	390	71,3	44,9	26,7

Os resultados de pH nas alíquotas de água superficial variam no intervalo de 6,32 e 6,89. Esses valores estão dentro da faixa considerada normal para corpos d'água naturais. Um pH ligeiramente ácido pode favorecer a metilação do mercúrio, uma vez que determinadas espécies químicas de mercúrio são mais propensas a serem metiladas em diferentes faixas de pH. Em geral, condições de pH neutro a ligeiramente ácido favorecem a metilação.

Os valores de O.D. nas amostras variam em meio a 5,39 mg/L e 6,82 mg/L. Esses valores são relativamente baixos e podem indicar uma baixa concentração de oxigênio dissolvido na água. Baixos níveis de O.D. podem afetar a atividade dos microrganismos responsáveis pela metilação do mercúrio, o que pode influenciar o processo de metilação.

A turbidez das amostras varia entre 286 NTU e 473 NTU. Valores mais altos de turbidez indicam a presença de partículas suspensas na água, o que pode afetar a penetração da radiação solar e, conseqüentemente, a disponibilidade de energia para os fenômenos químicos e biológicos na água.

Os valores de sólidos dissolvidos nas amostras variam entre 43,6 mg/L e 46,2 mg/L. Esse parâmetro mede a concentração de substâncias dissolvidas na água, como sais minerais e compostos orgânicos. A presença de sólidos dissolvidos pode influenciar a acessibilidade dos nutrientes para os microrganismos encarregados de metilar o mercúrio. A presença de matéria orgânica dissolvida na água fornece carbono orgânico necessário para a metilação microbiana do mercúrio. A matéria orgânica pode ser proveniente de detritos vegetais, escoamento agrícola ou esgoto, por exemplo.

A temperatura da água nas amostras é relativamente constante, variando entre 26,0°C e 26,7°C. A temperatura é um fator importante que influencia as taxas de

reação química e a atividade dos microrganismos. Temperaturas mais altas podem acelerar as taxas de metilação.

No geral, com base nos valores apresentados, as amostras de água superficial possuem características físico-químicas que têm a possibilidade de estimular a ocorrência das ações que causam a metilação do mercúrio. Os valores de pH ligeiramente ácido, níveis de oxigênio dissolvido reduzidos, a existência de sólidos dissolvidos e turbidez podem criar condições propícias para a metilação. É importante destacar que esses parâmetros físico-químicos atuam em conjunto e interagem de maneira complexa no processo de metilação do mercúrio. As condições ambientais e a presença de microrganismos metiladores são igualmente relevantes.

Os desfechos das análises físico-químicas indicam que as alíquotas de águas superficiais apresentam atributos que podem promover a metilação do Hg. O pH ligeiramente ácido encontrado em todas as amostras está dentro da faixa favorável para a metilação do mercúrio, uma vez que determinadas espécies químicas de mercúrio são mais propensas a serem metiladas em pH neutro a ligeiramente ácido.

Os baixos níveis de oxigênio dissolvido podem afetar a atividade dos microrganismos responsáveis pela metilação do mercúrio, mas a presença de sólidos dissolvidos e turbidez pode criar condições propícias para a metilação, uma vez que fornecem nutrientes e matéria orgânica necessários para a atividade microbiana. A temperatura relativamente constante das amostras também pode favorecer as taxas de reação química e a atividade dos microrganismos, acelerando o processo de metilação.

4.2. Concentrações Das Espécies Mercuriais Na Água Superficial

O objetivo desta pesquisa foi quantificar as concentrações de mercúrio total (HgT) e metilmercúrio (metilHg) em alíquotas de água da superfície coletadas na bacia do rio Madeira durante a temporada de cheia em 2022. Foram realizados três ensaios para cada amostra, garantindo assim a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Os dados obtidos foram registrados e estão apresentados na Tabela 03. A concentração de HgT indica o montante total de mercúrio existente na água, enquanto

a concentração de metilHg é uma medida específica da forma mais preocupante do mercúrio no que se refere ao efeito ambiental e nocividade.

A avaliação dessas concentrações é de suma importância, uma vez que este metal com alta toxicidade tem possibilidade de acarretar sérios danos aos ecossistemas aquáticos, assim como pode causar doenças nos seres humanos. Compreender os patamares de contaminação de mercúrio nas alíquotas de água de superfície é fundamental para uma gestão adequada e medidas de mitigação visando a preservação desse importante recurso natural.

Tabela 3: Dados da quantificação de HgT e metilHg em amostras de água superficial.

