

**EFEITOS DE BARRAGENS DE USINAS HIDRELÉTRICAS EM CASCATA
NO ACÚMULO DE MERCÚRIO EM COMPARTIMENTOS BIÓTICOS E
ABIÓTICOS NA AMAZÔNIA**

EDVAGNER DE OLIVEIRA

Tese apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de Doutor.

**CÁCERES
MATO GROSSO, BRASIL
2025**

EDVAGNER DE OLIVEIRA

**EFEITOS DE BARRAGENS DE USINAS HIDRELÉTRICAS EM CASCATA NO
ACÚMULO DE MERCÚRIO EM COMPARTIMENTOS BIÓTICOS E ABIÓTICOS NA
AMAZÔNIA**

Tese apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de Doutor.

Orientadora: Prof^a. Dra Áurea Regina Alves Ignácio
Coorientadora: Prof^a Dra Daniele Kasper

**CÁCERES
MATO GROSSO, BRASIL
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Supervisão de Bibliotecas da
UNEMATCatalogação de Publicação na Fonte. UNEMAT - Unidade padrão

O48e Oliveira, Edvagner de.

Efeitos de barragens de usinas hidrelétricas em cascata no
acúmulo de mercúrio em compartimentos bióticos e abióticos na
Amazônia / Edvagner de Oliveira. - Cáceres, 2025.
118f.: il.

Universidade do Estado de Mato Grosso "Carlos Alberto Reyes
Maldonado", Ciências Ambientais/CAC-PPGCA - Cáceres - Doutorado
Acadêmico, Campus Universitário de Cáceres "Jane Vanini".

Orientadora: Dra. Áurea Regina Alves Ignácio.

Coorientadora: Dra. Daniele Kasper.

1. Mercúrio Total. 2. Bioacumulação. 3. Peixes Tropicais. 4.
Solo. 5. Material Particulado em Suspensão. 6. Plâncton. I.
Ignácio, Áurea Regina Alves, Dra. II. Kasper, Daniele, Dra. III.
Título.

EDVAGNER DE OLIVEIRA

**EFEITOS DE BARRAGENS DE USINAS HIDRELÉTRICAS EM CASCATA NO
ACÚMULO DE MERCÚRIO EM COMPARTIMENTOS BIÓTICOS E ABIÓTICOS NA
AMAZÔNIA**

Cáceres, 25 de abril de 2025.

Banca Examinadora

Prof. Dra. Áurea Regina Alves Ignácio (orientadora) (Presidente) – Universidade do
Estado de Mato Grosso, Brasil

Prof. Dra. Maria Aparecida Pereira Pierangeli (Interna) - Universidade do Estado de
Mato Grosso, Brasil

Prof. Dr Gustavo Rogrigues Canele (Interno) - Universidade do Estado de Mato
Grosso/Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

Prof. Dra. Juliana Souza-Kasprzyk (Externa) - Adam Mickiewicz University, Polônia

Prof. Dr Inácio Abreu Pestana (Externo) – Universidade Federal Fluminense, Brasil

**CÁCERES
MATO GROSSO, BRASIL
2025**

DEDICATÓRIA

Dedico ao meu pai Pedro Hermelino de Oliveira *in memoriam*, minha mãe Santila Maria de Olivera e minha filha Elysa Otsuki de Oliveira.

*Água e educação.
Vou aprender a ler para ensinar meus camaradas.*

AGRADECIMENTO

Esta tese representa muito mais do que uma pesquisa científica com hipóteses, objetivos e metodologias de trabalho. Representa uma história contínua de estudo e dedicação à educação pública.

Meus pais, Pedro e Santila, sempre foram grandes incentivadores de todos os seus filhos, orientando-nos a nós dedicarmos em tudo o que fizéssemos. Foram eles os meus maiores apoiadores, minha filha Elysa, a razão, e a educação pública, o meu ideal. Foi por tudo isso que desenvolvi, com afinco, cada etapa deste processo. Concluo, assim, esta jornada acadêmica com muito esforço e dedicação. O doutorado é uma etapa árdua — como tantas outras da vida, ou talvez um pouco mais.

Elaborar uma tese não é fácil, especialmente no ambiente que escolhi: a Amazônia. Foram inúmeros dias em campo, com pouca estrutura, poucos recursos humanos e financeiros, enfrentando sol, chuva, medo, veículos e barcos quebrados em locais remotos — contando apenas com a boa vontade de quem, por ventura, passasse por ali.

Enfrentei muitos desafios: o carro que não subia uma serra puxando uma carretinha com mais de 600 kg e o precipício a um metro de distância; os 200 km percorridos para, ao fim, o proprietário da pousada não autorizar a entrada; a onça esturrando ao lado da barraca; noites dormindo literalmente em frente à saída de água dos vertedouros de uma usina; acordar com o barco afundado; atravessar corredeiras e ver o barco encalhar a mais de 30 km do ponto de apoio; não conseguir coletar a quantidade necessária de peixes e precisar extrapolar os dias em campo; ser rebocado por mais de 30 km após o motor do barco quebrar; presenciar um acidente com um colega de campo, que teve parte do dedo mordido por uma piranha; se perder no meio do rio no crepúsculo, devido ao excesso de fumaça; o medo de ser confundido com fiscalização pelos garimpeiros e pescadores irregulares; o carro atolando algumas vezes nas estradas amazônicas...

Mas tive sorte. Fiz amizades, encontrei parceiros, verdadeiros companheiros de jornada. Agradeço a todos, sem distinção.

Agradecimentos Institucionais

À **Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT**, por toda a dignidade que conquistei por meio da minha formação: graduação, mestrado e doutorado.

À **Secretaria de Estado de Educação do Estado de Mato Grosso**, pela concessão da Licença para Qualificação Profissional.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais**, aos coordenadores e professores que contribuíram significativamente para o meu processo de doutoramento.

Ao **Centro de Pesquisa em Limnologia, Biodiversidade e Etnobiologia do Pantanal – Celbe**, pela disponibilização do espaço físico, laboratórios e condições necessárias para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradecimento especial ao **Laboratório de Ecotoxicologia**, à professora Áurea e aos colegas que realizaram e/ou realizam pesquisas no espaço.

Ao **Laboratório de Investigação Ambiental do Pantanal – Lipan**, pelo empréstimo de equipamentos essenciais para a realização da pesquisa.

Ao **Laboratório de Ictiologia da Amazônia Meridional - Liam**, pelo empréstimo de equipamentos, cedência dos espaços, essenciais para a realização da pesquisa.

Ao **Laboratório de Pesquisa e Estudos em Geomorfologia “Sandra Baptista da Cunha” - LAPEGEOF**, especialmente à professora Leila e aos bolsistas do laboratório, pelo auxílio nas análises de solos.

Às **Pousadas Recanto Teles Pires e Inhé** e ao **Porto e Marina Santo Expedito**, pelo acolhimento de toda nossa equipe em campo.

Ao **Sindicato dos Trabalhadores no Ensino Público de Mato Grosso – Sintep-MT**, em especial a subsede de Cáceres, pelas lutas históricas e a conquista do direito a licença qualificação profissional.

Agradecimentos Pessoais

À **Professora Dra. Áurea Ignácio**, pelo aceite do desafio da orientação, pelo incentivo, pela disponibilidade de tempo e pela compreensão nos momentos difíceis da elaboração da tese.

À **Professora Dra. Daniela (Dani) Kasper**, pela leveza, sutileza, disponibilidade e amabilidade da orientação durante a elaboração da tese.

À **Professora Dra. Solange Arrolho**, por disponibilizar seu tempo, recursos e ombro amigo durante todo o trabalho de campo. Minha amiga, minha gratidão a você será eterna.

Ao **Professor Dr. Wilkinson (Kiwi) Lázaro**, pela disponibilidade em ensinar as metodologias, pela parceria nas leituras e sugestões nos artigos.

Ao **Professor Dr. Claumir Muniz**, pela presteza, recursos, amizade e parceria nos artigos.

Aos parceiros de campo, **Giovani Spinola, Odair, Claudemir (Mi), Fernando, Manga, Edilson, Adriano, Levanta e Solange**. Sem vocês, esta pesquisa não teria sido possível.

A todos os coautores que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos integrantes do Laboratório de Ecotoxicologia (**Giovani, Thaysa, Larissa, Jéssica e Jaqueline**), pelas conversas, risadas e parcerias.

Ao **Sr. Ageu, Barbixa, Cristiano e Sr. Ari**, por tornarem nossa vida em campo mais fácil em momentos difíceis, oferecendo alimento e abrigo.

Aos meus doguinhos que trouxeram leveza nos momentos difíceis (**Bela, Mariele, Hugo Chávez, Frida, Laura e Mel**).

A **Andréia Melo**, por sempre ter me incentivado. Sou eternamente grato por tudo o que fez por mim.

Agradeço ao meu amigo **Bogoni** pela parceira, amizade e apoio nos momentos difíceis que passei durante o processo.

Agradeço imensamente às pessoas que me ajudaram nos momentos mais difíceis (**Giovani, Bogoni, Taciane, Patrick, Mariana, Fernando e Oscar**). Vocês foram essenciais para enfrentar os dias difíceis e, literalmente, me deram abrigo.

Agradeço todos os amigos e colegas do CELBE pelas conversas, risadas e apoio (**Adriano, Ana Paula, Acisa, Reinato, Janeide, Adriely**).

Por fim, agradeço a toda a minha família, pelo incentivo incondicional: mãe, pai, irmãs, irmãos e minha filha amada.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
RESUMO.....	14
ABSTRACT	15
INTRODUÇÃO GERAL	17
OBJETIVOS	20
Objetivo geral	20
Objetivos específicos	20
REFERÊNCIAS.....	20
ARTIGO 01.....	23
Reservatórios em cascata afetam as concentrações de mercúrio em peixes do rio Teles Pires, Amazônia brasileira	23
Destaques	23
Resumo	24
Abstract	24
Resumo gráfico	25
Introdução	25
Materiais e métodos	27
Área de estudo.....	27
Amostragem.....	28
Análise de THg no tecido muscular.....	29
Análise de dados.....	29
Resultados	30
Peixes predadores	30
Peixes Predadores: <i>Serrasalmus rhombeus</i> , <i>Hydrolycus armatus</i> e <i>Plagioscion squamisissimus</i>	32
Peixes não predadores	34
Peixes não predadores: <i>Prochilodus nigricans</i> e <i>Myloplus</i> spp. e <i>Metynnis hypsauchen</i>	36
Discussão.....	38
Conclusão	43
REFERÊNCIAS.....	44
MATERIAL SUPLEMENTAR.....	49
ARTIGO 2.....	55

Dinâmica do mercúrio em sedimentos e solos de reservatórios hidrelétricos em cascata ao longo de um rio amazônico	55
Graphical abstract	56
Resumo	56
Abstract	57
1 Introdução	57
2 Materiais e métodos	60
2.1 Área de estudo.....	60
2.2 Amostragem.....	62
2.3 Caracterização do sedimento e solo	63
2.4 Quantificação de THg	63
2.5 Análise de dados.....	64
3. Resultados	64
4 Discussão.....	69
5 Conclusão	73
Referências	74
Material Suplementar	79
ARTIGO 3.....	84
Graphical abstract	85
Resumo	85
Abstract	86
Introdução	86
Materiais e métodos	88
Área de estudo.....	88
Amostragem.....	90
Análise de THg	91
Análise de dados.....	92
Resultados	93
Discussão.....	98
Conclusão	101
Referências	101
Material Suplementar	106
CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
ANEXO.....	109

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 01

Tabela Suplementar S1 Parâmetros limnológicos dos pontos amostrados em reservatórios hidrelétricas em cascata e ponto controle no Rio Teles Pires e Rio Juruena. U: upstream; D: downstream; C: control; Temp: temperatura da água; OD: oxigênio dissolvido na água; Cond.: Condutividade elétrica. (min-max) 50

Tabela Suplementar S2 Peixes predadores (piscívoros e/ou carnívoros) coletados em reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires (UHE Sinop, UHE Colíder, UHE Teles Pires e UHE São Manoel) e pontos controle (rios Teles Pires e Juruena) U = montante; D = jusante; C = ponto controle. 51

Tabela Suplementar S3 Peixes não predadores coletados em reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires (UHE Sinop, UHE Colíder, UHE Teles Pires e UHE São Manoel) e pontos controle (rios Teles Pires e Juruena) U = montante; D = jusante; C = ponto controle. 53

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 01

Fig. 1 Locais de amostragem na Bacia Amazônica, Brasil. SI: UHE Sinop, CO: UHE Colider, TP: UHE Teles Pires, SM: UHE São Manoel. Triângulos indicam pontos controle. Setas indicam o fluxo dos rios. 28

Fig. 2. Concentração de mercúrio total (THg) em músculo de peixes predadores coletados em hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires e pontos controle nos rios Teles Pires e Juruena. Letras diferentes acima dos boxplots indicam diferença significativas entre os grupos (Contrastes de Tukey). Letras no eixo X: SIU: Sinop a montante, SID: Sinop a jusante; COU: Colíder a montante; COD: Colíder a jusante; TPC: Controle do Teles Pires; TPU: Teles Pires a montante; TPD: Teles Pires a jusante; SMU: São Manoel a montante; SMD: São Manoel a jusante; JUR: Controle do Juruena. A seta indica a direção do fluxo de água do rio Teles Pires. Pontos pretos indicam outliers. 31

Fig. 3 Concentração de mercúrio total em músculo de *S. rhombeus* (A), *H. armatus* (B) e *P. squamosissimus* (C) de hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires e pontos controle em relação ao comprimento padrão. 33

Fig. 4 Concentração de mercúrio total no tecido muscular de peixes predadores de *S. rhombeus* (A), *H. armatus* (B) e *P. squamosissimus* (C) coletados em barragens hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires, ponto de controle nos rios Juruena e Teles Pires. Letras diferentes acima dos boxplots indicam diferenças significativas entre os grupos (Tukey). Letras no eixo X: SIU: Sinop a montante, SID: Sinop a jusante; COU: Colíder a montante; COD: Colíder a jusante; TPC: Controle do Teles Pires; TPU: Teles Pires a montante; TPD: Teles Pires a jusante; SMU: São Manoel a montante; SMD: São Manoel a jusante; JUR: Controle do Juruena. 34

Fig. 5 Concentração de mercúrio total (THg) no músculo de peixes não predadores, ajustada pela espécie de peixe como variável aleatória, coletados em barragens hidrelétricas em cascata no Rio Teles Pires e pontos de controle nos rios Teles Pires e Juruena: todos os espécimes avaliados. Letras no eixo X: SIU: Sinop a montante, SID: Sinop a jusante; COU: Colíder a montante; COD: Colíder a jusante; TPC: Controle do Teles Pires; TPU: Teles Pires a montante; TPD: Teles Pires a jusante; SMU: São Manoel a montante; SMD: São Manoel a jusante; JUR: Controle do Juruena. A seta indica a direção do fluxo de água do rio Teles Pires. 35

Fig. 6 Concentração de mercúrio total (THg) em músculo de *Prochilodus nigricans* de hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires e pontos controle em relação ao comprimento padrão. 37

Fig. 7 Concentração de mercúrio total (THg) em músculo de *Prochilodus nigricans* (A) e *Myloplus spp/Mettynnis* (B) a montante e jusante de hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires e nos locais nomeados controle. Letras no eixo X: SIU: Sinop a montante, SID: Sinop a jusante; COU: Colíder a montante; COD: Colíder a jusante; TPC: Controle do Teles Pires; TPU: Teles Pires a montante; TPD: Teles Pires a jusante; SMU: São Manoel a montante; SMD: São Manoel a jusante; JUR: Controle do Juruena. 38

ARTIGO 2

Fig. 1. Locais de amostragem na Bacia Amazônica, Brasil. Círculos vermelhos indicam as usinas hidrelétricas (UHEs) amostradas no rio Teles Pires. Os triângulos pretos são os locais de amostragem controle nos rios Teles Pires e Juruena. SI: UHE Sinop, C CO: UHE Colíder, TP: UHE Teles Pires, SM: UHE São Manoel. Setas indicam o fluxo dos rios.....62

Fig. 2. Concentração de mercúrio total (THg) em solos de diferentes profundidade coletados nas margens do rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle) e rio Juruena (ponto controle sem barragens) na bacia Amazônica. Pontos pretos indicam outliers. 65

Fig. 3. Concentração de mercúrio total (THg) em amostras de solos coletados as margens do rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e pontos controle) e rio Juruena (ponto controle sem reservatório hidrelétrica) na bacia Amazônica. Letras diferentes no boxplot indicam diferenças estatísticas (Teste de Tukey). Pontos pretos indicam outliers. Letras no eixo X U: montante do reservatório, D: jusante do reservatório, e C: pontos controle. 66

Fig. 4. Concentrações de mercúrio total (THg) em sedimentos de fundo coletados em reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle no rio Teles Pires e rio Juruena (ponto controle) na bacia Amazônica. Pontos pretos indicam outlier. Letras no eixo X U: montante do reservatório, D: jusante do reservatório, e C: pontos controle. Pontos pretos indicam outliers.....67