Água	HgT (ng/L)	MetilHg (ng/L)
Mad 1	18,84 ± 0,03	< 0,3
Mad 2	21,66 ± 0,04	< 0,3
Mad 3	22,40 ± 0,04	< 0,3
Mad 4	26,28 ± 0,05	< 0,3
Mad 5	23,37 ± 0,05	< 0,3
Mad 6	28,79 ± 0,06	< 0,3
Média	23,56	--

Como pode ser observado, os resultados obtidos revelaram quantidades de mercúrio total (HgT) na faixa de 18,84 ng/L a 28,79 ng/L, com uma média de 23,56 ng/L. Não foram detectadas concentrações de metilmercúrio (metilHg) nas amostras analisadas, uma vez que os resultados obtidos foram inferiores ao nível de quantificação.

É importante avaliar esses resultados à luz das diretrizes estabelecidas pelas regulamentações ambientais e de saúde. De acordo com a Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece as classificações dos corpos hídricos e as orientações ambientais para sua categorização, a classe II é aplicada aos cursos de água de natureza doce, estabelecendo um limite máximo de 200 ng/L para mercúrio total. Por

sua vez, a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, determina os protocolos e atribuições para o monitoramento e vigilância da qualidade da água destinada ao consumo humano e seus padrões de potabilidade, fixando um valor máximo admissível de 1.000 ng/L para mercúrio total.

Esses resultados fornecem informações importantes para a gestão e monitoramento ambiental, permitindo uma avaliação da contaminação por mercúrio na região. No entanto, é fundamental continuar monitorando essas concentrações ao longo do tempo para identificar quaisquer tendências ou variações sazonais, além de investigar possíveis fontes de contaminação que possam afetar a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos.

4.3. Concentrações De Mercúrio Em Plânctons

O plâncton possui uma função primordial na transferência de Hg na coluna hídrica, constituindo a base inicial da cadeia trófica para absorver de forma direta o mercúrio disponível na água (LACERDA et al., 2008). A parte orgânica do mercúrio é captada por diversos seres aquáticos, que possuem capacidade de bioacumulação e de biomagnificação desse composto por meio das várias etapas da cadeia alimentar. Conforme apontado por Nascimento et al. (2007), o fitoplâncton pode capturar mercúrio por mecanismos passivos, ao passo que o zooplâncton pode absorvê-lo tanto passivamente quanto ativamente, ao ingerir fitoplâncton e material particulado em suspensão contendo mercúrio, o qual é predominantemente armazenado em seus exoesqueletos.

Neste contexto, as Tabelas 04, 05 e 06 apresentam os valores de HgT e metilHg encontrados nos exemplares de plânctons e invertebrados obtidos nas águas do rio Madeira, especificamente na região próxima à UHE Jirau, durante a campanha de campo.

A análise dessas tabelas permite avaliar as concentrações de mercúrio presente na comunidade planctônica, fornecendo informações importantes sobre a contaminação desse metal nesse nível trófico. A presença de HgT e metilHg nos materiais coletados indica a disponibilidade e a incorporação desse elemento no plâncton e nos organismos invertebrados estudados. Esses dados colaboram para a compreensão da dinâmica do Hg na cadeia alimentar aquática e sua potencial

transferência para níveis tróficos superiores, como peixes e outros organismos consumidores.

Tabela 4: Concentração de HgT e metilHg em amostras de fitoplânctons.

Fitoplâncton	HgT (ug/kg)	MetilHg (ug/kg)
Mad 1	274,70 ± 0,05	16,72 ± 0,04
Mad 2	188,97 ± 0,03	11,18 ± 0,03
Mad 3	246,15 ± 0,04	19,45 ± 0,04
Mad 4	310,13 ± 0,07	30,27 ± 0,06
Mad 5	354,09 ± 0,07	54,62 ± 0,08
Mad 6	384,75 ± 0,08	46,04 ± 0,07
Média	293,13	29,71

Tabela 5: Concentração de HgT e metilHg em amostras de zooplânctons.

Zooplâncton	HgT (ug/kg)	MetilHg (ug/kg)
Mad 1	368,48 ± 0,04	20,59 ± 0,05
Mad 2	337,48 ± 0,03	38,16 ± 0,05
Mad 3	433,87 ± 0,05	62,27 ± 0,07
Mad 4	310,03 ± 0,03	36,69 ± 0,05
Mad 5	415,32 ± 0,05	50,98 ± 0,06
Mad 6	336,89 ± 0,03	15,43 ± 0,03
Média	367,01	37,35

Tabela 6: Concentração de HgT e metilHg em amostras de invertebrados.

Invertebrados	HgT (ug/kg)	MetilHg (ug/kg)
Mad 1	437,90 ± 0,03	17,11 ± 0,03
Mad 2	452,03 ± 0,04	29,42 ± 0,04
Mad 3	562,61 ± 0,04	28,84 ± 0,04
Mad 4	617,98 ± 0,05	45,80 ± 0,06
Mad 5	825,73 ± 0,09	67,37 ± 0,08
Mad 6	759,61 ± 0,06	75,82 ± 0,09
Média	609,31	44,06

Os resultados das concentrações de HgT e metilHg em fitoplâncton, zooplâncton e invertebrados capturados na região do rio Madeira revelam variações significativas entre as amostras, indicando a presença dessas formas de mercúrio na comunidade planctônica. No fitoplâncton, as concentrações de HgT variaram de 188,97 µg/kg a 384,75 µg/kg, com uma média de 293,13 µg/kg. As concentrações de metilHg no fitoplâncton variaram de 11,18 µg/kg a 54,62 µg/kg, com uma média de 29,71 µg/kg.

Esses resultados demonstram a presença de mercúrio tanto na forma total quanto na forma metilada no fitoplâncton, indicando uma potencial contaminação nesse nível trófico. O fitoplâncton desempenha um papel fundamental na cadeia alimentar aquática, sendo uma fonte primária de alimento para os organismos consumidores, como o zooplâncton e os peixes. Portanto, a presença de mercúrio no fitoplâncton sugere que esse metal pode ser transferido para as camadas tróficas mais elevadas, intensificando a probabilidade de contaminação para os organismos que se alimentam dessas espécies.

As concentrações de HgT no zooplâncton variaram de 310,03 µg/kg a 433,87 µg/kg, com uma média de 367,01 µg/kg. Já as concentrações de metilHg no zooplâncton variaram de 15,43 µg/kg a 62,27 µg/kg, com uma média de 37,35 µg/kg.

No caso dos invertebrados, as concentrações de HgT variaram de 437,90 µg/kg a 825,73 µg/kg, com uma média de 609,31 µg/kg. As concentrações de metilHg nos invertebrados variaram de 17,11 µg/kg a 75,82 µg/kg, com uma média de 44,06 µg/kg.

Esses resultados revelam que o zooplâncton e os invertebrados exibem teores significativos de mercúrio, revelam níveis que denotam contaminação persistente nesses organismos. A biomagnificação do Hg nos níveis das camadas tróficas, pode explicar as concentrações mais elevadas encontradas nos zooplânctons e invertebrados em comparação com o fitoplâncton.

Os resultados dos fitoplânctons indicaram a presença de mercúrio tanto na forma total quanto na forma metilada, sugerindo uma potencial contaminação por mercúrio nesse nível trófico. Além disso, as concentrações de metilmercúrio foram significativas, indicando a ocorrência do processo de metilação do mercúrio no ambiente aquático. Esses resultados evidenciam a capacidade de incorporação e acumulação do mercúrio no fitoplâncton, bem como a possibilidade de transferência desse metal para os níveis tróficos superiores.

A presença de concentrações elevadas de mercúrio também foi observada nos zooplânctons e invertebrados. Esses organismos ocupam níveis tróficos superiores na cadeia alimentar e atuam como importantes intermediários na transferência do mercúrio ao longo do ecossistema. As concentrações significativas de metilmercúrio nesses organismos indicam a ocorrência de biomagnificação, na qual as concentrações de mercúrio tendem a aumentar à medida que avançam na cadeia alimentar. Esse processo é particularmente relevante considerando a presença de peixes na cadeia alimentar de predadores.

4.4. Concentrações De Mercúrio Em Peixe

A presença de Hg em organismos aquáticos, especialmente em peixes, é um assunto de grande importância devido à capacidade desses animais de absorver facilmente compostos mercuriais, especialmente na forma de metilmercúrio. Este metal potencialmente nocivo pode ser detectado em corpos d'água devido a diversas fontes, incluindo atividades industriais e processos naturais como a erosão do solo. A contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos pode ter impactos

significativos na saúde ambiental e na segurança alimentar das populações que dependem desses recursos.

Nesse contexto, os resultados das concentrações de HgT e MetilHg em pescados das espécies Branquinha (*Potamorhina latior*) e Dourada (*Brachyplatystoma avicans*) têm sido objeto de estudo e análise. Esses resultados são apresentados na tabela 07, levando em consideração amostras obtidas por meio do Programa de Conservação da Ictiofauna, e foram parametrizados com base no tamanho das espécies para permitir comparações intra espécies.

Compreender os teores de Hg em pescados é fundamental para analisar os níveis de intoxicação desses organismos e entender os potenciais danos para a saúde dos ecossistemas aquáticos e das populações que consomem esses peixes como fonte de alimento. Além disso, a análise desses dados permite investigar a ocorrência de processos como bioacumulação e biomagnificação, nos quais o mercúrio se concentra e se amplifica ao longo da cadeia alimentar.

Dessa forma, examinar as concentrações de mercúrio em peixes é crucial para a implementação de medidas adequadas de gestão e controle da intoxicação deste metal nos ecossistemas hídricos. Isso contribui para alcançar modos de proteção à saúde dos ecossistemas, preservar a biodiversidade e garantir a segurança alimentar das comunidades que dependem desses recursos hídricos.

Tabela 7: Concentração de HgT e metilHg em amostras de peixes.