Fig. 5. Biplot baseado em Análise de Componentes Principais para granulometria, matéria orgânica (OM) e concentração de mercúrio total (THg) em sedimento (A) e solo (B) coletados em reservatórios hidrelétricos em cascata e as margens do rio Teles Pires e rio Juruena (ponto controle sem reservatório) na bacia Amazônica....68

Fig. S1. Concentração de mercúrio total (THg) em sedimentos do rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle) e rio Juruena (ponto controle) na bacia Amazônica. Amostras coletadas durante período seco e chuvoso. Ponto preto indica outlier. 80

Fig. S2. Concentração de mercúrio total (THg) normalizada pelo teor de silte+argila em sedimentos de fundo coletados no Rio Teles Pires (usinas hidrelétricas em cascata e pontos controle) e do Rio Juruena (pontos de controle sem barragens) na Bacia Amazônica. Letras diferentes acima do boxplot indicam diferenças estatísticas (teste de Tukey). Os pontos pretos representam outliers. As letras no eixo X significam U: montante da barragem, D: jusante da barragem, C: controle e T. Pires: Teles Pires. 81

Fig. S3. Concentração de mercúrio total (THg) em sedimentos de fundo e solos pelo percentual de silte+argila e material orgânica (OM) coletados no rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle) e rio Juruena (ponto controle sem barragem) na bacia amazônica.....82

Fig. S4. Relação da oncentração de mercúrio total (THg) em sediment e solo (0-30 cm) coletados no rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle) e rio Juruena (ponto controle) na bacia amazônica.....83

ARTIGO 3

Fig. 1. Locais de amostragem na Bacia Amazônica, Brasil. Usinas Hidrelétricas no Rio Teles Pires: SI: Sinop, CO: Colíder, TP: Teles Pires, SM: São Manoel. Seta indica o fluxo do rio. 90

Fig. 2. Concentração de mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão de amostras superficiais (SPM), fitoplâncton e zooplâncton em reservatórios hidrelétricos na Amazônia Meridional nos períodos pluviométricos seco (dry) e chuvoso (wet). Usinas Hidrelétricas de SNP: Sinop, COL: Colíder, TPS: Teles Pires, SML: São Manoel. Pontos pretos indicam outliers. 94

Fig. 3. Concentração de mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão (SPM) da região lacustre de reservatórios hidrelétricos na Amazônia Meridional nos períodos pluviométricos seco (dry) e chuvoso (wet). Pontos pretos indicam outliers. 95

Fig. 4. Modelo de equações estruturais para indicar as relações lineares de causa e efeito entre as concentrações de mercúrio total (THg) no zooplâncton (Zoo), fitoplâncton (Phy) e material particulado em suspensão (SPM), os parâmetros limnológicos e os pontos de amostragem (Sit) em reservatórios hidrelétricos na Amazônia Meridional. Os vetores azuis e vermelhos representam efeitos positivos e negativos, respectivamente. Vetores contínuos indicam a relação entre as variáveis propostas no modelo, vetores pontilhados indicam interação observadas no modelo teórico. A espessura dos vetores indica o tamanho dos efeitos. pH: potencial hidrogeniônico; DO: oxigênio dissolvido; Cnd: condutividade elétrica.....96

Fig. 5. Concentração de mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão da água superficial (SPM), fitoplâncton (Phyto) e zooplâncton (Zoo) em reservatórios hidrelétricos e pontos controles na Amazônia Meridional. Usinas hidrelétricas de SNP: Sinop, COL: Colíder, TPS: Teles Pires, SML: São Manoel. Pontos controles nos rios Teles Pires (TPC) e Juruena (JUR). Pontos pretos indicam outliers. 97

Fig. 6. Concentração de mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão da água superficial (SPM), fitoplâncton (Phyto) e zooplâncton (Zoo) no período seco (dry) e chuvoso (wet) em reservatórios hidrelétricos e pontos controle na Amazônia Meridional. Pontos pretos indicam outliers. 98

Fig. S1. Variação sazonal em perfil vertical dos parâmetros limnológicos e mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão (SPM) no ambiente lacustre dos reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires, Amazônia. 106

OLIVEIRA, Edvagner de. **EFEITOS DE BARRAGENS DE USINAS HIDRELÉTRICAS EM CASCTA NO ACÚMULO DE MERCÚRIO EM COMPARTIMENTOS BIÓTICOS E ABIÓTICOS NA AMAZÔNIA**. Cáceres: UNEMAT, 2024. 118p. (Tese – Doutorado em Ciências Ambientais).

RESUMO

O mercúrio (Hg), um poluente global, pode ter sua contaminação potencializada em ambientes aquáticos represados, como hidrelétricas. Nesta tese, foi avaliada a contaminação por esse metal em quatro usinas com grandes reservatórios em cascata no rio Teles Pires, afluente da bacia do Tapajós, na Amazônia brasileira (reservatórios de Sinop, Colíder, Teles Pires e São Manoel). A tese é apresentada em três artigos e tem como objetivo avaliar o efeito espacial dos reservatórios hidrelétricos em cascata na contaminação por Hg em peixes, sedimentos, solo, material particulado em suspensão (SPM), fitoplâncton e zooplâncton. No primeiro capítulo, foi observado que os peixes predadores localizados a jusante das barragens apresentaram concentrações de Hg maiores que aqueles a montante. Houve aumento das concentrações de Hg ao longo do fluxo do rio, quando comparados apenas os lagos dos reservatórios (a montante da barragem), sugerindo um efeito cumulativo. Cerca de 53% dos peixes dos reservatórios apresentaram concentrações superiores ao limite de $500 \mu\text{g kg}^{-1}$ w.w. recomendado pela OMS, e 89% dos peixes a jusante estavam acima desse limite. Os peixes não predadores não apresentaram amplificação da contaminação ao longo dos reservatórios em cascata. No segundo capítulo, observamos que os sedimentos dos reservatórios apresentaram maiores concentrações de Hg quando comparados às suas regiões a jusante. Também verificamos que as concentrações de Hg nos sedimentos aumentaram de acordo com os reservatórios em cascata. Os solos laterais nas margens dos reservatórios hidrelétricos apresentaram aumento das concentrações de Hg ao longo do fluxo dos reservatórios, desde o reservatório de Sinop até o reservatório de Teles Pires, diminuindo no último ponto amostral (reservatório de São Manoel). Houve uma relação positiva entre as concentrações de Hg no solo e no sedimento, sugerindo uma possível transferência de Hg durante o enchimento do reservatório. No terceiro capítulo, avaliamos a relação do Hg em SPM e plâncton em relação à sazonalidade e espacialidade. Os resultados sugerem biomagnificação do Hg, pois encontramos concentrações de Hg na seguinte ordem: $\text{SPM} < \text{fitoplâncton} < \text{zooplâncton}$. Também foram observados efeitos cumulativos

das concentrações de Hg na sequência dos reservatórios em cascata (1ª UHE Sinop < 2ª UHE Colíder < 3ª UHE Teles Pires < 4ª UHE São Manoel). Pode-se concluir que a contaminação por Hg pode ser influenciada pelos reservatórios em cascata, especialmente na região a montante das barragens.

Palavras-chave: mercúrio total, bioacumulação, peixes tropicais, solo, material particulado em suspensão, sedimento, plâncton

ABSTRACT

OLIVEIRA, Edvagner de. **EFFECTS OF CASCADE HYDROELECTRIC DAMS ON MERCURY ACCUMULATION IN BIOTIC AND ABIOTIC COMPARTMENTS IN THE AMAZON**. Cáceres: UNEMAT, 2024. 118p. (Thesis - PhD in Environmental Sciences).

Mercury (Hg), a global pollutant, can have its contamination potential enhanced in impounded aquatic environments, such as hydroelectric reservoirs. This dissertation assesses Hg contamination in four large cascade reservoirs along the Teles Pires River, a tributary of the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon (Sinop, Colíder, Teles Pires, and São Manoel reservoirs). Presented in three articles, this study aims to evaluate the spatial effects of cascade hydropower reservoirs on Hg contamination in fish, sediments, soil, suspended particulate matter (SPM), phytoplankton, and zooplankton. In the first chapter, we observed that predatory fish located downstream of the dams exhibited higher Hg concentrations than those upstream. An increase in Hg concentrations was detected along the river's flow when comparing only the reservoir lakes (upstream of the dam), suggesting a cumulative effect. Approximately 53% of the fish from the reservoirs exceeded the WHO's recommended limit of 500 $\mu\text{g kg}^{-1}$ w.w., and 89% of the downstream fish were above this threshold. Non-predatory fish did not show an amplification of contamination along the cascade of reservoirs. In the second chapter, we found that sediment Hg concentrations were higher within the reservoirs compared to their downstream areas. Additionally, Hg concentrations in sediments increased following the river's flow. Lateral soils of the hydroelectric reservoirs also showed increasing Hg concentrations from the Sinop reservoir to the Teles Pires reservoir, with a decline at the last sampling site (São Manoel reservoir). A positive correlation was found between Hg concentrations in soil and sediment, suggesting a possible transfer of Hg during reservoir filling. In the third

chapter, we examined Hg in SPM and plankton in relation to seasonality and spatial distribution. The results suggest Hg biomagnification, as we found mercury concentrations following the order: SPM < phytoplankton < zooplankton. Additionally, cumulative Hg effects were observed in the sequential order of cascade reservoirs (1 Sinop HPP < 2 Colíder HPP < 3 Teles Pires HPP < 4 São Manoel HPP). In conclusion, Hg contamination appears to be influenced by the cascade of reservoirs, particularly in areas upstream of the dams.

Keywords: total mercury, bioaccumulation, tropical fish, soil, suspended particulate matter, sediment, plankton

INTRODUÇÃO GERAL

A problemática da contaminação da biota por metais, principalmente o mercúrio (Hg), é amplamente discutida no globo devido sua alta toxicidade para a biota, ocasionando alterações nos processos fisiológicos e neurológicos dos organismos (HARGREAVE et al., 2011; BURGER et al., 2015). Na Amazônia brasileira, as pesquisas com Hg se intensificaram a partir da década de 1990, principalmente em sítios garimpeiros de ouro, devido ao uso extensivo do Hg no processo de amalgamação para extração do ouro, seguido de descarte inadequado ao ambiente (LACERDA et al., 1991; AKAGI et al., 1995; HACON et al., 1995; CAMARA et al., 1997). Estima-se que neste período foram lançados entre 2000 e 3000 toneladas de Hg no ambiente amazônico (MALM, 1998).

Os metais existem naturalmente no ambiente em compartimentos abióticos como rochas, e são liberados devido ao intemperismo. Suas concentrações podem ser alteradas por processos antropogênicos com atividades ligadas ao uso do solo, como o desflorestamento para monoculturas agrícolas e silvicultura, ligadas aos processos industriais, a mineração em pequena escala e ao descarte inadequado nos ecossistemas (ALLOWAY; AYRES, 1998). Mais recentemente, o represamento de cursos d'água, tem causado preocupação no campo da ecotoxicologia, devido a reestruturação das condições físicas e químicas das regiões afetadas pelos barramentos e consequente alterações nos processos fisiológicos e ecológicos da comunidade aquática (LACERDA; MALM, 2008, KASPER et al., 2012, KASPER et al. 2014, PESTANA et al. 2019).

A política energética brasileira é baseada principalmente na construção de barragens hidrelétricas. No bioma amazônico desde a década de 1970 até o início do ano de 2013, treze grandes barragens com capacidade superior a 30 MW já tinham seus reservatórios cheios, no plano decenal 2013/2023 foram indicadas a construção de 12 barragens hidrelétricas na região norte, local onde se encontra a maior parte da Amazônia brasileira, além de 7 projetadas para construção (Brasil, 2023). Na bacia do rio Juruena, afluente do Tapajós, importante bacia hidrográfica amazônica, até o ano de 2023 foram registrados 179 empreendimentos hidrelétricos de diferentes modalidades, planejadas e/ou em construção, sendo grande parte no estado de Mato Grosso (PEREIRA, 2023).

O fluxo das águas nos rios é alterado com os represamentos, consequentemente ocorre estratificação límnic, com diferenças térmicas e de

disponibilidade de oxigênio entre os estratos (CANAVAN et al., 2000, KASPER et al., 2014, PESTANA et al., 2019). A camada hipolímica tende a ser anóxica, isso ocorre devido a mobilização de matéria orgânica para o corpo hídrico e a lenta decomposição, condições propícias à metilação do Hg (FORSBERG et al., 2017). A condição de anoxia ocorreu em profundidade superiores a 15 m em estudo desenvolvido por Kasper et al. (2014) no reservatório hidrelétrico de Balbina na Amazônia, sendo encontradas correlações negativas entre a disponibilidade de oxigênio dissolvido e o metilmercúrio (MeHg) dissolvido na água. No mesmo trabalho, não houve variações nas concentrações de MeHg no período chuvoso no qual não ocorreu estratificação térmica e variações na disponibilidade de oxigênio dissolvido (KASPER et al., 2014).

Na UHE Sinop, no rio Teles Pires, Fearnside (2019) destaca que o enchimento do reservatório ocorreu com a supressão de apenas 30% da vegetação, fato que favorece a emissão de metano, bem como as condições propícias a metilação do Hg, pois o solo amazônico, em sua maioria, apresenta naturalmente este metal.

O Hg apresenta tendência de biomagnificação nas cadeias tróficas (MARSHALL et al., 2016), portanto organismos de elos tróficos superiores tendem a apresentar teores maiores de concentração de mercúrio. As alterações ocasionadas pelos reservatórios hidrelétricos, favorecem o lançamento do particulado hipolimnico a jusante, possibilitando a disponibilização para a biota e consequente aumento das concentrações de Hg (KASPER et al., 2014; FORSBERG et al., 2017).

Estudos demonstram que os barramentos potencializam as concentrações de Hg na biota de reservatórios e a jusante, pois é transportado a jusante no particulado, dissolvido em água e no plâncton (SCHETAGNE et al., 2000). Análise em plâncton a jusante 35 Km do reservatório hidrelétrico de Balbina na Amazônia evidenciou a exportação de MeHg, sugerindo a entrada na cadeia trófica e maiores concentrações na comunidade íctica de níveis tróficos superiores (KASPER et al., 2014) de diferentes guildas tróficas como peixes onívoros e carnívoros (KASPER et al., 2012).

Além da contaminação da biota, comunidades ribeirinhas do entorno de reservatórios hidrelétricos estão expostas a uma maior contaminação por Hg. Isso ocorre devido ao pescado ser a principal fonte proteica dessas comunidades conforme relatado por Bastos (2006), onde 78% das pessoas entrevistadas

consumiam peixes pelo menos duas vezes ao dia. No reservatório de Balbina houve um acréscimo na contaminação de Hg em *Cichla* spp. nos primeiros 5 anos de represamento, o mesmo ocorrendo com a contaminação no cabelo da população ribeirinha que possuía esses peixes como fonte proteica, havendo diminuição dos níveis de concentração de mercúrio somente após 10 anos, porém com valores superiores ao inicialmente amostrados (FORSBERG et al., 2017).

Reservatórios em cascata são dois ou mais barramentos hidrelétricos em um mesmo corpo hídrico. A dinâmica da contaminação por mercúrio em reservatórios hidrelétricos em cascata ainda é pouco conhecida, sobretudo por haver vários fatores que dificultam a interpretação da contaminação, como a construção de hidrelétricas em rios que já possuem barramentos, interferindo no fluxo do mercúrio e consequentemente na contaminação, uma vez que os barramentos possuem idades, profundidade, tempo de residência hídrica e tamanhos diferentes (MA et al., 2022). O padrão de estratificação nos reservatórios em cascata, embora não linear, pode correlacionar com as concentrações de mercúrio na biota. Willacker et al. (2023) observaram maiores concentrações de Hg nos peixes carnívoros nos reservatórios estratificados em comparação àqueles em fluxo livre e com reservatórios não estratificados; os reservatórios não estratificados apresentaram concentrações similares quando comparados entre si no complexo de reservatórios.

Haja vista o potencial de amplificação das concentrações de Hg em represamentos hidrelétricos e a implantação de reservatórios hidrelétricos em cascata em um mesmo corpo hídrico, torna-se necessário compreender o efeito cumulativo desses empreendimentos sobre biota. Assim, propomos com este estudo ampliar o conhecimento acerca da contaminação por Hg na biota em ambientes de represamento hidrelétrico.

Esta tese está dividida em três capítulos. O primeiro aborda a contaminação espacial de mercúrio total (THg) em peixes predadores e não predadores a montante e jusante do complexo de reservatórios hidrelétricos em cascata do rio Teles Pires. O segundo capítulo aborda a dinâmica espacial e temporal do THg em sedimento a montante e jusante do complexo de reservatórios em cascata do Rio Teles Pires e o THg do solo em seu entorno, bem como o efeito granulométrico e matéria orgânica nas concentrações de THg de ambos os compartimentos. O terceiro capítulo destaca o efeito espacial e temporal nas concentrações de THg em

material particulado em suspensão, fitoplâncton e zooplâncton de quatro reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Avaliar o efeito de quatro barragens hidrelétricas em cascata na acumulação de mercúrio total (THg) em componentes bióticos e abióticos na Amazônia.

Objetivos específicos

- Avaliar as concentrações de THg em tecido muscular de peixes predadores e não predadores em reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires, Amazônia;
- Avaliar a concentração de THg em solo e sedimentos em reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires, Amazônia;
- Avaliar o efeito espacial e temporal de reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires, nas concentrações de THg em material particulado em suspensão, fitoplâncton e zooplâncton.