Branquinha (Potamorhina latior)			Dourada (Brachyplatystoma avicans)	
Local	HgT (mg/kg)	MetilHg (mg/kg)	HgT (mg/kg)	MetilHg (mg/kg)
Montante	0,39 ± 0,04	0,24 ± 0,03	0,94 ± 0,08	0,75 ± 0,06
Jusante	0,38 ± 0,04	0,23 ± 0,04	1,01 ± 0,07	0,83 ± 0,06
Média	0,385	0,235	0,975	0,790

Como exposto acima, os teores de mercúrio no peixe Branquinha são menores em comparação com a espécie Dourada. Isso pode ser explicado pelo hábito alimentar dessas espécies. A Branquinha é classificada como um peixe detritívoro, que se alimenta principalmente de matéria orgânica em decomposição, enquanto a Dourada é carnívora, consumindo outros peixes. O hábito alimentar carnívoro da Dourada aumenta a probabilidade de biomagnificação de mercúrio em seus tecidos.

É importante destacar que os teores de Hg encontrados nos pescados Branquinha e Dourada estão muito próximo aos limites máximos permitidos da resolução expedida pelo Mercosul em 2013, que estabelece limites de até 0,5 mg/kg de HgT em pescados no geral e até 1,0 mg/kg de HgT em peixes carnívoros, com base nos resultados, podemos observar que os peixes analisados estão potencialmente contaminados, trazendo assim riscos para todo o ecossistema.

Ao comparar os valores dos níveis de Hg nos pescados com as concentrações na água e nas diferentes comunidades planctônicas, observamos um aumento significativo nos níveis da cadeia trófica, indicando a ocorrência de bioacumulação e biomagnificação do Hg. As concentrações de HgT nos peixes representam um crescimento de 1.244.093,5% em relação à água para os fitoplânctons, de 1.557.675,9% em relação à água comparada ao zooplâncton e um aumento de 66,0% do zooplâncton em relação aos invertebrados. Verificando as duas espécies de peixes, a concentração de HgT na Dourada é aproximadamente 153,3% maior do que na Branquinha, evidenciando a transferência e amplificação mediante a biomagnificação do Hg nas diversas fases da cadeia alimentar.

A análise das concentrações de mercúrio em peixes revelou que tanto a espécie Branquinha quanto a espécie Dourada apresentaram níveis consideráveis de mercúrio em seus tecidos. No entanto, vale ressaltar que a espécie Branquinha, com hábito alimentar detritívoro, apresentou concentrações menores em comparação com a espécie Dourada, que possui um hábito alimentar carnívoro. A diferença observada nos teores de Hg ao longo dos níveis da cadeia trófica reflete a transferência e biomagnificação deste metal. Isso ressalta a importância do hábito alimentar na exposição e acúmulo de mercúrio em organismos aquáticos.

No entanto, é importante ressaltar que os peixes atuam como reservatórios do mercúrio e, como integrantes de cadeias alimentares mais complexas, podem servir como fonte de contaminação para outros organismos, incluindo humanos, que se alimentam de peixes contaminados. A biomagnificação do Hg nos níveis da cadeia trófica torna-se preocupante, pois os peixes carnívoros, como a espécie Dourada, que apresentaram concentrações mais elevadas de mercúrio, podem transferir níveis mais altos desse metal para os seus predadores ou para as populações humanas que consomem esses peixes.

Diante disso, os resultados obtidos destacam a relevância de estudos que façam monitoramento contínuo e busquem medidas adequadas de gestão e controle da intoxicação por mercúrio nos recursos hídricos do rio Madeira. Esforços devem ser direcionados para reduzir as fontes de contaminação e implementar estratégias de manejo sustentáveis que visem minimizar a entrada de mercúrio no ambiente aquático. Além disso, a conscientização e a educação sobre os riscos associados ao consumo de peixes contaminados por mercúrio devem ser amplamente promovidas para garantir a segurança alimentar das populações dependentes desses recursos hídricos.

5. CONCLUSÃO

Os resultados fornecem evidências claras da presença e da disseminação do Hg no entorno do rio Madeira, destacando grande relevância da monitorização e de busca pelo controle dessa contaminação para conservar boa saúde dos ecossistemas aquáticos e garantir uma nutrição segura para as populações. A compreensão dos processos de bioacumulação e biomagnificação do mercúrio nos níveis tróficos é fundamental para implementar medidas eficazes de preservação e gestão ambiental, visando minimizar os impactos negativos desse metal na saúde humana e no meio ambiente.

6. REFERÊNCIAS

ACPO. Associação de Combate aos Poluentes. **Relatório de mercado de mercúrio no Brasil**. Zero Mercury Global Campaign; 2006.

ALMEIDA, Marcelo Dominguez de et al. **Biogeoquímica do mercúrio na interface solo-atmosfera na Amazônia.** 2005.

ALVES, Jeanne Clécia. **Estimativa do risco à saúde humana segundo o teor de mercúrio presente em sushi e sashimi.** 2016.