REFERÊNCIAS

AKAGI, H.; MALM, O.; KINJO, Y.; HARADA, M.; BRANCHES, F. J. P.; PFEIFFER, W. C.; KATO, H. Methylmercury pollution in the Amazon, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 175, n. 2, p. 85–95, 1995.

ALLOWAY, B. J.; AYRES, D.C. Chemical Principles of Environmental Pollution. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 102, p. 216, 1998.

BASTOS, W. R.; GOMES, J. P. O.; OLIVEIRA, R. C.; ALMEIDA, R.; NASCIMENTO, E. L.; BERNARDI, J. V. E.; LACERDA, L. D.; SILVEIRA E. G.; PFEIFFER, W. C. Mercury in the environment and riverside population in the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. **Science of the Total environment**, v. 368, n. 1, p. 344-351, 2006.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Expansão de Energia 2023. Brasil. Ministério do Meio Ambiente Procedimentos de Licenciamento Ambiental do Brasil / Maria Mônica Guedes de Moraes e Camila Costa de Amorim, autoras; Marco Aurélio Belmont e Pablo Ramosandrade Villanueva, Organizadores. – Brasília: MMA/EPE, 2023. p. 434

BURGER, J.; TSIPOURA, N.; NILES, L., GOCHFELD, M.; DEY, A.; MIZRAHI, D. Mercury, lead, cadmium, arsenic, chromium and selenium in feathers of shorebirds

during migrating through Delaware Bay, New Jersey: comparing the 1990s and 2011/2012. **Toxics**, v. 3, n. 1, p. 63-74, 2015.

CÂMARA, V. D. M.; SILVA, A. P. D.; MACIEL, M. V.; PIVETTA, F.; PEREZ, M. A. Mercury exposure and health effects among urban residents due to gold commercialization in Poconé, MT, Brazil. CETEM/CNPq, **Série Tecnologia Ambiental**, v. 19, Rio de Janeiro, p.20, 1997.

CANAVAN, C. M.; CALDWELL, C. A.; BLOOM, N. S. Discharge of methylmercury-enriched hypolimnetic water from a stratified reservoir. **Science of the Total Environment**, v. 260, n. 1-3, p. 159-170, 2000.

FEARNSIDE, P.M. A Hidrelétrica de Sinop: Um teste para a legislação ambiental brasileira. p. 133-148. In: P.M. Fearnside (ed.) **Hidrelétricas na Amazônia: Impactos Ambientais e Sociais na Tomada de Decisões sobre Grandes Obras**. vol. 3. Manaus: Editora do INPA, 148 p., 2019.

FORSBERG, B. R.; MELACK, J. M.; DUNNE, T.; BARTHEM, R. B.; GOULDING, M. PAIVA, R. C.; SORRIBAS, M. V.; SILVA JR, U. L.; WISSER, S. The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. **PLoS One**, v. 12, n. 8, 2017.

HACON, S.; ARTAXO, P.; GERAB, F.; YAMASOE, M. A.; CAMPOS, R. C.; CONTI, L. F.; DE LACERDA, L. D. Atmospheric mercury and trace elements in the region of Alta Floresta in the Amazon basin. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 80, n. 1-4, p. 273-283, 1995.

HARGREAVES, A. L.; WHITESIDE, D. P.; GILCHRIST, G. Concentrations of 17 elements, including mercury, in the tissues, food and abiotic environment of Arctic shorebirds. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 19, p. 3757-3770, 2011.

KASPER, D.; PALERMO, E. F. A.; BRANCO, C. W. C.; MALM, O. Evidence of elevated mercury levels in carnivorous and omnivorous fishes downstream from an Amazon reservoir. **Hydrobiologia**, v. 694, n. 1, p. 87-98, 2012.

KASPER, D.; FORSBERG, B. R.; AMARAL, J. H.; LEITÃO, R. P.; PY-DANIELI, S. S.; BASTOS, W. R.; MALM, O. Reservoir stratification affects methylmercury levels in river water, plankton, and fish downstream from Balbina hydroelectric dam, Amazonas, Brazil. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 2, p. 1032-1040, 2014.

LACERDA, L. D.; PFEIFFER, W. C.; MARINS, R. V.; RODRIGUES, S.; SOUZA, C. M. M.; BASTOS, W. R. Mercury dispersal in water, sediments and aquatic biota of a

gold mining tailing deposit drainage in Pocone, Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 55, n. 3-4, p. 283-294, 1991.

LACERDA, L. D.; MALM, O. Mercury contamination in aquatic ecosystems: an analysis of the critical areas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 173-190, 2008.

MA, H.; CHEN, Y.; CHEN, Q.; Liu, D., ZHANG, J.; TONINA, D. Dam cascade unveils sediment methylmercury dynamics in reservoirs. **Water Research**, 212, 118059, 2022.

MALM, O. Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. **Environmental research**, v. 77, n. 2, p. 73–8, 1998.

MARSHALL, B. G.; FORSBERG, B. R.; THOMÉ-SOUZA, M.; PELEJA, R.; MOREIRA, M. Z.; FREITAS, C. E. C. Evidence of mercury biomagnification in the food chain of the cardinal tetra *Paracheirodon axelrodi* (Osteichthyes : Characidae) in the Rio Negro , central Amazon , Brazil. **Journal of Fish Biology**, p. 1–21, 2016.

PEREIRA, C.F. R. Monitoramento das Hidreletricas na Bacia do Juruena. Programa de Direitos Indigenas, Politica Indiginista e Informação a Sociedade. **Operação Amazônia Nativa**, 2023.

PESTANA, I. A.; AZEVEDO, L. S.; BASTOS, W. R.; de SOUZA, C. M. M. The impact of hydroelectric dams on mercury dynamics in South America: A review. **Chemosphere**, 219, 546-556, 2019.

SCHETAGNE, R.; DOYON, J-F.; FOURNIER, J-J. Export of mercury downstream from reservoirs. **Science of the Total Environment**, v. 260, n. 1-3, p. 135-145, 2000.

WILLACKER, J. J.; EAGLES-SMITH, C. A.; CHANDLER, J. A.; NAYMIK, J. MYERS, R.; KRABBENHOFT, D. P. Reservoir Stratification Modulates the Influence of Impoundments on Fish Mercury Concentrations along an Arid Land River System. **Environmental Science & Technology**, 57(50), 21313-21326, 2023.

ARTIGO 01

Reservatórios em cascata afetam as concentrações de mercúrio em peixes do rio Teles Pires, Amazônia brasileira

Cascade reservoirs affect mercury concentrations in fish from Teles Pires river, Brazilian Amazon

Edvagner Oliveira^a; Daniele Kasper^b; Solange Arrolho da Silva^c, Wilkinson Lopes Lázaro^a, Claumir Cesar Muniz^a, Giovani Spinola de Carvalho^a, Fernando Vieira Borges^a, Adriano Luiz Pimenta^c, Thaysa Costa Hurtado^a, Áurea Regina Alves Ignácio^a

^aPrograma de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Estudos em Limnologia, Biodiversidade e Etnobiologia do Pantanal, Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, Mato Grosso Brazil

^bInstituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

^cPrograma de Mestrado profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ANA/UNEMAT), Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta, Mato Grosso, Brazil

Destaques

Altas concentrações de Hg em peixes predadores revelam a necessidade de atenção à biota amazônica

Reservatórios de hidrelétricos contribuem para o aumento da contaminação por Hg em peixes predadores

Reservatórios de hidrelétricas em cascata exibem um efeito sinérgico na contaminação por Hg.

[Preparado de acordo com as normas de publicação da revista *Ecotoxicology* (Print ISSN: 0963-9292. Online ISSN: 1573-3017). Fator de impacto 2.7. Situação da submissão: aceite]. Oliveira, E., Kasper, D., Silva, S. A. A., Lázaro, W. L., Muniz, C. C., Carvalho, G. S., Borges, F. V., Pimenta, A. L., Hurtado, T. C., & Ignácio, Á. R. A. (2025). Cascade reservoirs affect mercury concentrations in fish from Teles Pires river, Brazilian Amazon. *Ecotoxicology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-024-02847-8>

Resumo

Reservatórios hidrelétricos favorecem a contaminação por mercúrio na biota, mas o efeito cumulativo da contaminação em reservatórios em cascata ainda não é clara. Investigamos a contaminação por mercúrio total (THg) em peixes em quatro reservatórios em cascata na Amazônia brasileira entre agosto/2022 e abril/2023. De modo geral, os peixes predadores de áreas a jusante apresentaram maiores concentrações de mercúrio do que aqueles de montante. As concentrações de mercúrio nos peixes predadores coletados a montante aumentaram nos reservatórios ao longo do rio. A jusante, essas foram sempre elevadas, não variando entre reservatórios. Os peixes não predadores não apresentaram uma clara tendência espacial nas concentrações de mercúrio. Tendo em vista que o efeito cumulativo dos reservatórios em cascata foi claro em peixes predadores, e que a espécie *Serrasalmus rhombeus* é amplamente distribuída e importante para a pesca da região, sugerimos esta como uma espécie alvo para futuros estudos sobre o tema na região.

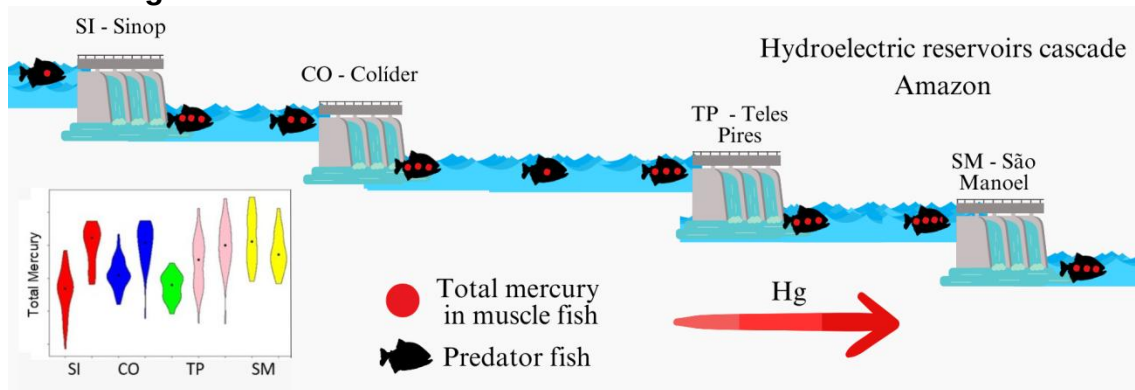
Palavras-chave: bioacumulação; Amazônia; Mercúrio Total, peixes tropicais

Abstract

Hydroelectric reservoirs favor mercury contamination in biota, but the contamination in cascade reservoirs is not yet clear. We investigated total mercury (THg) contamination in fish in four cascade reservoirs in the Brazilian Amazon between August 2022 and April 2023. Overall, downstream predatory fish showed higher mercury concentrations than those upstream. Mercury concentrations in predatory fish collected upstream increased in the reservoirs along the river. Downstream, these concentrations were consistently high, with no variation between reservoirs. Non-predatory fish did not exhibit a clear spatial trend in mercury concentrations. Considering that the synergistic effect of cascade reservoirs was evident in predatory fish, and that the species *Serrasalmus rhombeus* is widely distributed and important for regional fishing, we suggest it as a target species for future studies on this issue in the region.

Keywords: bioaccumulation; Amazon; Total Mercury; tropical fish

Resumo gráfico



Introdução

Reservatórios hidrelétricos afetam o ciclo natural de compartimentos bióticos e abióticos dos ecossistemas aquáticos (Fearnside, 2015). Dentre os problemas, a contaminação por mercúrio (Hg) da ictiofauna tem sido abordada em diversos estudos (Kasper et al., 2012; Palermo et al., 2014; Pestana et al., 2019a, 2019b; Matos et al., 2021) devido à sua alta toxicidade para a biota, inclusive para o homem (Lacerda and Malm 2008, Poulin and Gibb 2008). O Hg é classificado entre os dez poluentes de maior preocupação pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2024).

A criação dos lagos artificiais das hidrelétricas leva à formação de ambientes semilóticos alterando os aspectos limnológicos, como estratificação térmica, disponibilidade de oxigênio e pH (Canavan et al., 2000). Um padrão observado em diversos estudos é o aumento nas concentrações de Hg na biota do reservatório logo após o seu enchimento e ainda há muita discussão acerca do tempo para a diminuição dessas concentrações, que poderia durar de anos a muitas décadas (e.g., Forsberg et al., 2017; Pestana et al. 2019b).

O hipolímnio desses ambientes tende a ser anóxico, isso ocorre devido ao carreamento de matéria orgânica para o fundo do corpo hídrico e sua lenta decomposição, condições propícias à transformação do Hg em MeHg (metilmercúrio) por via biótica ou abiótica neste compartimento da coluna d'água (Forsberg et al., 2017). Uma vez formado, o MeHg pode ser carreado, associado a partículas orgânicas, para jusante da barragem, pela ação das tomadas de água para as turbinas da barragem, aumentando a disponibilidade de Hg para a biota e consequente aumento de suas concentrações (Schetagne et al. 2000, Kasper et al. 2014; Forsberg et al. 2017). Assim, a ictiofauna de diferentes guildas tróficas, como carnívoros e piscívoros, localizados a jusante, pode apresentar concentrações de Hg

maiores que as presentes nos peixes a montante (Dominique et al., 2007; Kasper et al., 2012, Cebalho et al. 2017).

Alguns aspectos dos reservatórios, como tamanho, profundidade, tempo de enchimento, estratificação e estágio trófico podem fornecer efeito de confundimento na interpretação de como ocorre a contaminação de Hg na biota. Em áreas sem barramentos, o modulador da contaminação em peixes é a posição trófica dos animais, a disponibilidade de alimentos e a idade dos peixes (Palermo et al. 2004; Bastos et al. 2007; Polak-Juszczak 2018). Na Amazônia o Hg associado ao solo, parece ser modulador nas concentrações de Hg na biota (Lechler et al., 2000), sendo os reservatórios moduladores da contaminação de Hg. Reservatórios em cascata, apesar de possuírem efeito sinérgico (Willacker et al., 2023) ainda se apresentam como incógnita no ciclo biogeoquímico do Hg, tanto no efeito individual de cada estrutura, sobretudo devido as particularidades de cada barragem, como por exemplo, profundidade e descarga d'água nos condutos e vertedouros. Os reservatórios hidrelétricos, além de alterarem o meio ambiente, afetam o transporte de metais e outros compostos, bem como a metilação do mercúrio (Kasper et al. 2014). Em reservatórios em cascata, fatores como posição, tempo de residência e idade podem influenciar a disponibilidade de Hg (Ma et al. 2022).

Outro problema associado à contaminação por Hg em reservatórios hidrelétricos é a exposição humana ao metal, devido o peixe ser uma das principais fontes protéicas para as comunidades ribeirinhas onde essas estruturas são instaladas (Bastos et al., 2006). No reservatório de Balbina houve um acréscimo na contaminação de *Cichla* spp. nos primeiros 5 anos de represamento, o mesmo ocorrendo com a contaminação no cabelo da população ribeirinha que se alimentaram cotidianamente de peixes, havendo diminuição dos níveis de concentração de mercúrio somente após 10 anos, porém com valores superiores ao inicialmente amostrados (Forsberg et al., 2017).

Atualmente, a geração energia hidrelétrica em nível global representa 63% da produção de energia renovável e quase 16% da produção total de energia (Tefera and Kasiviswanathan, 2022). No Brasil, a política energética é baseada principalmente na construção de barragens hidrelétricas, ocorrendo na Amazônia desde a década de 1970. Até o início do ano de 2013, 13 grandes barragens com capacidade superior a 30 MW já tinham seus reservatórios enchidos (Fearnside, 2015). Atualmente quatro grandes hidrelétricas estão em operação no rio Teles

Pires. Compreender a dinâmica do mercúrio em complexos de reservatórios hidrelétricos em um mesmo corpo hídrico é fundamental para compreensão do ciclo do mercúrio e biomonitoramento da ictiofauna à luz da Convenção de Minamata (UNEP, 2013), da qual o Brasil é signatário.

Este trabalho tem o objetivo de avaliar a acumulação de Hg em peixes a montante e jusante de reservatórios hidrelétricos ao longo do rio Teles Pires, na Amazônia Meridional, avaliando se há um efeito cumulativo de Hg em sistema de reservatórios em cascata na Amazônia. Nossa hipótese é de que haverá uma amplificação longitudinal nas concentrações de Hg na ictiofauna.

Materiais e métodos

Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida ao longo de aproximadamente 485 km no rio Teles Pires em uma área que abrange quatro usinas hidrelétricas (UHE) e no rio Juruena ao longo de aproximadamente 50 km em uma região livre de barramentos (Fig. 1). Os rios Teles Pires e Juruena são importantes afluentes da bacia hidrográfica do Tapajós, localizado no norte do Estado de Mato Grosso, Amazônia Meridional, região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia.