ANGHEBEN, Fernanda Marcon. **Avaliação da concentração de metais em peixes de diferentes níveis tróficos ocorrentes no Rio das Antas e no Rio Tega-RS.** 2019.

ARAÚJO, L. & PESSOA, L. & CARDOSO, L. & MAIA, P. **Xenobióticos.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2021.

ARRUDA, Maria Auxiliadora Almeida; GRANDIZOLLI, Claudia Cristina Tavares; DE ARRUDA, Reinaldo Gomes. **Educação Ambiental e cidadania: reflexões a partir do descarte de resíduos sólidos no Rio Diamantino em Diamantino (MT).** Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 18, n. 1, p. 441-457, 2023.

AYRES, G.A. **Distribuição do Mercúrio nas Águas Superficiais do Rio Madeira.** Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental) - Universidade Federal Fluminense. Niterói, p. 68. 2004.

AZEVEDO, FA De et al. **Metais: gerenciamento da toxicidade.** São Paulo: Editora Atheneu, 2003.

BAIRD, C. Química Ambiental. Bookman, 4 ed., p. 844, 2011.

BASTOS W. R. & LACERDA L. D. **A contaminação do mercúrio na bacia do rio Madeira: uma breve revisão.** Geochim. Brasil, 18(2)099-114, 2004.

BERMANN, C. **Impasses e Controvérsias da Hidreletricidade.** Estudos Avançados, v.21, n.59, p.139-153, 2007.

BISINOTI, M. C. & JARDIM, W. F. **O comportamento do metilmercúrio (metilHg) no ambiente.** Química Nova, Vol. 27, No. 4, p. 593-600, 2004.

BISINOTI, M. C. **Biogeoquímica aquática do mercúrio orgânico na Bacia do Rio Negro, Amazônia**. 2005. 169 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade de Campinas, Campinas, 2005.

CARDOSO LSM, MENDES LL, MELÉNDEZ GV. **Diferenças na atenção pré-natal nas áreas urbanas e rurais do Brasil: estudo transversal de base populacional**. Rev Min Enferm. 2013;17(1).DOI: DOI: 10.5935/1415-2762.20130008

CARVALHO, Nádia Giulian de; NOVELLI, Carolina Verônica Lino; COLELLA-SANTOS, Maria Francisca. **Fatores na infância e adolescência que podem influenciar o processamento auditivo: revisão sistemática**. Revista Cefac, v. 17, p. 1590-1603, 2015.

CARVALHO, A. M., & GUERRA, L. B. **Avaliação Neuropsicológica na Educação**. In L. F. Malloy-Diniz, D. Fuentes, P. Mattos, & N. Abreu (Eds.), Avaliação Neuropsicológica (pp. 324–330). Porto Alegre: Artmed. 2010.

CLARKSON TW, MAGOS L, MYERS GJ. **The toxicology of mercury--current exposures and clinical manifestations**. N Engl J Med. 2003 Oct 30;349(18):1731-7. doi: 10.1056/NEJMra022471. PMID: 14585942.

CHANG, C. C. et. al. **Mn,Cd-metallothionein-2: a room temperature magnetic protein**. Biochemical and biophysical research communications, v. 340, p. 1134-1138, 2006.

COSTA, Barbara Silveira. **Teores de mercúrio em frutos do mar do mercado varejista de Belo Horizonte, MG**. 2018.

DA SILVA, Joesér Alvares. **A Doença de Minamata na Amazônia: Realidade Urgente ou Delírio Ambientalista?**. Afros & Amazônicos, v. 2, n. 2, p. 54-78, 2020.

DA SILVA GONÇALVES, Diana Maria. **Revisão Sistemática da Influência do Mercúrio na Pressão Arterial**. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior (Portugal). 2018.

DE SOUZA GAMA, Cecile et al. Percepção de risco à contaminação por mercúrio em peixes em Macapá, AP. **Revista Arquivos Científicos (IMMES)**, v. 3, n. 1, p. 142-146, 2020.

DOS SANTOS, Ana Caroline Casalvara et al. Ecossistema de aquário. **Atas do Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar-V EPCC**, p. 1-5, 2007.

Dutra MDSD, Monteiro MC, Câmara VM. **Avaliação do processamento auditivo central em adolescentes expostos ao mercúrio metálico**. Pró-Fono R. Atual. Cient.2010;22(3):339-44.

ECOTOXICOL, J. Braz Soc. **Mercúrio no Plâncton de um Lago Natural Amazônico, Lago Puruzinho (Brasil)**. 2007.

FADINI, P. S. & JARDIM, W. F. **Is the Negro River Basin Amazon/ impacted by naturally occurring mercury?** The Science of the Total Environment 275, p.71-82. 2001.

FERREIRA JG. **Avaliação de parâmetros ambientais em aterros sanitários – estudo de caso**. Taubaté 2006. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp005033.pdf>>.