O rio Teles Pires tem 1370 km de extensão e, no trecho de rio avaliado, recentemente foram construídas quatro UHEs, sendo Sinop (461 MW enchimento e operação desde 2019), Colíder (342 MW enchimento 2017, em operação desde 2019), Teles Pires (1820 MW enchimento em 2014 e operação desde 2015) e São Manoel (746 MW enchimento em 2017 e operação desde 2018). As áreas de lâmina d'água dos reservatórios são de 330 km² em UHE Sinop, 172 km² em UHE Colíder, 152 km² em UHE Teles Pires e 53 km² em UHE São Manoel (Fearnside, 2014). Esta área foi uma importante região de garimpo de ouro nas décadas de 1980 e 1990, com intenso lançamento de mercúrio para atmosfera (Hacon et al., 1995). Também é uma região altamente produtora de grãos, como soja e milho, e com atividades de pecuária e extração de madeira (Mato Grosso, 2004). Durante a amostragem foram observadas balsas em atividade de garimpo nos reservatórios da UHE Teles Pires e São Manoel, sendo pelo menos 5 na UHE Teles Pires e 11 no UHE São Manoel, nesta última também foram observadas a jusante balsas inutilizadas.

O rio Juruena possui cerca de 1.080 km de extensão, com característica marcante de diversos meandros ao longo do curso e notório complexo de ilhas (ICMBio, 2011) margeado por mata ciliar todo o trecho amostrado (Oliveira 2020,

2023). O uso ocupacional do solo é marcado por grandes áreas dedicadas à pecuária, à produção de grãos e cana-de-açúcar e à indústria madeireira (ICMBio, 2011). O trecho amostrado não possui barragens hidrelétricas, porém em 2023 foram registrados 179 aproveitamentos hidrelétricos de diferentes modalidades na bacia do rio Juruena, sendo 11 UHE para o rio Juruena (1 em construção e 10 em planejamento) (Pereira, 2023).

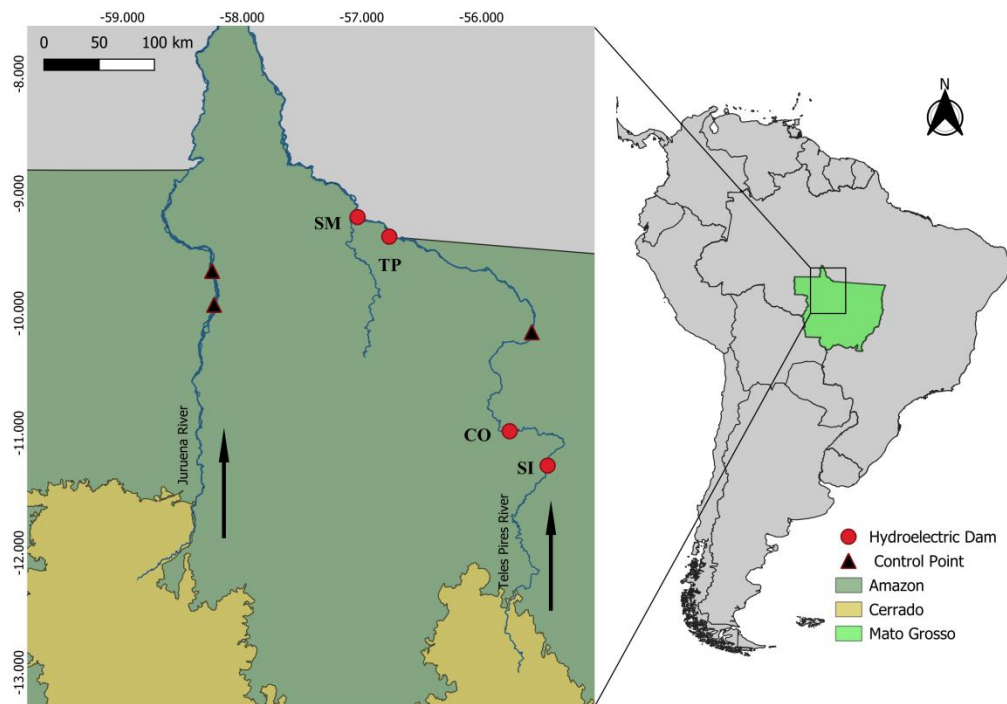


Fig. 1 Locais de amostragem na Bacia Amazônica, Brasil. SI: UHE Sinop, CO: UHE Colider, TP: UHE Teles Pires, SM: UHE São Manoel. Triângulos indicam pontos controle. Setas indicam o fluxo dos rios.

Amostragem

No rio Teles Pires, as amostras de peixes foram coletadas a montante e a jusante de cada um dos quatro barramentos hidrelétricos e em um ponto amostral livre de barramentos (Fig. 1). No rio Juruena, as amostras foram coletadas em dois pontos amostrais próximos entre si (Fig. 1) e, portanto, todas as amostras do rio Juruena são apresentadas aqui como um único pool amostral. Todas as amostras foram coletadas em duas campanhas amostrais que ocorreram em agosto/2022 e abril/2023, com a utilização de redes de espera de nylon de diferentes malhas e método ativo de pesca. Os peixes foram acondicionados em gelo para conservação,

identificados, seus dados biométricos foram mensurados e o tecido muscular dorsolateral foi removido no Laboratório de Ictiologia da Amazônia Meridional (LIAM, UNEMAT). As concentrações de mercúrio em peixes, principalmente no músculo, são integradas ao longo de períodos longos (Kasper et al. 2014). Assim, os resultados das concentrações em peixes são apresentados por local, independente do mês de coleta por serem consideradas representativas desse período de amostragem. As coletas foram realizadas sob licença SISBio 24215, registro de expedição 73787/74073 e comissão de ética no uso de animais 03/2022/CEUA – UNEMAT.

Análise de THg no tecido muscular

Cerca de 20 mg de amostra úmida de peixes predadores e 50 mg de amostra úmida de peixes não predadores (músculo dorsolateral) foram acondicionadas em barcas de níquel para leitura. Todas as amostras foram analisadas no Direct Mercury Analyzer (DMA-80, Milestone) com duas células em duplicata. A curva de calibração foi gerada utilizando solução padrão de Hg 1000 mg L⁻¹, com dez pontos referência em duas faixas de concentração de 2 a 10 ng Hg e 10 a 100 ng Hg. O método operacional de análise foi 200 °C, inicialização aquecimento de 650 °C por 2 minutos e queima à 650 °C por 1 minuto. Blind values e amostras brancas foram realizadas a cada 40 análises com valores de 0.0001 µg kg⁻¹. Limite de detecção foi determinado com base na curva de calibração. A validação do método foi feita por leitura de DORM-3, seguindo a mesmo método de análise das amostras. A concentração de THg do DORM-3 (proteína de peixe, Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá) foi determinada em 420 ± 58,8 µg kg⁻¹ (*n* = 4), de acordo com o valor certificado (382 ± 60 µg kg⁻¹). Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Ecotoxicologia do Centro de Pesquisa de Limnologia, Biodiversidade, Etnobiologia do Pantanal (CELBE – UNEMAT).

Análise de dados

Para o conjunto de dados contendo várias espécies (tanto peixes predadores quanto não predadores), utilizamos a variável dependente a concentração de Hg em µg kg⁻¹ (peso úmido). Todas as análises foram realizadas no ambiente R. Para verificar a possível existência de diferenças significativas nas concentrações de THg em relação aos pontos de amostragem, realizamos um Modelo Linear de Efeitos

Mistos (lmer, pacote lme4) usando as espécies de peixes capturadas como uma variável aleatória e as localizações de amostragem como uma variável de efeito fixo. Para verificar a significância do modelo lmer construído, utilizamos a função ANOVA (pacote car) baseada no teste F. Para realizar comparações múltiplas entre os locais de amostragem após a construção do modelo lmer, utilizamos Contrastes de Tukey (pacote multcomp), usando os valores de p ajustados pelo método de Holm. Quando as diferenças entre os pontos de amostragem foram avaliadas separadamente por espécie, pontos de amostragem com $n < 3$ foram excluídos das análises estatísticas.

Para espécies ou gêneros analisados independentemente, utilizamos $\mu\text{g kg}^{-1}$ cm⁻¹ (peso úmido). ANOVA foi usada para verificar a existência de diferenças de THg entre os pontos de amostragem, seguida pelo teste post-hoc de Tukey. Quando as diferenças entre os pontos de amostragem foram avaliadas separadamente por espécie, pontos de amostragem com $n < 3$ foram excluídos das análises estatísticas. A bioacumulação de THg foi avaliada por meio de regressões lineares, correlacionando a concentração de THg no músculo com o comprimento padrão dos espécimes. A suposição de normalidade dos resíduos foi testada em todos os tratamentos usando o teste de Kolmogorov-Smirnov/Shapiro-Wilk. Todas as análises estatísticas foram conduzidas a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

Resultados

Peixes predadores

Um total de 379 espécimes de peixes predadores distribuídos em 21 espécies (Characiformes: Cynodontidae, Ctenoluciidae, Erythrinidae e Serrasalminidae; Siluriformes: Auchenipteridae e Pimelodidae; Cichiformes: Cichlidae; Acanthuriformes: Sciaenidae) foram coletados e utilizados nas análises. A lista completa de espécies avaliadas e o número amostral de cada estão na Tabela S1 do Material Suplementar.

Comparando todo o conjunto de dados, observamos que todos os pontos de reservatórios (montante e jusante) tinham maiores concentrações do que os locais controle (Teles Pires e Juruena), exceto à montante da barragem dos dois primeiros reservatórios (Sinop e Colíder) cujas concentrações foram similares aos controles ($p < 0.0001$, Fig. 2). Avaliando cada hidroelétrica, observamos que os locais à jusante sempre apresentaram maiores concentrações que à montante, exceto em São Manoel (Fig. 2). As concentrações médias de THg a jusante foram 375%, 248% e

162% das médias a montante, em Sinop, Colíder e Teles Pires, respectivamente. Quando comparadas as concentrações a montante e a jusante dos reservatórios, independente do ponto de coleta, foram observadas diferenças significativas ($t=6.7454$, $p<0.0001$).

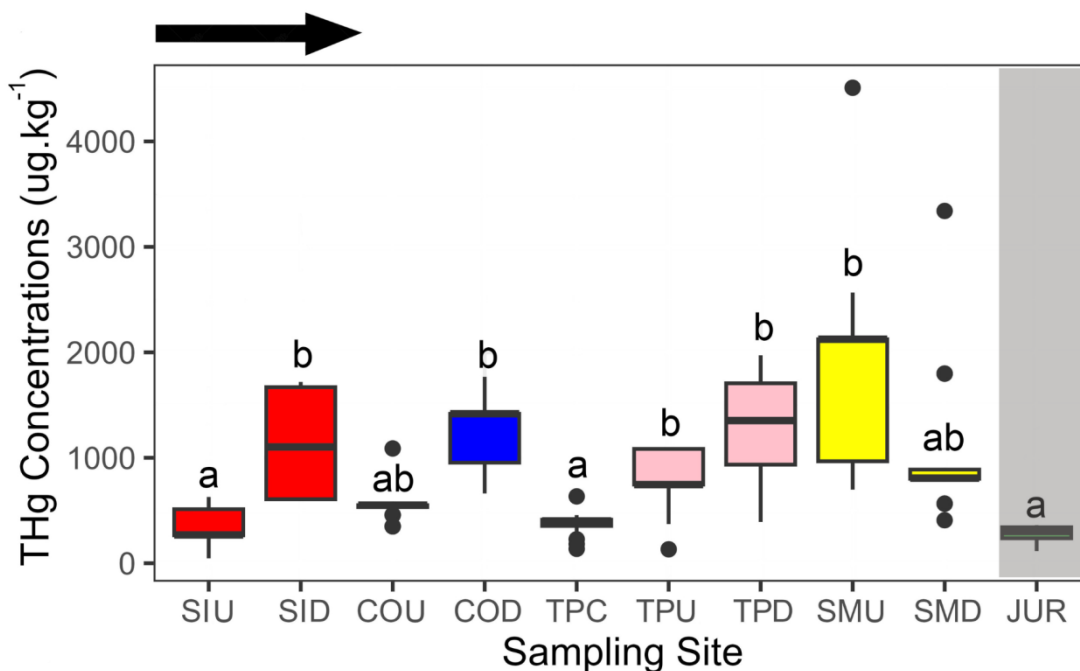


Fig. 2. Concentração de mercúrio total (THg) em músculo de peixes predadores coletados em hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires e pontos controle nos rios Teles Pires e Juruena. Letras diferentes acima dos boxplots indicam diferença significativa entre os grupos (Contrastes de Tukey). Letras no eixo X: SIU: Sinop a montante, SID: Sinop a jusante; COU: Colíder a montante; COD: Colíder a jusante; TPC: Controle do Teles Pires; TPU: Teles Pires a montante; TPD: Teles Pires a jusante; SMU: São Manoel a montante; SMD: São Manoel a jusante; JUR: Controle do Juruena. A seta indica a direção do fluxo de água do rio Teles Pires. Pontos pretos indicam outliers.

Um total de 53% e 89% das amostras coletadas a montante e jusante das barragens, respectivamente, estão acima do limite de Hg em peixes para consumo humano recomendado pela OMS ($500 \mu\text{g kg}^{-1}$ w.w.). Nos pontos controle, 7% e 9% dos espécimes de peixes tinham concentrações acima deste limite nos rios Juruena e Teles Pires, respectivamente.

Peixes Predadores: *Serrasalmus rhombeus*, *Hydrolycus armatus* e *Plagioscion squamisissimus*

A fim de comparar os locais de amostragem, reduzimos os espécimes de peixes predadores considerando três espécies, que resultou em uma diminuição do tamanho amostral (*S. rhombeus*: n=124, *H. armatus*: n=53 *P. squamosissimus*: n=60). No entanto, as três espécies acima citadas não foram capturadas ao longo de todos os pontos, sendo possível uma comparação entre todos os locais utilizando apenas uma única espécie. Sabe-se que o tamanho corporal pode influenciar na concentração de mercúrio dos peixes devido à bioacumulação. Nas três espécies, uma relação positiva significativa entre as concentrações de THg no músculo e o comprimento padrão foi observada (Fig. 3). Portanto, para estas três espécies, as diferenças espaciais foram avaliadas padronizando o tamanho dos peixes para que nem espécie e nem tamanho pudessem influenciar nas concentrações de Hg observadas nos diferentes locais.

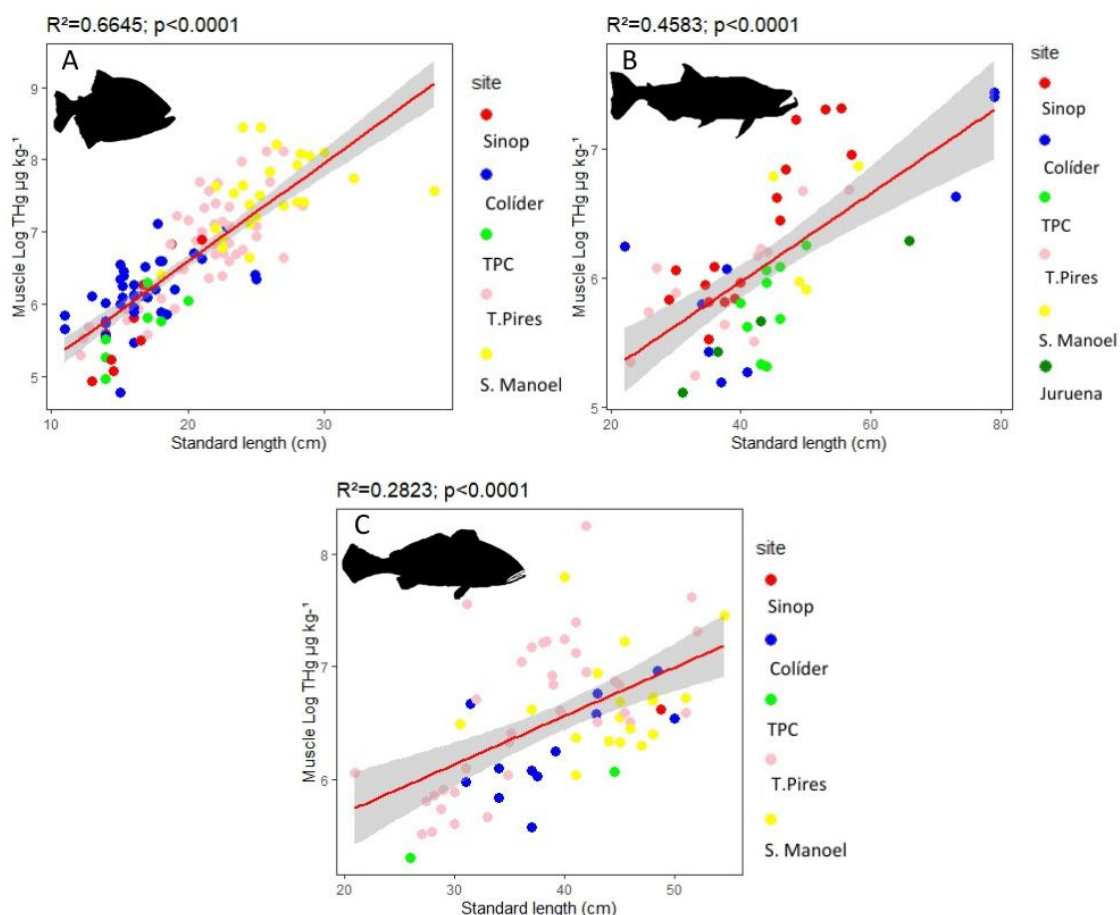


Fig. 3 Concentração de mercúrio total em músculo de *S. rhombeus* (A), *H. armatus* (B) e *P. squamosissimus* (C) de hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires e pontos controle em relação ao comprimento padrão.