FIGUEIREDO, S.W. **Estratégias Metaloproteômicas na Investigação de Biomarcadores de Mercúrio em Amostras de Tecido Muscular de Tucunarés**. Dissertação de Mestrado. UNB, Brasília, 2015.

FOSSI, M.C.; MARSILI, L. **Effects of endocrine disruptors in aquatic mammals**. **Pure and Applied Chemistry**. v. 75, p. 2235-2247, 2003.

FRANCISCO, Ana Rita Correia. **Química e toxicidade do mercúrio**. Tese de Doutorado. 2021.

GAO, Y. et. al. **Detection of metalloproteins in human liver cytosol by synchrotron radiation X-ray fluorescence after sodium dodecyl sulfate polyacrilamide gel electrophoresis**. Analytica Chimica Acta, v. 485, p. 131-137, 2003.

GARCIA, João Brogotá Perdigão; DE AZEVEDO, Maria Regina Andrade. **Avaliação de chumbo (pb), mercúrio (hg) e cádmio (cd) no sedimento de margem da represa do Guarapiranga, uma questão de saúde pública.** *Holos Environment*, v. 19, n. 1, p. 131-144, 2019.

GOMES, Vinícius Marques. **Estudo da distribuição e do potencial de metilação do mercúrio em solos e sedimentos de áreas a serem inundadas para aproveitamento hidrelétrico.** 2014.

GOMES, Bárbara Leticia Corrêa et al. **Análise temporal da exposição ao mercúrio na população ribeirinha da Amazônia: revisão integrativa.** *Revista Eletrônica Acervo Saúde*, v. 13, n. 5, p. e7172-e7172, 2021.

GRIESBAUER L. **Methylmercury contamination in fish and shellfish.** *CSA Discovery Guides*. 2007 Feb;:1-9.

GROTZINGER, John; JORDAN, Tom. **Para Entender a Terra-6.** Bookman Editora, 2013.

GUERRA, Inês Isabel Ribeiro. **A ação protetora do selenito de sódio e da selenometionina na toxicidade exercida por compostos de mercúrio no sistema da tioredoxina das células de neuroblastoma.** Tese de Doutorado. 2014.

GUZMÁN, Daniela Baptista Messias et al. **Estudo da exposição ambiental ao mercúrio utilizando biomarcadores: uma contribuição para o estabelecimento de valores de referência em conscritos do Exército Brasileiro residentes no município do Rio de Janeiro-RJ.** Tese de Doutorado. 2020.

HACON, Sandra de Souza et al. **Mercury exposure through fish consumption in traditional communities in the Brazilian Northern Amazon.** *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 15, p. 5269, 2020.

HACON, Sandra S. et al. **The influence of changes in lifestyle and mercury exposure in riverine populations of the Madeira River (Amazon Basin) near a hydroelectric project.** *International journal of environmental research and public health*, v. 11, n. 3, p. 2437-2455, 2014.

HATCH, W. R.; OTT, W. L. **Determination of sub-microgram quantities of mercury by atomic absorption spectrophotometry.** Analytical Chemistry. V. 40, 1968, p. 2085-2087.

HONG YS, KIM YM, LEE KE. **Methylmercury exposure and health effects.** J Prev Med Public Health. 2012; 45(6):353-363. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3514465/>
doi:10.3961/jpmph.2012.45.6.353.

JINADASA, B. K. K. K.; AHMAD, S. B. N.; EDIRISINGHE, E. M. R. K. B.; WICRAMASINGHE, I. **Mercury content in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and swordfish (*Xiphias gladius*) and estimation of mercury intake.** Journal of Food Security, v. 2, p. 23-36, 2014.

KEAN, S. **A colher que desaparece: E outras histórias reais de loucura, amor e morte a partir dos elementos químicos.** Rio de Janeiro: Zahar, 2011.

KEHRIG, Helena A. et al. **Bioconcentração e biomagnificação de metilmercúrio na baía de Guanabara, Rio de Janeiro.** Química Nova, v. 34, p. 377-384, 2011.

KHOURY, Eliana Dirce Torres et al. **Exposição ao mercúrio: avaliação neurológica com ênfase na investigação somatossensorial quantitativa em ribeirinhos da Amazônia.** 2012.

KÜTTER, Vinicius Tavares. **Aspectos da biogeoquímica do mercúrio em lagos na planície costeira do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado. 2006.

LACERDA, L. D. **Contaminação por mercúrio no Brasil: fontes industriais vs garimpo de ouro.** Química Nova, v. 20, n. 2, p. 196-199. 1997.

LACERDA, Luiz Drude de; MALM, Olaf. Contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos: uma análise das áreas críticas. **Estudos avançados**, v. 22, p. 173-190, 2008.

LIMA, D. P. de. **Assessment of contamination by heavy metals in water and fish from the Cassiporé, Amapá, Amazonas, Brazil basin.** 2013. 147 f. - Dissertação

(Mestrado em Biodiversidade Tropical) - Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá, Macapá, AP, 2013.