Quando cada uma das três espécies foi avaliada, observamos, em geral, um padrão semelhante àquele observado quando analisamos todo o pool de biodiversidade íctica. As concentrações de THg foram mais altas nos peixes coletados à montante e à jusante das barragens do que nos controles exceto a primeira e/ou segunda hidrelétrica. Além disso, em geral, as concentrações à jusante foram maiores do que as de montante (*S. rhombeus*: Fig. 4A, *H. armatus*: Fig. 4B e *P. squamosissimus*: Fig. 4C) (Material suplementar, Tabela S2).

Ao comparar separadamente os dados de montante, observamos que, em geral, as concentrações de THg nos peixes vão aumentando ao longo do rio, assim como observado para todas as espécies juntas (*S. rhombeus*:, *P. squamosissimus*). A exceção a esse padrão foi *H. armatus*, que teve os reservatórios com maiores concentrações do que as do controle, assim como as demais espécies, no entanto, suas concentrações foram similares entre reservatórios e mais altas em Sinop, a hidrelétrica mais a montante no rio.

Os peixes coletados nos pontos controles também tiveram menores concentrações de THg quando comparados às dos reservatórios, um padrão também observado quando avaliamos todos os peixes em conjunto. Comparando entre reservatórios, os padrões observados são diferentes do padrão geral para todas as espécies. As concentrações de *S. rhombeus* aumentam e as de *H. armatus* diminuem ao longo do rio. Os dados de *P. squamosissimus* permitem observar a montante e jusante de UHE Teles Pires, sendo a concentração 2,5 vezes superior a jusante.

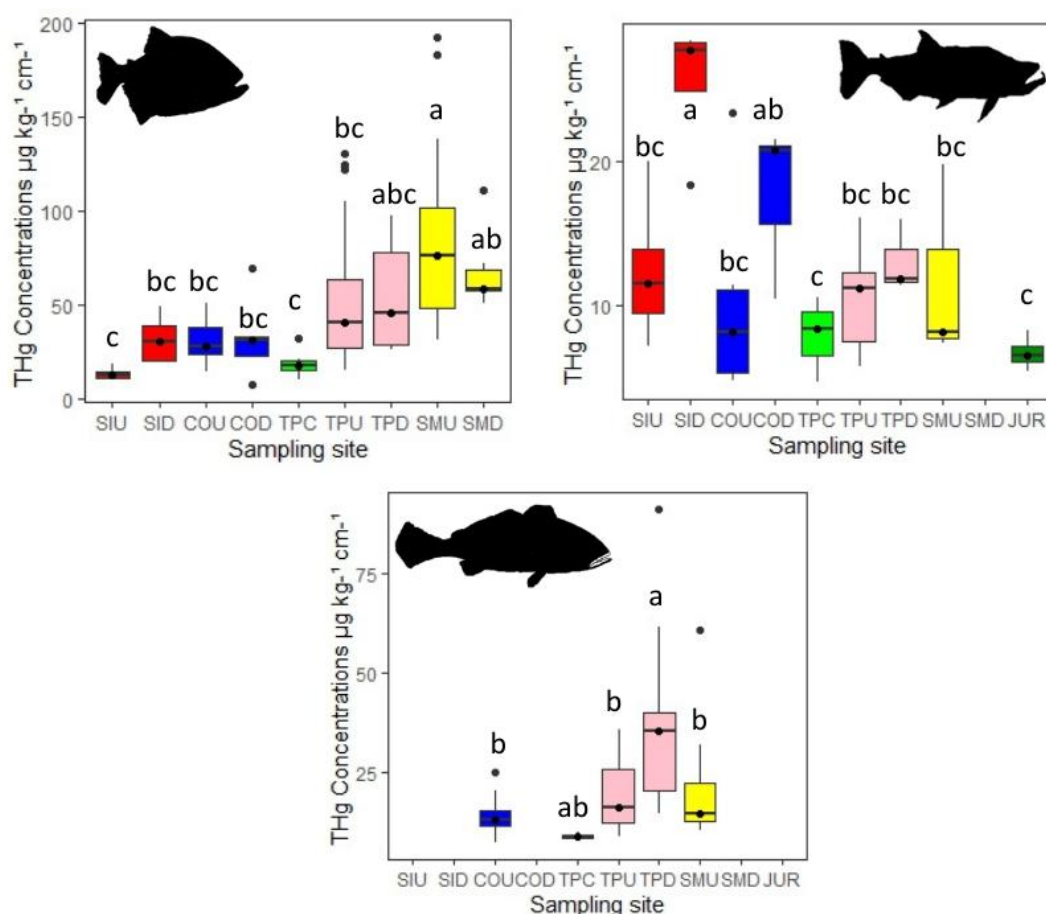


Fig. 4 Concentração de mercúrio total no tecido muscular de peixes predadores de *S. rhombeus* (A), *H. armatus* (B) e *P. squamosissimus* (C) coletados em barragens hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires, ponto de controle nos rios Juruena e Teles Pires. Letras diferentes acima dos boxplots indicam diferenças significativas entre os grupos (Tukey). Letras no eixo X: SIU: Sinop a montante, SID: Sinop a jusante; COU: Colíder a montante; COD: Colíder a jusante; TPC: Controle do Teles Pires; TPU: Teles Pires a montante; TPD: Teles Pires a jusante; SMU: São Manoel a montante; SMD: São Manoel a jusante; JUR: Controle do Juruena.

Peixes não predadores

Um total de 278 espécimes distribuídos em 23 espécies (Characiformes: Anostomidae, Characidae, Bryconidae, Chilodontidae, Hemiodontidae, Prochilodontidae e Serrasalminidae; Siluriformes: Auchenipteridae, Doradidae e Loricariidae; Perciformes: Cichlidae;) foram utilizados na composição das análises. A lista completa de espécies avaliadas e o número amostral de cada estão na Tabela S3 do Material Suplementar.

As variações espaciais nas concentrações de THg observadas nos peixes não predadores diferem dos padrões observados nos peixes predadores. Avaliando todos os espécimes de peixes não predadores, observamos que todos os pontos amostrais foram semelhantes entre si e mais altos do que o ponto controle no rio Juruena, exceto o reservatório mais à montante, Sinop ($p>0.05$, Fig. 5). Ao contrário dos predadores, não foram observadas diferenças nas concentrações entre montante e jusante, exceto São Manoel, que tiveram 64% de concentrações menores à jusante, mas estatisticamente não significativas.

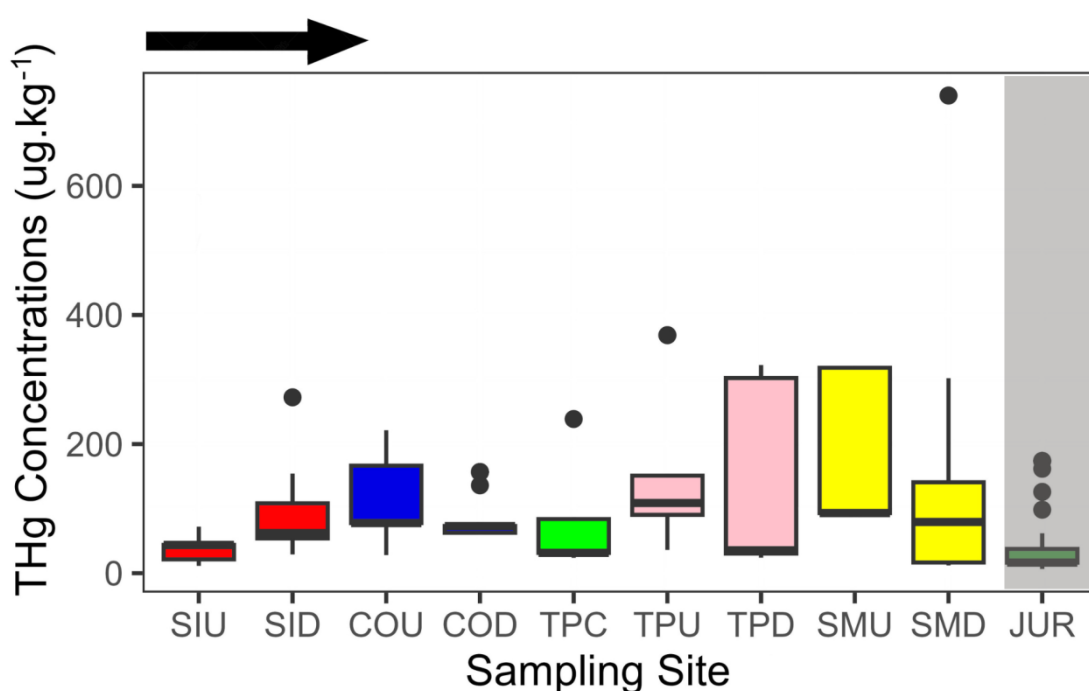


Fig. 5 Concentração de mercúrio total (THg) no músculo de peixes não predadores, ajustada pela espécie de peixe como variável aleatória, coletados em barragens hidrelétricas em cascata no Rio Teles Pires e pontos de controle nos rios Teles Pires e Juruena: todos os espécimes avaliados. Letras no eixo X: SIU: Sinop a montante, SID: Sinop a jusante; COU: Colíder a montante; COD: Colíder a jusante; TPC: Controle do Teles Pires; TPU: Teles Pires a montante; TPD: Teles Pires a jusante; SMU: São Manoel a montante; SMD: São Manoel a jusante; JUR: Controle do Juruena. A seta indica a direção do fluxo de água do rio Teles Pires.

Peixes não predadores: *Prochilodus nigricans* e *Myloplus* spp. e *Metynnis hypsauchen*

Assim como os predadores, reduzimos as espécies de peixes não piscívoras que resultou em uma diminuição do tamanho amostral (iliófago/detrítivoro: *P. nigricans*: n=60; herbívoro: dados das espécies *Myloplus arnoldi*, *Myloplus rubripinnis*, *Myloplus schomburgkii* e *Metynnis hypsauchen*: n= 90). Essas espécies herbívoras pertencentes a mesma família taxonômica (Serrasalminidae) e são morfologicamente e filogeneticamente similares (Correia et al. 2007). Como mencionado, o tamanho corporal pode influenciar na concentração de mercúrio dos peixes devido à bioacumulação. A relação entre a concentração de THg e comprimento padrão foi positiva e significativa para *P. nigricans* ($R^2=0.1755$; $p=0.0005$) (Fig 6), mas o mesmo não foi observado para *Myloplus* spp./*M. hypsauchen* ($r^2=-0.011$; $p=0.903$). Portanto, para *P. nigricans* as diferenças espaciais foram avaliadas padronizando o tamanho dos peixes para que nem espécie e nem tamanho pudessem influenciar nas concentrações de Hg observadas nos diferentes locais. De uma forma conservadora, a padronização do tamanho também foi realizada em *Myloplus* spp./*M. hypsauchen*.

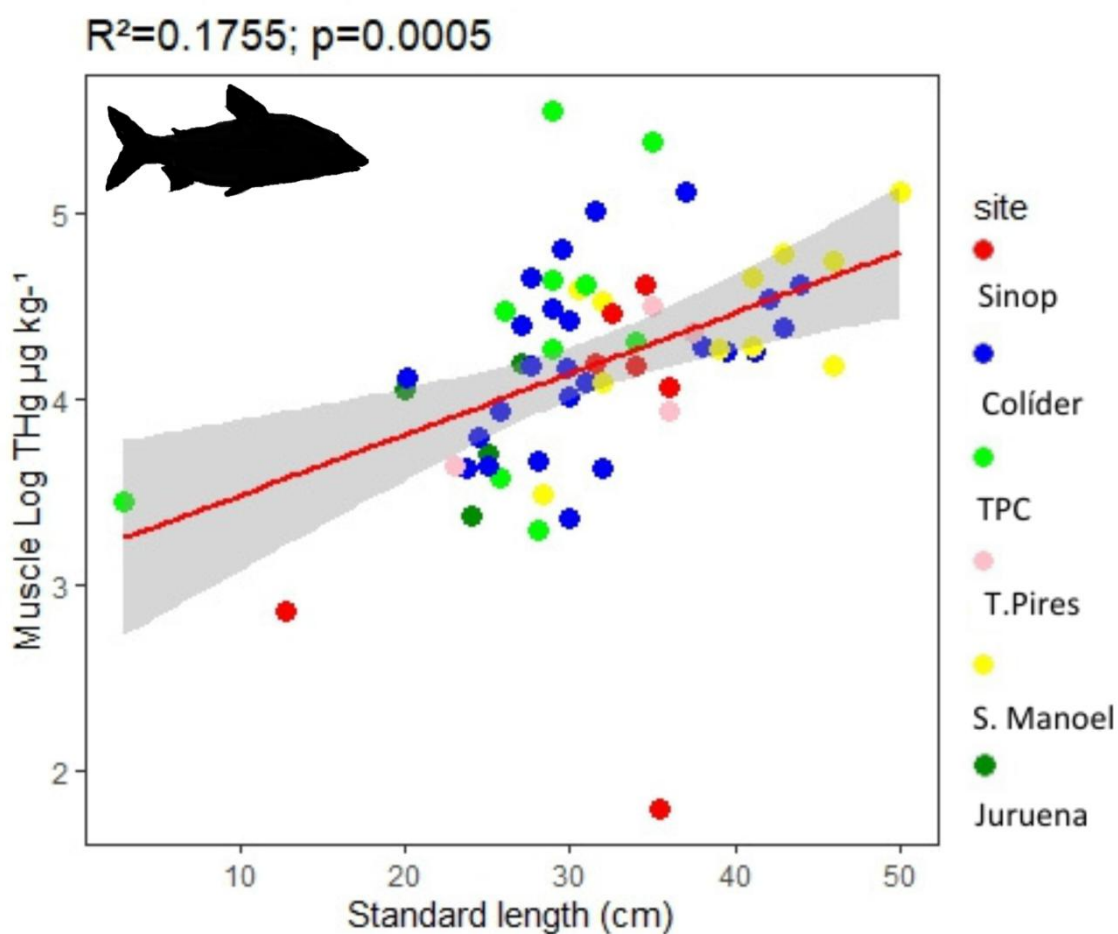


Fig. 6 Concentração de mercúrio total (THg) em músculo de *Prochilodus nigricans* de hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires e pontos controle em relação ao comprimento padrão.

Nas análises individualizadas para os peixes não predadores, ocorre um padrão de similaridade das concentrações em todos os pontos amostrados, exceto para o ponto controle do Rio Juruena que apresenta concentrações inferiores, embora não significativa (Fig 7AB). Comparamos separadamente montante e jusante, mas não houve diferenças significativas para *P. nigricans*. As espécies *Myloplus* spp. e *Metynnis hypsauchen* também não apresentaram diferenças, porém merece destaque as elevadas concentrações a jusante da UHE Colíder ($F_{5,71}=2.06$; $p=0.0806$) (Material Suplementar, Tabela S2).

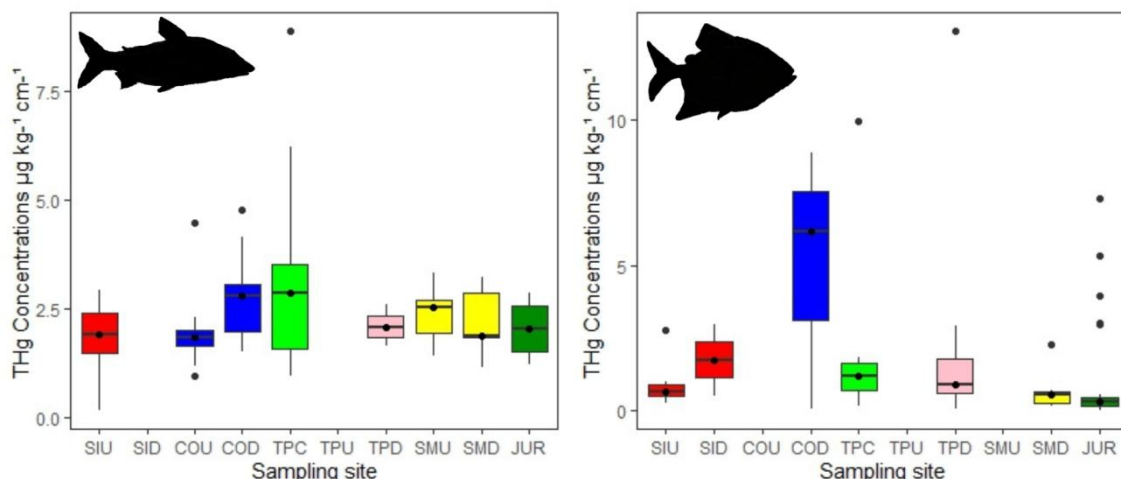


Fig. 7 Concentração de mercúrio total (THg) em músculo de *Prochilodus nigricans* (A) e *Myloplus spp./Mettynnis* (B) a montante e jusante de hidrelétricas em cascata do rio Teles Pires e nos locais nomeados controle. Letras no eixo X: SIU: Sinop a montante, SID: Sinop a jusante; COU: Colíder a montante; COD: Colíder a jusante; TPC: Controle do Teles Pires; TPU: Teles Pires a montante; TPD: Teles Pires a jusante; SMU: São Manoel a montante; SMD: São Manoel a jusante; JUR: Controle do Juruena.

Discussão

A bioacumulação de THg em peixes predadores dos reservatórios localizados ao longo do rio Teles Pires, em geral, foi maior nos organismos coletados à jusante das barragens quando comparado com os coletados montante da mesma. Esse mesmo padrão não foi observado para os peixes não-predadores, que tiveram concentrações semelhantes acima e abaixo da barragem. Tal resposta sugere que há uma dinâmica diferenciada na contaminação desta biota diferente entre os peixes predadores e não-predadores. A amplificação do THg em peixes a jusante foi observada em diversos estudos em reservatórios hidrelétricos amazônicos, como em Tucuruí (Palermo et al., 2004), Samuel (Kasper et al., 2012), Balbina (Kasper et al., 2014) e Petit-Saut (Maury-Brachet et al., 2024). Isso foi associado à descarga de camadas de água (hipolímnio e metalímnio) anóxicas (Material Suplementar, Tabela S4), que apresentam condições propícias à metilação do Hg (Canavan et al., 2000, Baldwin et al. 2022). Dessa forma, os peixes à jusante estariam mais expostos ao metilmercúrio dissolvido na água, associado ao material particulado em suspensão ou ao plâncton e, conseqüentemente, mais vulneráveis à bioacumulação deste elemento (Canavan et al., 2000, Schetagne et al., 2000, Kasper et al., 2014). Além

disso, mudanças na dieta dos peixes e na estrutura da cadeia alimentar poderiam também favorecer a bioacumulação e/ou biomagnificação em peixes localizados à jusante dessas barragens (Palermo et al., 2004). Nas hidrelétricas aqui estudadas, por exemplo, a disponibilidade de alimentos para os peixes predadores provavelmente é modificada devido à construção das barragens (observação pessoal). Foram observados diversos peixes mortos com escoriações decorrentes do choque mecânico com a estrutura das turbinas, assim como diversos pescadores na área, sugerindo grande disponibilidade de peixes em atividade de forrageamento.

Os peixes não-predadores não apresentaram esse efeito da barragem sobre as concentrações de THg. Isso sugere que, para esta guilda trófica, a bioacumulação de Hg deve ocorrer de forma semelhante nas duas áreas. Tal padrão já foi observado para peixes herbívoros dos reservatórios de Samuel (Kasper et al., 2012) e Lago Manso (Tuomola et al., 2008) porque estes animais alimentavam-se de material alóctone marginal, não sendo influenciados diretamente pelo Hg disponível através da cadeia alimentar do corpo hídrico. Por outro lado, peixes não-predadores (e.g., onívoros com tendência à herbivoria) já foram observados sofrendo o efeito barragem (Palermo et al., 2004; Kasper et al., 2012; Tuomola et al., 2008). Portanto, tal padrão observado no Teles Pires pode ter influência de diversos processos e dinâmicas associadas à bioacumulação do metal.

Em geral, os peixes predadores e não-predadores dos reservatórios (montante e a jusante das barragens) tiveram maiores concentrações de THg do que aqueles de regiões controle (nos rios Teles Pires e Juruena). A única exceção foram os peixes da região a montante da barragem da UHE de Sinop que, em geral, tiveram concentrações semelhantes ao controle. Como debatido acima, as concentrações a jusante das barragens podem ser amplificadas. Mesmo que não tenham apresentado claramento o efeito barragem, os peixes não-predadores de jusante estavam mais contaminados do que os dos pontos controle. Portanto, houve uma amplificação na contaminação destes peixes em relação ao ambiente não barrado, embora não foi suficiente para diferenciá-los estatisticamente da região à montante. Já a região lacustre dos lagos tende ao acúmulo de sedimentos que podem ser oriundos do solo devido ao processo de enchimento dos reservatórios, enriquecidos com matéria orgânica e mercúrio provenientes do solo e da vegetação não retirada da área de inundação (Bodaly et al., 2004; Stokstad, 2008; Oliveira et

al., 2021). Por exemplo, as hidrelétricas de Sinop, Colíder e Teles Pires não realizaram supressão total da vegetação antes da inundação, com apenas 30% em Sinop e a Teles Pires, com 6401 ha de área de vegetação não suprimida após o enchimento (Fearnside, 2015, 2019; Alves, 2015). Esse ambiente favorece a hipóxia (Material Suplementar, Tabela S4) que é uma condição propícia à metilação do mercúrio por bactérias (sulfato- e ferroredutoras) e arqueobactérias metanogênicas (Correia et al., 2012, Gilmour et al., 2013, Kerin et al., 2006).

A duração dessas maiores concentrações no lago da barragem ainda é algo muito debatido. Alguns trabalhos propõem que em reservatórios de climas temperados a contaminação por Hg pode perdurar por 30 (Bodaly et al., 2007) a 40 anos (Green et al., 2016), com maiores elevações nos primeiros 5 a 10 anos (Anderson, 2011; Green et al., 2016). Em reservatórios tropicais, Pestana et al. (2019b) realizaram uma meta-análise com dados de Hg em peixes predadores de reservatórios sul-americanos observando uma tendência de aumento linear nas concentrações mesmo após 27 anos de enchimento. Por outro lado, Forsberg et al. (2017), mostraram que em Balbina, um reservatório amazônico brasileiro, as maiores concentrações de Hg nos peixes predadores ocorreram após 11 anos de enchimento, com posterior declínio. Os reservatórios aqui estudados têm <10 anos de enchimento e, portanto, ainda são considerados muito jovens. Portanto, possivelmente ainda estão em fase de crescimento das concentrações e/ou atingindo seu ponto mais alto de contaminação.

Três espécies de peixe predadores aqui avaliadas foram estudadas na bacia do rio Teles Pires antes da construção da UHEs de Colíder e de Sinop. Matos et al. (2021) observaram concentrações de THg em *S. rhombeus* e *H. armatus* de trechos do rio onde seria construído Colíder e encontraram concentrações médias de 304 (87–614 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso úmido, mín-máx) e 229 (64–529 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso úmido), respectivamente. Em nosso estudo, as concentrações de THg para ambas as espécies nos reservatórios foram, respectivamente, 515 (239-1174 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso úmido) e 314 (180-517.2 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso úmido). A jusante desse reservatório, as concentrações foram 562 (119-1239 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso úmido) em *S. rhombeus* e 1363 (760-1693 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso úmido) em *H. armatus*. Na região foi construída a UHE Sinop, Matos et al. (2018) observaram concentrações de THg em *Brycon falcatus* de $52 \pm 37 \mu\text{g kg}^{-1}$ peso úmido e, no presente estudo, esta espécie foi coletada somente à jusante desta UHE e sua concentração foi $272 \mu\text{g kg}^{-1}$ peso úmido. Há poucas

informações desta bacia hidrográfica anteriores aos barramentos. No entanto, pode-se observar que estas três espécies estudadas aqui possuem concentrações até seis vezes maiores que aquelas observadas antes do barramento.

As concentrações de THg aumentaram nos peixes predadores do lago do reservatório da UHE mais à montante no rio (UHE Sinop) até a mais à jusante no rio (UHE São Manoel). Nos peixes não-predadores do lago do reservatório, as concentrações foram semelhantes, aumentando apenas da primeira (Sinop) em relação às outras três. Na região à jusante da barragem, em predadores e não-predadores, as concentrações foram semelhantes entre as quatro hidrelétricas. Schetagne and Verdon (1999) sugerem que a distância na qual as concentrações de mercúrio nos peixes são influenciadas pela barragem depende da presença de outros corpos lânticos (e.g. reservatórios e lagos) que permitem a sedimentação de partículas ricas em mercúrio e da diluição por tributários ao longo do canal principal do rio. Além de influenciar a deposição de material, o tempo de residência da água abaixo da barragem também pode influenciar a produtividade primária do sistema aquático que contribui para a biodiluição do Hg na cadeia trófica (por exemplo, estudado por Brito et al., 2017, em um lago amazônico). Fatores que podem contribuir para as concentrações é o tempo de residência da água e a idade do reservatório (Pestana et al. 2019). À montante das barragens, a deposição de material pode ter ocorrido nos reservatórios uma vez que são sistemas lânticos, então poderia favorecer o acúmulo de partículas. Nos trechos à jusante das barragens, isso é improvável uma vez que a dinâmica não tem lagos ou outros habitats lânticos, mas sim rápidos e cascatas que favorecem a ressuspensão de partículas. Ao contrário dessa expectativa, no reservatório Smallwood, foi observado o efeito da barragem nas concentrações de Hg nos peixes até 300 km à jusante mesmo depois do rio passar por dois grandes lagos (Anderson, 2011). No trecho estudado do rio Teles Pires, há somente um tributário com vazão mais significativa abaixo do ponto controle (rio Cristalino) e dois tributários a jusante do último ponto de coleta (Rio Apiacás e São Benedito). Portanto, a diluição poderia auxiliar a diminuir as concentrações a partir deste ponto, no entanto isso não foi observado nos nossos resultados.

No rio Snake, que possui 22 barragens ao longo de 863 km, foi observado um incremento nas concentrações de Hg nos peixes dos reservatórios e a jusante destes nos períodos em que há consistente estratificação do lago do reservatório e

quando esta fica inconsistente também (Willacker et al., 2023). A amplificação foi acentuada ao longo do complexo de reservatórios, principalmente nos peixes maiores e em idade reprodutiva (Willacker et al., 2023). Nesse estudo e em outros realizados em barragens em diferentes regiões do mundo, foi observado que a produção do MeHg e o incremento de Hg na cadeia alimentar estão associados a condições com baixo oxigênio na água (e.g., Kasper et al., 2014; Willacker et al. 2023).

Áreas de inundações fluviais na Amazônia também podem ser importantes locais de metilação que contribuem com um significativo aporte de metilmercúrio para o canal principal do rio (Kasper et al., 2017). Durante a inundação, há grande input de matéria orgânica alóctone e autóctone para as áreas de inundação, o que resulta em condições anóxicas que são especialmente propícias à metilação (Roulet et al., 2000). Esse metilmercúrio disponibilizado devido ao pulso de inundação na Amazônia pode influenciar nas concentrações de mercúrio dos peixes pertencentes a diferentes guildas tróficas (Belger and Forberg 2006; Paiva et al., 2022). No trecho avaliado do rio Teles Pires, há áreas de inundação durante o período de águas altas na região entre jusante da UHE de Colíder e à montante da UHE de Teles Pires (no trecho que o rio flui sem barramentos). Essas áreas podem ter contribuído para o incremento de metilmercúrio das regiões à jusante, a partir do ponto controle no rio Teles Pires e nos pontos abaixo deste (hidrelétricas de Teles Pires e São Manoel).

No presente estudo, não observamos o mesmo efeito cumulativo quando comparados somente jusante. Esse fato pode estar associado à disponibilidade de alimentos, oportunismo alimentar e necessidade de aporte energético devido ao maior gasto para movimentação em ambiente lótico (Dominique et al. 2007). No reservatório de Smallwood, a extensão das altas concentrações de mercúrio nos peixes à jusante da barragem foram associadas ao uso do habitat e preferência de presas dos peixes (Anderson, 2011).

A amplificação das concentrações de Hg ao longo dos represamentos hidrelétricos em nosso estudo observada para *S. rhombeus* sugere a espécie como organismo sentinela para avaliação do efeito sinérgico da acumulação de Hg nos reservatórios em cascata. A espécie é amplamente registrada nos rios amazônicos e utilizada em diversos estudos de contaminação por mercúrio (e.g., Dorea et al., 2004; Bastos et al., 2008; Kasper et al., 2012; Matos et al., 2021).

As concentrações de mercúrio em peixes nos reservatórios hidrelétricas em cascata observadas neste estudo revelam a complexidade dos efeitos dos barramentos na acumulação de THg nas populações, comunidades e seus diferentes níveis tróficos da ictiofauna. Muitos fatores físicos, químicos, biológicos e até geomorfológicos da bacia devem ser considerados quando avaliamos a extensão do impacto das barragens. A construção de barragens hidrelétricas de grande porte no Brasil, segue uma série de normas ligadas ao Ministério de Meio Ambiente (Brasil, 2016), prevê o estudo dos impactos ambientais e o relatório de impactos ambientais na área de influência/abrangência do reservatório, porém não prevê o efeito sinérgico dos reservatórios em cascata. Embora o efeito do mercúrio na biota seja multifatorial, há consenso que a interrupção do fluxo natural das águas e a criação de ambientes estratificados anóxicos e/ou hipóxicas, potencializam a amplificação do mercúrio na biota.

Em nosso estudo não analisamos diretamente o impacto do garimpo de ouro na contaminação de mercúrio, mas ressaltamos a presença de diversas balsas de garimpo nos reservatórios das UHEs São Manoel e Teles Pires. No Estudo de Impacto Ambiental da UHE São Manoel foram relatadas 5 balsas de garimpo (sendo 3 desativadas) no ano de 2007, ressaltando-se naquele momento o baixo interesse da população para desenvolver essa atividade e a preocupação com a contaminação por mercúrio, porém com baixa probabilidade devido a atividade de garimpagem nas áreas de influência direta e área diretamente afetada pelo empreendimento estarem quase integralmente paralisadas (UHE São Manoel, 2024ab). Scherf and Viana (2023) ressaltam que comerciantes de ouro e garimpeiros ilegais foram encorajados entre o período de 2018-2022 pelo governo brasileiro à prática dessa atividade danosa ao ambiente na Amazônia brasileira, além disso, segundo Bedinelli (2023), houve um enfraquecimento de ações de combate a essa atividade ilegal no mesmo período.

Conclusão

Os reservatórios em cascata analisados neste estudo afetaram diretamente as concentrações de mercúrio em peixes predadores nos reservatórios. Peixes predadores apresentaram concentrações de Hg mais altas a jusante da barragem dos reservatórios. O efeito cumulativo das concentrações de Hg é evidentes em peixes predadores em áreas a montante, mas não a jusante. A espécie *Serrasalmus*

rhombeus mostrou-se um bom indicador para avaliações de Hg nos reservatórios da Amazônia. Espécies não predadoras não foram diretamente afetadas pelo complexo; no entanto, alertamos cautela, pois no reservatório da Usina Hidrelétrica Teles Pires, encontramos alguns espécimes com concentrações semelhantes às de peixes predadores. Sugerimos que o efeito cumulativo do Hg na biota seja considerado um fator em estudos ambientais e legislação quando forem submetidos pedidos de instalação e operação de reservatórios em corpos d'água amazônicos.

REFERÊNCIAS

- Alves, A. 2015. Hidrelétrica Teles Pires começa encher reservatório sem terminar a supressão vegetal; veja fotos. Olhar Direto, 18 de janeiro de 2015. Available online at: <http://www.olhardireto.com.br/noticias/imprime.asp?id=387933> (accessed january, 2024)
- Anderson, M. R. (2011). Duration and extent of elevated mercury levels in downstream fish following reservoir creation. *River Systems*, 167-176.
- Baldwin, A. K.; Eagles-Smith, C. A.; Willacker, J. J.; Poulin, B. A.; Krabbenhoft, D. P.; Naymik, J.; Tate, M. T.; Bates, D.; Gastelecutto, N.; Hoovestol, C.; Larsen, C.; Yoder, A. M.; Chandler, J.; Myers, R. (2022) In-Reservoir physical processes modulate aqueous and biological methylmercury export from a seasonally anoxic reservoir. *Environ. Sci. Technol.*, 56 (19), 13751– 13760, DOI: 10.1021/acs.est.2c03958
- Bastos, W. R., Gomes, J. P. O., Oliveira, R. C., Almeida, R., Nascimento, E. L., Bernardi, J. V. E., ... & Pfeiffer, W. C. (2006). Mercury in the environment and riverside population in the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. *Science of the total environment*, 368(1), 344-351.
- Bastos, W. R., de Almeida, R., Dórea, J. G., & Barbosa, A. C. (2007). Annual flooding and fish-mercury bioaccumulation in the environmentally impacted Rio Madeira (Amazon). *Ecotoxicology*, 16, 341-346.
- Bastos, W. R., Rebelo, M. D. F., Fonseca, M. D. F., Almeida, R. D., & Malm, O. (2008). A description of mercury in fishes from the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. *Acta Amazonica*, 38, 431-438.
- Bedinelli TA. How illegal mining caused a humanitarian crisis in the Amazon. Yale Environment 360 (2023). Available online at: <https://e360.yale.edu/features/brazil-yanomami-mining-malaria-malnutrition-lula> (accessed january, 2024).
- Belger, L.; Forsberg, B. R. Factors controlling Hg levels in two predatory fish species in the negro river basin, Brazilian Amazon. *Sci. Total Environ.* 2006, 367, 451–459.
- Bodaly, R. A., Beaty, K. G., Hendzel, L. H., Majewski, A. R., Paterson, M. J., Rolfhus, K. R., ... & Venkiteswaran, J. J. (2004). Peer reviewed: Experimenting with hydroelectric reservoirs. *Environmental Science and Technology* 38: 346A–352A.