LIMA, Cassio dos Santos. **Efeitos neuropsicológicos da exposição ao mercúrio em crianças e adolescentes da região do rio Madeira–Rondônia.** 2018.

LOPES, Ana Maria Ribeiro Marques. **Avaliação da contaminação em metais pesados no pescado: análise da situação do pescado comercializado em Portugal e dos alertas emitidos pelo sistema RASFF (Rapid Alert System for Food and Feed).** 2009. Tese de Doutorado. FCT-UNL.

LUEBKE, R.W.; HODSON, P.V.; FAISAL, M.; ROSS, P.S.; GRASMAN, K.A.; ZELIKOFF, J. **Aquatic pollution-induced immunotoxicity in wildlife species.** *Fundamental and Applied Toxicology*. v. 37, p. 1-15, 1997.

MACHADO, Carolina Sampaio. **Quantificação do risco à saúde humana pela exposição a poluentes químicos e potencial carcinogênico às comunidades adjacentes ao Rio Pardo, Brasil.** 2016. Tese (Doutorado em Enfermagem em Saúde Pública) - Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, University of São Paulo, Ribeirão Preto, 2016. doi:10.11606/T.22.2017.tde-30032017-195037. Acesso em: 2023-10-03.

MAGARELLI, G. & FOSTIER, A. H. **Quantificação de fluxos de mercúrio gasoso na interface solo/atmosfera utilizando câmara de fluxo dinâmica: aplicação na bacia do rio negro.** *Química Nova*, v. 28, n. 6, p. 968-974, 2005.

MALM, O. **Gold Mining as a Source of Mercury Exposure in the Brazilian Amazon.** *ENVIRONMENTAL RESEARCH*. p. 77, 73-78. 1998.

MARTINS, Renata Krüger. **Divulgação científica para a conscientização sobre a exposição ao mercúrio em populações indígenas e ribeirinhas na Amazônia.** 2022.

MARQUES, R. C. **Avaliação da exposição ao mercúrio e seus compostos sobre o desenvolvimento neuropsicomotor em crianças de Porto Velho-RO.** Dissertação (Mestrado em Doenças Tropicais), Núcleo de Medicina Tropical, Universidade Federal do Pará, Brasil. Belém, p. 102, 2002.

MEADOWS-OLIVER M. **Environmental Toxicants:Lead and Mercury.** J Pediatr Health Care. (2012) 26, 213-215. doi:10.1016/j.pedhc.2012.02.005

MEDEIROS, Mildred Ferreira et al. **Fundamentos da assistência de enfermagem na atenção primária às gestantes ribeirinhas afetadas pelo despejo de mercúrio em corpos d'água.** Global Clinical Research Journal, v. 2, n. 2, p. e31-e31, 2022.

MENESES, Heloisa do Nascimento de Moura et al. **Efeito de genes da família glutathione s-transferase em uma população do baixo Amazonas ambientalmente exposta ao mercúrio.** 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Oeste do Pará.

MIRANDA, M. R. & COELHO-SOUZA, S. A. & GUIMARÃES, J. R. D. & CORREIA, R. S & OLIVEIRA, D. **Mercúrio em sistemas aquáticos: Fatores ambientais que afetam a metilação.** Oecol. Bras., 11 (2): p.240-251. 2007.

MICARONI, R. C. C. M. & BUENO, M. I. M. S. & JARDIM, W. F. **Compostos de mercúrio. Revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte.** Química Nova. 2000.

MORAES, P. M. **Fracionamento de mercúrio em amostras de tecido muscular de peixes coletados na área de influência do “AHE Jirau” – bacia do rio Madeira utilizando estratégias metaloproteômicas.** Tese (Doutorado em Biologia) - Universidade Estadual de São Paulo. Botucatu, p. 146. 2014.

MOURA, Jailson Fulgencio de et al. **O boto-cinza (*Sotalia guianensis*) como sentinela da saúde dos ambientes costeiros: estudo das concentrações de mercúrio no estuário Amazônico e costa norte do Rio de Janeiro.** Tese de Doutorado. 2009.

MOURA, Victor Lacerda. **Bioacumulação de mercúrio no gradiente estuarino do rio Jaguaribe, CE.** 2017.

NUNES, G. A. **Estudo da capacidade de complexação e do potencial de metilação de mercúrio e suas interações com as substâncias húmicas em amostras de água, sedimentos e solos coletados no pantanal – Corumbá/MS.** 2019.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 434p.

OLIVEIRA, L. C. **Substâncias húmicas aquáticas do Rio Negro-AM: Influência da sazonalidade nas características estruturais, distribuição de carbono e capacidade de complexação por íons Hg(II) em função do tamanho molecular**. 2007. 98f. Tese de Doutorado em Química- UNESP, Araraquara, 2007.