Bodaly, R. A., Jansen, W. A., Majewski, A. R., Fudge, R. J. P., Strange, N. E., Derksen, A. J., & Green, D. J. (2007). Postimpoundment time course of increased mercury concentrations in fish in hydroelectric reservoirs of northern Manitoba, Canada. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 53, 379-389.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente Procedimentos de Licenciamento Ambiental do Brasil / Maria Mônica Guedes de Moraes e Camila Costa de Amorim, autoras; Marco Aurélio Belmont e Pablo Ramosandrade Villanueva, Organizadores. – Brasília: MMA, 2016. p. 544

Correia, R. R., Miranda, M. R., & Guimarães, J. R. (2012). Mercury methylation and the microbial consortium in periphyton of tropical macrophytes: effect of different inhibitors. *Environmental research*, 112, 86-91.

Canavan, C. M., Caldwell, C. A., & Bloom, N. S. (2000). Discharge of methylmercury-enriched hypolimnetic water from a stratified reservoir. *Science of the Total Environment*, 260(1-3), 159-170.

Cebalho, E. C., Díez, S., Santos Filho, M., Muniz, C. C., Lázaro, W., Malm, O., & Ignácio, A. R. (2017). Effects of small hydropower plants on mercury concentrations in fish. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 22709-22716.

Dominique, Y., Maury-Brachet, R., Muresan, B., Vigouroux, R., Richard, S., Cossa, D., ... & Boudou, A. (2007). Biofilm and mercury availability as key factors for mercury accumulation in fish (*Curimata cyprinoides*) from a disturbed Amazonian freshwater system. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 26(1), 45-52.

Dorea, J. G., Barbosa, A. C., Souza, J., Fadini, P., & Jardim, W. F. (2004). Piranhas (*Serrasalmus* spp.) as markers of mercury bioaccumulation in Amazonian ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 59(1), 57-63.

Ferarside, P. M. (2014). Análisis de los principales proyectos hidro-energéticos en la región amazónica. *Derecho, Ambiente y Recursos Naturales*, 55.

Fearnside, P. M. (2015) Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras, v.1. Manaus: Editora do INPA.

Fearnside, P. M. (2019). Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras, v. 3. Manaus: Editora INPA.

Forsberg, B. R., Melack, J. M., Dunne, T., Barthem, R. B., Goulding, M., Paiva, R. C., ... & Weisser, S. (2017). The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PloS one*, 12(8), e0182254.

Gilmour, C. C., Podar, M., Bullock, A. L., Graham, A. M., Brown, S. D., Somenahally, A. C., ... & Elias, D. A. (2013). Mercury methylation by novel microorganisms from new environments. *Environmental science & technology*, 47(20), 11810-11820.

Green, D. J., Duffy, M., Janz, D. M., McCullum, K., Carrière, G., & Jardine, T. D. (2016). Historical and contemporary patterns of mercury in a hydroelectric reservoir and downstream fishery: Concentration decline in water and fishes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 71, 157-170.

Hacon, S., Artaxo, P., Gerab, F., Yamasoe, M. A., Campos, R. C., Conti, L. F., & De Lacerda, L. D. (1995). Atmospheric mercury and trace elements in the region of Alta Floresta in the Amazon basin. *Water, Air, and Soil Pollution*, 80, 273-283.

ICMBio (2011) Plano de manejo do Parque Nacional do Juruena. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Brasília.

Kasper, D., Palermo, E. F. A., Branco, C. W. C., & Malm, O. (2012). Evidence of elevated mercury levels in carnivorous and omnivorous fishes downstream from an Amazon reservoir. *Hydrobiologia*, 694, 87-98.

Kasper, D., Forsberg, B. R., Amaral, J. H., Leitão, R. P., Py-Daniel, S. S., Bastos, W. R., & Malm, O. (2014). Reservoir stratification affects methylmercury levels in river water, plankton, and fish downstream from Balbina hydroelectric dam, Amazonas, Brazil. *Environmental Science & Technology*, 48(2), 1032-1040.

Kasper, D., Forsberg, B. R., Amaral, J. H., Py-Daniel, S. S., Bastos, W. R., & Malm, O. (2017). Methylmercury modulation in Amazon rivers linked to basin characteristics and seasonal flood-pulse. *Environmental science & technology*, 51(24), 14182-14191.

Kerin, E. J., Gilmour, C. C., Roden, E., Suzuki, M. T., Coates, J. D., & Mason, R. (2006). Mercury methylation by dissimilatory iron-reducing bacteria. *Applied and environmental microbiology*, 72(12), 7919-7921.

Lacerda, L. D. D., & Malm, O. (2008). Mercury contamination in aquatic ecosystems: an analysis of the critical areas. *Estudos avançados*, 22, 173-190.

Lechler, P. J., Miller, J. R., Lacerda, L. D. D., Vinson, D., Bonzongo, J. C., Lyons, W. B., & Warwick, J. J. (2000). Elevated mercury concentrations in soils, sediments, water, and fish of the Madeira River basin, Brazilian Amazon: a function of natural enrichments?. *Science of the Total Environment*, 260(1-3), 87-96.

MATO GROSSO. Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral – SEPLAN, 2004. *Zoneamento socioeconômico-ecológico do Estado de Mato Grosso: relatório técnico e projeto de lei*. Cuiabá: SEPLAN/BIR D/PRODEAGRO.

Matos, L. S. D., Silva, J. O. S., Kasper, D., & Carvalho, L. N. (2018). Assessment of mercury contamination in *Brycon falcatus* (Characiformes: Bryconidae) and human health risk by consumption of this fish from the Teles Pires River, Southern Amazonia. *Neotropical Ichthyology*, 16.

Matos, L. S., Correa, A. S. A. S., Silva, S. A. A., Muniz, C. C., & Ignacio, A. R. A. (2021). Mercury concentrations in fish and human health assessment in pre-flood phase of a hydro dam in Teles Pires River, Southern Brazilian Amazon. *Elem Sci Anth*, 9(1), 020.

Maury-Brachet, R., Dassié, É. P., Legeay, A., Gonzalez, P., Feurtet-Mazel, A., Gourand, F., ... & Vigouroux, R. (2024). Influence of a hydroelectric dam on fish mercury contamination along the Sinnamary River (French Guiana). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115771.

Muresan, B., Cossa, D., Coquery, M., & Richard, S. (2008). Mercury sources and transformations in a man-perturbed tidal estuary: The Sinnamary Estuary, French Guiana. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(22), 5416-5430.

Oliveira, E., Ignácio, A. R. A., Lázaro, W. L., Muniz, C. C., Campos, D. V. S., Costa, J. V. M., ... & Santos-Filho, M. (2020). Feeding aspects of *Knodus heteresthes* (Eigenmann, 1908) and *Moenkhausia lepidura* (Kner, 1858)(Characiformes, Characidae) in the Teles Pires and Juruena Rivers, southern Amazon. *Brazilian Journal of Biology*, 81, 343-350.

Oliveira, C. A. S., Kasper, D., Sargentini Junior, E., Bolson, M. A., Torrezani, L., & Zara, L. F. (2021). Influence of environmental conditions on the mercury levels of the sediment along the Balbina Reservoir, Brazilian Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1), 50.

Oliveira, E., Ignácio, A. R. A., Lázaro, W. L., Díez, S., Guimarães, J. R. D., & Santos-Filho, M. (2023). Green kingfishers as sentinel species for mercury contamination in Amazon. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1-12.

Paiva, T. C., Dary, E. P., Pestana, I. A., Amadio, S. A., Malm, O., & Kasper, D. (2022). Flood-pulse and trophic position modulate mercury concentrations in fishes from an Amazon floodplain lake. *Environmental Research*, 215, 114307.

Palermo, E.F.A., Kasper, D., Reis, T.S., Nogueira, S., Branco, C.W.C., Malm, O., 2004. Mercury level increase in fish tissues downstream the Tucuruí reservoir, Brazil. *RMZ. Mat. Geoenviron.* 51, 1292–1294.

Pereira, C.F. R. Monitoramento das Hidreletricas na Bacia do Juruena. Programa de Direitos Indigenas, Política Indiginista e Informação a Sociedade. *Operação Amazônia Nativa*, 2023.

Pestana, I. A., Bastos, W. R., Almeida, M. G., Mussy, M. H., & Souza, C. M. (2019a). Methylmercury in environmental compartments of a hydroelectric reservoir in the Western Amazon, Brazil. *Chemosphere*, 215, 758-765.

Pestana, I. A., Azevedo, L. S., Bastos, W. R., & de Souza, C. M. M. (2019b). The impact of hydroelectric dams on mercury dynamics in South America: A review. *Chemosphere*, 219, 546-556.

Poulin J, & Gibb H. Mercury: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. Environmental Burden of Disease Series, No. 16. In: Prüss-Üstün, Annette (Ed.). WHO, Public Health and the Environment Geneva 2008

Roulet, M., Lucotte, M., Guimarães, J. R. D., & Rheault, I. (2000). Methylmercury in water, seston, and epiphyton of an Amazonian river and its floodplain, Tapajós River, Brazil. *Science of the Total Environment*, 261(1-3), 43-59.

Schetagne, R., & Verdon, R. (1999). Post-impoundment evolution of fish mercury levels at the La Grande Complex, Québec, Canada (from 1978 to 1996). In *Mercury in the biogeochemical cycle: natural environments and hydroelectric reservoirs of northern Québec (Canada)* (pp. 235-258). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schetagne, R., Doyon, J. F., & Fournier, J. J. (2000). Export of mercury downstream from reservoirs. *Science of the Total Environment*, 260(1-3), 135-145.

Scherf, E. L., & Silva, M. V. V. (2023). Brazil's Yanomami health disaster: addressing the public health emergency requires advancing criminal accountability. *Frontiers in Public Health*, 11, 1166167.

Stokstad, E. (2008). Contaminating a Lake to Save Others. *Science*, 322(5906), 1319-1319.

Tefera, W. M., & Kasiviswanathan, K. S. (2022). A global-scale hydropower potential assessment and feasibility evaluations. *Water Resources and Economics*, 38, 100198.

Tuomola, L., T. Niklasson, E. C. Silva & L. D. Hylander, 2008. Fish mercury development in relation to abiotic characteristics and carbon sources in a six-year old, Brazilian reservoir. *Science of the Total Environment* 390: 177–187.

UHE São Manoel. Estudo de Impacto Ambiental – EIA. Usina Hidrelétrica São Manoel. Vol 2. (2024a). . Available online at: https://www.saomanoelenergia.com.br/sites/edpbsaomanoel/files/documentos_oficiais_-_eia_uhe_sao_manoel_-_volume_2.pdf. accessed january, 2024

UHE São Manoel. Estudo de Impacto Ambiental – EIA. Usina Hidrelétrica São Manoel. Vol 4. (2024b.) Available online at: https://www.saomanoelenergia.com.br/sites/edpbsaomanoel/files/2019-11/documentos_oficiais_-_eia_uhe_sao_manoel_-_volume_4.pdf. accessed january, 2024

UNEP (2013) Minamata Convention Agreed by Nations: Global mercury agreement to left health threats from lives.

Willacker, J. J., Eagles-Smith, C. A., Chandler, J. A., Naymik, J., Myers, R., & Krabbenhoft, D. P. (2023). Reservoir Stratification Modulates the Influence of Impoundments on Fish Mercury Concentrations along an Arid Land River System. *Environmental Science & Technology*.

World Health Organization (WHO). Mercury and Health. (2024). Available online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health> (accessed on 22 November 2024).

MATERIAL SUPLEMENTAR**ARTIGO 01**

Reservatórios em cascata afetam as concentrações de mercúrio em peixes do rio Teles Pires, Amazônia brasileira

Cascade reservoirs affect mercury concentrations in fish from Teles Pires river, Brazilian Amazon

Edvagner Oliveira; Daniele Kasper; Solange Arrolho da Silva, Wilkinson Lopes Lázaro, Claumir Cesar Muniz; Giovani Spinola Carvalho; Fernando Vieira Borges; Adriano Luiz Pimenta; Thaysa Costa Hurtado; Áurea Regina Alves Ignácio

6 páginas, 3 tabelas

Oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH e temperatura da água foram medidos na água subsuperficial de todos os pontos amostrais com utilização de uma sonda limnológica Asko (Tabela S1).

Tabela Suplementar S1 Parâmetros limnológicos dos pontos amostrados em reservatórios hidrelétricas em cascata e ponto controle no Rio Teles Pires e Rio Juruena. U: upstream; D: downstream; C: control; Temp: temperatura da água; OD: oxigênio dissolvido na água; Cond.: Condutividade elétrica. (min-max)

	Local	pH	Temp (°C)	OD (mg/L)	Cond. (mS/cm ²)
Sinop	U	5.2-6.5	27.8-29.4	1.2-1.8	9.3-10.0
	D	4.9-6.7	25.6-27.0	0.6-1.5	10.7-13.9
Colíder	U	5.3-7.6	29.3-31.1	1.8-0.3	10.7-12.6
	D	5.3-6.4	26.7-28.3	0.5-0.5	11.1-13.0
Teles Pires	C	5.0-6.49	27.4-27.7	0.4-0.7	11.4-15.0
Teles Pires	U	6.3-6.4	27.4-30.1	0.3-2.1	14.3-14.5
	D	5.8-6.4	27.7-28.7	0.8-2.5	14.4-15.3
São Manoel	U	5.5-6.5	27.5-29.9	0.7-2.2	14.5-15.0
Juruena	D	5.4-6.2	27.8-28.8	0.4-1.9	14.3-15.7
	C	5.7-6	29.6-30.7	5.3-6.7	8.8-12.0

Tabela Suplementar S2 Peixes predadores (piscívoros e/ou carnívoros) coletados em reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires (UHE Sinop, UHE Colíder, UHE Teles Pires e UHE São Manoel) e pontos controle (rios Teles Pires e Jurueña) U = montante; D = jusante; C = ponto controle.

[illegible]

<i>Hemisorubim platyrhynchos</i> (Valenciennes 1840)	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-
<i>Megalonema</i> sp	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Pinirampus pirinampu</i> (Spix & Agassiz 1829)	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-
<i>Pseudoplatystoma punctifer</i> (Castelnau 1855)	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-
<i>Sorubim trigonocephalus</i> Miranda Ribeiro 1920	-	6	7	2	-	-	-	-	-	1
<i>Zungaro zungaro</i> (Humboldt 1821)	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Cichliformes										
Cichlidae										
<i>Cichla miriana</i> e Kullander & Ferreira 2006	5	-	1	-	1	-	-	-	-	-
<i>Cichla</i> cf. <i>pinima</i> Kullander & Ferreira 2006	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Acanthuriformes										
Sciaenidae										
<i>Pachyurus junki</i> Soares & Casatti 2000	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
<i>Petilipinnis grunniens</i> (Jardine & Schomburgk 1843)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
<i>Plagioscion squamosissimus</i> (Heckel 1840)	-	1	11	1	2	27	9	11	7	-
Total Geral	33	20	56	32	34	77	39	43	30	15

Tabela Suplementar S3 Peixes não predadores coletados em reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires (UHE Sinop, UHE Colíder, UHE Teles Pires e UHE São Manoel) e pontos controle (rios Teles Pires e Juruena) U = montante; D = jusante; C = ponto controle.