PIMENTEL, Diego Ramos et al. **Avaliação dos níveis de mercúrio (Hg) total em peixes de igarapés da bacia do Rio Mamuru, Pará, Brasil**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Oeste do Pará.

PINHEIRO, Maria da Conceição Nascimento et al. **Estado nutricional e desenvolvimento motor de crianças ribeirinhas expostas ao mercúrio no estado do Pará-Amazônia brasileira**. 2014.

POZZETTI, Valmir César et al. Uso de mercúrio na Amazônia brasileira: contaminação, problemas e legislação vigente. **Revista Catalana de Dret Ambiental**, v. 13, n. 2, 2022.

PRIMARCK, R. B; RODRIGUES E. **Biologia da Conservação**. Londrina: Planta, 2001.

RAMOS, Wallace Ernesto SantAnna. **Contaminação por mercúrio e arsênio em ribeirões do quadrilátero ferrífero–MG, em áreas de mineração e atividades garimpeiras**. 2005.

REBELO, Rita de Sousa. **Toxicidade do mercúrio e seus efeitos neurodegenerativos**. Tese de Doutorado. 2016.

RIO, G. A. P. & COELHO, M. C. N. & WANDERLEY, L. J. **Rio Madeira: fronteiras, redes e rotas**. NAEA, v.18, n.2, p.93-109, 2015.

RODRIGUES, Ana Paula de Castro et al. **Avaliação de risco ecológico associado à contaminação mercurial em dois estuários do estado do Rio de Janeiro: Baía de Guanabara e Baía da Ribeira**. 2006.

ROMANOWSKI, S. M. M.; MANGRICH, A. S.; NEVES, A. **Síntese e caracterização de novos compostos de coordenação de cobre (II) com ligantes não simétricos**

N,O-doadores: contribuições para o sítio ativo da galactose oxidase. Química Nova, v. 24, p. 592-598, 2001.

RUPPENTHAL, J. E. **Toxicologia.** Universidade Federal de Santa Maria. 2013.

SANTOS, Felipe André dos. **Estudo metalômico do mercúrio em leite materno coletado da população ribeirinha da área de influência do AHE JIRAU-Bacia do Rio Madeira.** 2013.

SANTOS, Haroldo Lima et al. **Relação entre poluentes atmosféricos e suas consequências para a saúde.** Revista Científica Intr@ ciência, v. 17, p. 01-24, 2019.

SIA, Bárbara. **ESTUDO DE MERCÚRIO TOTAL E ORGÂNICO EM PESCADOS.** 2016.

SILVA, M. W. & ESTANISLAU, C. A. M. **Concentração de mercúrio em peixes da Amazônia.** Boletim ABLimno, 41(1). p.08-14. 2015.

SILVA, Michelle C. **Elementos-traço em macroalgas pardas e vermelhas conspicuas da Ilha da Trindade-Brasil e da costa brasileira.** Dissertação de Mestrado. 2018.

SIQUEIRA, A. G. **Características e avaliação dos níveis basais de mercúrio do sedimento na área de influência do aproveitamento hidrelétrico Jirau – rio Madeira – Rondônia - Brasil.** Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade de Brasília. Planaltina. p. 80. 2013.

SISINNO, Cristina Lucia Silveira; OLIVEIRA-FILHO, Eduardo Cyrino. **Princípios de toxicologia ambiental.** Digitaliza Conteudo, 2021.

SOUZA, Suelen Maria Santos de et al. **Exposição mercurial e a relação do perfil hepático e renal de indivíduos do município de Santarém, Pará.** 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Oeste do Pará.

SOUSA J. M.; NOVAES J. S.; RODRIGUES NETO G.; SOUSA M. S.; REIS I. G.; CARVALHAL M. I. **Assessment of the motor development of children poisoned with mercury.** Gazz Med Ital - Arch Sci Med, v.173, p.1-2, 2014.

SCHEUHAMMER, A.M. **The chronic toxicity of aluminium, cadmium, mercury, and lead in birds: a review.** Environmental Pollution, v.46, p.263-295, 1987.

SWIDERSKI, R. M. **Quicksilver: a history of the use, lore and effects of mercury.** McFarland. 2008.

TSCHÖPEL, P.; KOTZ, L.; SHULZ, W.; VEBER, M.; TÖLG, G. Zur Ursache und Vermeidung systematischer Fehler bei Elementbestimmungen in wässrigen Lösungen im ng/mL – und pg/mL. **Fresenius Journal Analytical Chemistry.** V. 302, 1980, p. 1-14.

USEPA ñ United States Environmental Protection Agency. **Guidance for assessment contaminant data for use in fish advisories.** Washington DC, 2000, v.2.

VIEIRA, LUIZ MARQUES; ALHO, CLEBER JR. Biomagnificação de mercúrio no Pantanal, Brasil. **Simpósio sobre recursos naturais e socioeconômicos do Pantanal**, v. 3, 2000.