Espécie	Local de amostragem (n)									
	Sinop		Colíder		Teles Pires	Teles Pires		São Manoel		Juruena
	U	D	U	D	C	U	D	U	D	C
Characiformes										
Anostomidae										
<i>Leporinus cf. fasciatus</i> (Bloch 1794)	-	1	1	-	-	4	7	-	-	1
<i>Leporinus friderici</i> (Bloch 1794)	-	-	1	11	-	2	1	-	-	1
<i>Schizodon vittatus</i> (Valenciennes 1850)	2	-	-	-	-	-	3	-	1	-
Characidae										
<i>Bryconexodon trombetasi</i> Jégu, Santos & Ferreira 1991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Bryconidae										
<i>Brycon falcatus</i> Müller & Troschel 1844	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Brycon</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Hemiodontidae										
<i>Argonectes robertsi</i> Langeani 1999	-	-	4	-	1	-	-	-	-	-
<i>Hemiodus cf. microlepis</i> Kner 1858	1	-	-	7	-	1	-	-	-	4
Chilodontidae										
<i>Caenotropus schizodon</i> Scharcansky & Lucena 2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
Prochilodontidae										
<i>Prochilodus nigricans</i> Spix & Agassiz 1829	7	-	12	13	10	1	3	6	5	4
Serrasalminidae										

<i>Metynnis hypsauchen</i> (Müller & Troschel 1844)	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Myleus schomburgkii</i> (Jardine 1841)	-	1	-	2	5	-	1	-	2	1
<i>Myleus setiger</i> (Müller & Troschel 1844)	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
<i>Myleus</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
<i>Myloplus arnoldi</i> (Ahl 1936)	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
<i>Mylopluss rubripinnis</i> (Müller & Troschel 1844)	-	1	2	1	11	1	24	-	5	23
Triportheidae										
<i>Triportheus</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
Cichliformes										
Cichlidae										
<i>Aequidens</i> cf. <i>epae</i> Kullander 1995	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
<i>Crenicichla strigata</i> Günther 1862	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
<i>Satanoperca jurupari</i> (Heckel 1840)	20	-	3	-	-	2	-	-	-	-
Siluriformes										
Auchenipteridae										
<i>Tocantinsia piresi</i> (Miranda Ribeiro 1920)	-	-	-	-	-	-	9	3	2	-
Doradidae										
<i>Pterodoras granulosus</i> (Valenciennes 1821)	1	3	1	-	-	-	1	1	-	-
Loricariidae										
Hypostominae										
<i>Squaliforma emarginata</i> (Valenciennes 1840)	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Total Geral	40	7	24	34	27	11	51	10	18	56

ARTIGO 2**Dinâmica do mercúrio em sedimentos e solos de reservatórios hidrelétricos
em cascata ao longo de um rio amazônico****Mercury Dynamics in Sediments and Soils of Cascade Hydroelectric
Reservoirs along an Amazonian River**

Edvagner Oliveira^a; Daniele Kasper^b; Solange Aparecida Arrolho da Silva^c, Wilkinson Lopes Lázaro^d, Manoel Diego Santos Hurtado^e; Eduarda da Silva Vieira^e, Gabriela Vitória Leite da Silva^e; Thais Emmanuely Oliveira Crispin^f; Áurea Regina Alves Ignácio^a

^a Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Pesquisa em Limnologia, Biodiversidade e Etnobiologia do Pantanal, Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, Mato Grosso, Brasil

^b Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

^c Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ANA/UNEMAT), Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta, Mato Grosso, Brasil

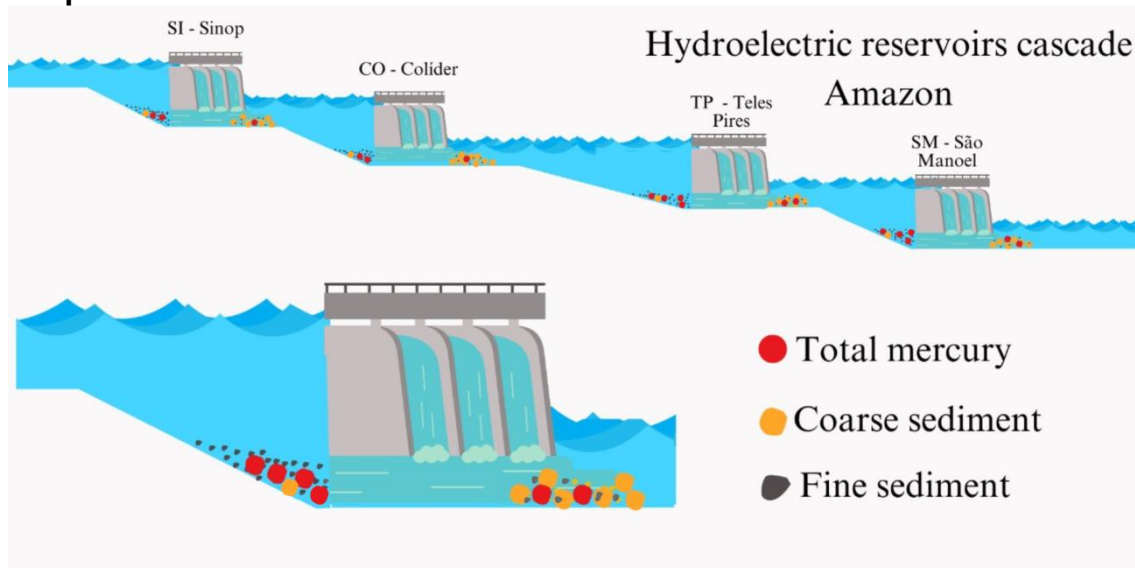
^d Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Pesquisa em Limnologia, Biodiversidade e Etnobiologia do Pantanal; Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ANA/UNEMAT), Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta, Mato Grosso, Brasil

^e Laboratório de Pesquisa e Estudos em Geomorfologia Fluvial “Sandra Baptista da Cunha”, Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, Mato Grosso, Brasil

^f Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, Mato Grosso, Brasil

[Preparado de acordo com as normas de publicação da revista *Water, Air, & Soil Pollution* (Print ISSN: 1573-2932. Online ISSN: 0049-6979). Fator de impacto 3.8. Situação da submissão: em andamento]

Graphical abstract



Resumo

A demanda energética global crescente resultou na criação de diversos reservatórios hidrelétricos. Na Amazônia brasileira existem diversas plantas energéticas de diferentes tamanhos construídas e planejadas. As usinas hidrelétricas (UHE) são particularmente impactantes devido ao tamanho dos reservatórios. A geoquímica do mercúrio (Hg) nos reservatórios em cascata ainda não é bem compreendida, sendo o metal particularmente importante devido a sua toxicidade e ao seu histórico de na região. O objetivo desse estudo foi avaliar a dinâmica do Hg em sedimentos de fundo e solos que circundam quatro reservatórios hidrelétricos em cascata na Amazônia (de montante para jusante: UHE Sinop, UHE Colíder, UHE Teles Pires, UHE São Manoel). Os sedimentos foram coletados em três pontos em cada reservatório e a jusante ($n = 35$) e os solos foram coletados lateralmente aos pontos de coleta dos sedimentos (solo: 0-30 cm $n = 18$, 30-60 cm $n = 16$, 60-90 cm $n = 15$). As concentrações mercúrio total (THg) nos sedimentos foram mais elevadas no lago do reservatório do que a jusante da barragem em todos os reservatórios. Também verificamos que os níveis totais de THg nos sedimentos e solos aumentaram seguindo o fluxo do rio, aumentando do ponto de montante (lago do reservatório de Sinop) até o lago do reservatório de Teles Pires, onde os níveis começaram a diminuir até o último ponto (a jusante da barragem de São Manoel). Nossos resultados sugerem uma influência do reservatório no aumento das

concentrações de Hg nos sedimentos ao longo do rio e uma possível transferência de Hg do solo para o sedimento durante o processo de enchimento do reservatório.

Palavras-chave: mercúrio total, reservatório hidrelétrico em cascata, Amazônia, monitoramento ambiental

Abstract

Hydroelectric reservoirs have expanded due to growing global energy demand. In the Brazilian Amazon, numerous energy plants of varying sizes have been built and planned. The larger hydroelectric plants are particularly impactful due to the size of their reservoirs. The geochemistry of mercury (Hg) in these cascading reservoir complexes is not well understood. Mercury is significant because of its historical use in the region. The aim of this study was to evaluate the dynamics of mercury in bottom sediments and soils surrounding four cascading hydroelectric reservoirs in the Amazon, in the Tapajós basin (from upstream to downstream: Sinop, Colíder, Teles Pires, and São Manoel). Sediments were collected at reservoirs and their downstream areas ($n = 35$), and soil was collected laterally from sediment collection points (soil: 0-30 cm $n = 18$, 30-60 cm $n = 16$, 60-90 cm $n = 15$). Total mercury (THg) concentrations in sediments were higher in the reservoir lake than downstream of the dam in all reservoirs. We also found that THg levels in sediment and soil increased downstream, from the upstream reservoir (Sinop) to the Teles Pires reservoir, where concentrations began to decrease toward the final site downstream of São Manoel dam. Our results suggest that the reservoir influences increased Hg concentrations in sediments along the river, with possible transfer of Hg from soil to sediment during reservoir filling.

Keywords: total mercury, cascading hydroelectric plants, Amazon, environmental monitoring

1 Introdução

O mercúrio (Hg) é um poluente de preocupação global devido à sua alta toxicidade e capacidade de dispersão atmosférica (Hacon et al., 2008). O Hg pode ser encontrado tanto em compartimentos bióticos quanto abióticos, sendo amplificado por atividades antrópicas (Wasserman et al., 2003; Kasper et al., 2014;

Lino et al., 2019). Naturalmente, o Hg é disponibilizado por processos geogênicos, como intemperismo de rochas, deposição no solo e incêndios florestais (Wasserman, 2003). No entanto, atividades humanas podem amplificar significativamente a dispersão do Hg ou modificar o ambiente natural, promovendo sua metilação e aumentando sua biodisponibilidade (Wang et al., 2014; Lázaro et al., 2016). Na Amazônia, as principais fontes incluem a mineração artesanal de ouro (garimpo), ao uso e ocupação do solo e incêndios florestais (Guimarães, 2020; Pestana et al., 2022). As hidrelétricas representam uma importante pressão na Amazônia, embora não sejam fontes diretas de Hg, mas um fator que modificam a dinâmica biogeoquímica desse elemento nos ecossistemas aquáticos desse bioma (Kasper et al., 2014; Crespo-Lopes et al., 2021; Oliveira et al., 2025).

No ambiente terrestre, os solos atuam como um meio de armazenamento para o Hg. Na Amazônia, o Hg no solo está frequentemente associado à deposição atmosférica (Hacon et al., 1995), às atividades de mineração (Telmer et al., 2006) e à sua origem pedológica, uma vez que os solos amazônicos são ricos em oxi-hidróxidos de ferro e alumínio que apresentam alta afinidade por metais (Roulet et al., 1998). Além das liberações naturais, como o alagamento sazonal do solo (Lopes-Blanco et al., 2015; Kasper et al., 2017), a exposição do solo a altas temperaturas pode intensificar a volatilização do Hg. Lacerda et al. (2004) descobriram que os solos de pastagem amazônicos possuem menor retenção de Hg em comparação com solos florestais devido à maior exposição à radiação solar e à prática comum de queimadas.

Práticas agrícolas que envolvem desflorestamento, queima e cultivo em grande escala facilitam o deslocamento do Hg para os corpos hídricos por meio da erosão e lixiviação dos íons solo, impulsionados pela elevada precipitação sazonal da região (Lacerda et al., 2004; Mainville et al., 2006). Uma vez mobilizado, o Hg proveniente do solo pode ser transportado para os sistemas aquáticos, acumulando-se principalmente nos sedimentos.

Nos ecossistemas aquáticos, algumas condições limnológicas e a composição da microbiota, como bactérias redutoras de ferro e sulfato, podem promover a metilação do Hg, aumentando sua ecotoxicidade e potencial de bioacumulação (Hsu-Kim et al., 2013). Dessa forma, os sedimentos podem atuar tanto como sumidouros, mantendo o Hg adsorvido às partículas depositadas (Schütze et al., 2021), quanto como fontes secundárias de contaminação,

especialmente quando o metilmercúrio é formado e os sedimentos são ressuspensos (Lino et al., 2019; Yang et al., 2020). Essa ressuspensão dependendo de parâmetros de pH, potencial redox, biodisponibilidade de nutrientes e ressuspensão física dos sedimentos pode ser um importante mecanismo de redistribuição da contaminação antropogênica das áreas a montante para as áreas a jusante nos rios, conforme observado por Lino et al. (2019) no rio Tapajós (bacia Amazônica), onde a mineração de ouro é frequente nas cabeceiras.

Além disso, o tamanho das partículas do sedimento pode influenciar as concentrações de Hg, sendo as partículas finas, como silte e argila, tendem a adsorver e imobilizar mais Hg devido dada a sua maior área superficial específica (Moreno-Brush et al., 2016; Gomes et al., 2022). A mobilidade do mercúrio também pode ser influenciada pelos níveis de ferro, manganês e alumínio lábeis (Oliveira et al., 2021).

Nos reservatórios, os sedimentos têm origem da erosão e argiluviação a montante, além da decomposição da matéria orgânica durante o enchimento do reservatório. Esses sedimentos tendem a se acumular nas áreas mais profundas da zona lacustre dos reservatórios, à medida que o ambiente transita para um estado mais lântico favorecendo a criação de condições anóxicas prócias a metilação do Hg (Pestana et al., 2019). Concentrações mais elevadas de Hg nesses sedimentos lacustres foram registradas em comparação com as áreas a jusante nos reservatórios de Lago Manso (Hylander et al., 2006) e Tucuruí (Paiva et al., 2004a), ambos no Brasil. À medida que as partículas de sedimento na zona lacustre próximas às turbinas são ressuspensas e transportadas para jusante (Pestana et al., 2019), ocorre um declínio nas concentrações imediatamente a jusante, devido à profundidade reduzida e ao intenso fluxo de água. Em contraste, os teores de Hg na biota podem ser mais elevados a jusante da barragem se ocorrer metilação no hipolímnio do reservatório (Kasper et al., 2014; Oliveira et al., 2025) e se houver alteração na dieta dos peixes a jusante (Paiva et al., 2004b; Palermo et al., 2004).

Reservatórios em cascata são barramentos sequenciais ao longo do mesmo rio, e existem especialmente em grandes rios. Nas últimas décadas, eles têm sido utilizados como estratégia para expandir a produção energética em várias regiões, como América do Sul (Oliveira et al., 2025), América do Norte (Willacker et al., 2023) e Ásia (Zhao et al., 2017). Analisar os efeitos dos reservatórios em cascata é complexo, pois esses sistemas frequentemente diferem em tamanho, idade,

profundidade e tempo de residência da água. Em peixes, estudos mostram que reservatórios em cascata constantemente estratificados apresentam maiores concentrações de Hg a jusante (Willacker et al., 2023). Além disso, reservatórios localizados mais a jusante também apresenta maiores concentrações de Hg em peixes, sugerindo um efeito cumulativo ao longo da cascata (Oliveira et al., 2025). Para os sedimentos, fatores como a idade do reservatório e o tempo de residência da água podem influenciar as concentrações de Hg de forma negativa e positiva, respectivamente (Ma et al., 2022).

O Brasil possui diversas usinas hidrelétricas na Amazônia e planeja desenvolver mais de uma centena de aproveitamentos hidrelétricos nos próximos anos. No entanto, a legislação ambiental atual é inadequada para avaliar os efeitos cumulativo do Hg em complexos de reservatórios em cascata (Pereira, 2023). Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o padrão de acúmulo de mercúrio total (THg) em sedimentos e solos de reservatórios hidrelétricos em cascata na Amazônia meridional. Nossa hipótese é que as concentrações de Hg diminuem a jusante de cada barragem, mas que há um efeito amplificado ao longo do rio e de seus reservatórios em cascata. Hipotetizamos que (1) as concentrações de THg são menores a jusante da barragem para as amostras de sedimento, mas não para as amostras de solo, pois estas são independentes das barragens; (2) as concentrações de THg aumentam ao longo do rio para as amostras de sedimento, mas não para as de solo; (3) há maiores concentrações de THg em sedimentos e solos de menor granulometria e com maior teor de matéria orgânica.

2 Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida ao longo de 485 km no rio Teles Pires em uma área que abrange quatro usinas hidrelétricas (UHE) e no rio Juruena (ponto controle) em uma região livre de barramentos (Fig. 1). Ambos os rios são afluentes da Rio Tapajos, importante contribuinte da bacia hidrográfica amazônica (Oliveira et al. 2025).

O rio Teles Pires, com extensão de 1370 km, possui quatro UHEs no trecho estudado: 1. UHE Sinop (461 MW enchimento e operação desde 2019), 2. UHE Colíder (342 MW enchimento 2017, em operação desde 2019), 3. UHE Teles Pires (1820 MW enchimento em 2014 e operação desde 2015) e 4. São Manoel (746 MW

enchimento em 2017 e operação desde 2018). As áreas de lâmina d'água dos reservatórios são de 330 km² em UHE Sinop, 172 km² em UHE Colíder, 152 km² em UHE Teles Pires e 53 km² em UHE São Manoel (Fearnside, 2019).

Esta região da Amazônia foi altamente antropizada nas décadas de 1980 e 1990, com intenso lançamento de mercúrio para atmosfera (Hacon et al., 1995). Tata-se de uma região produtora de grãos, como soja e milho, pecuária e extração de madeira (Mato Grosso, 2004). Durante a amostragem cinco e 11 balsas de garimpo em atividade foram observadas nos reservatórios da UHE Teles Pires e São Manoel, respectivamente. Nesta última, também foram observadas a jusante balsas inutilizadas próximas a Terras Indígenas, sendo também foram observados “arrotos de dragas” (bancos de areia no rio devido a mobilização do fundo do leito do rio via atividade garimpeira) em alguns locais.

O rio Juruena possui 1.080 km de extensão, com presença de diversos meandros ao longo do curso e notório complexo de ilhas (ICMBio, 2011) margeado por mata ciliar em toda extensão de amostragem (Oliveira et al. 2023). A pecuária, a produção de grãos, a cana-de-açúcar e a indústria madeireira são as principais atividades econômicas nesta bacia hidrográfica (ICMBio, 2011). A bacia hidrográfica do rio Juruena tem 179 aproveitamentos hidrelétricos de diferentes modalidades (pequena, média e de grande porte), sendo 11 UHE para o rio Juruena (1 em construção e 10 em planejadas) (Pereira, 2023). Duas usinas hidrelétricas (UHEs) estão em construção (Aneel, 2025) localizadas aproximadamente 500 km a montante do local de amostragem. O trecho utilizado como ponto controle no rio Juruena não possui reservatórios próximos.

Ambas as áreas apresentam clima equatorial continental úmido com estação seca (ICMBio, 2011) com índice pluviométrico de 2500 mm (MOLINIER, 1996; ICMBio, 2011). A estação seca ocorre entre julho e outubro e chuvosa ocorre de dezembro a maio (ICMBio, 2011).

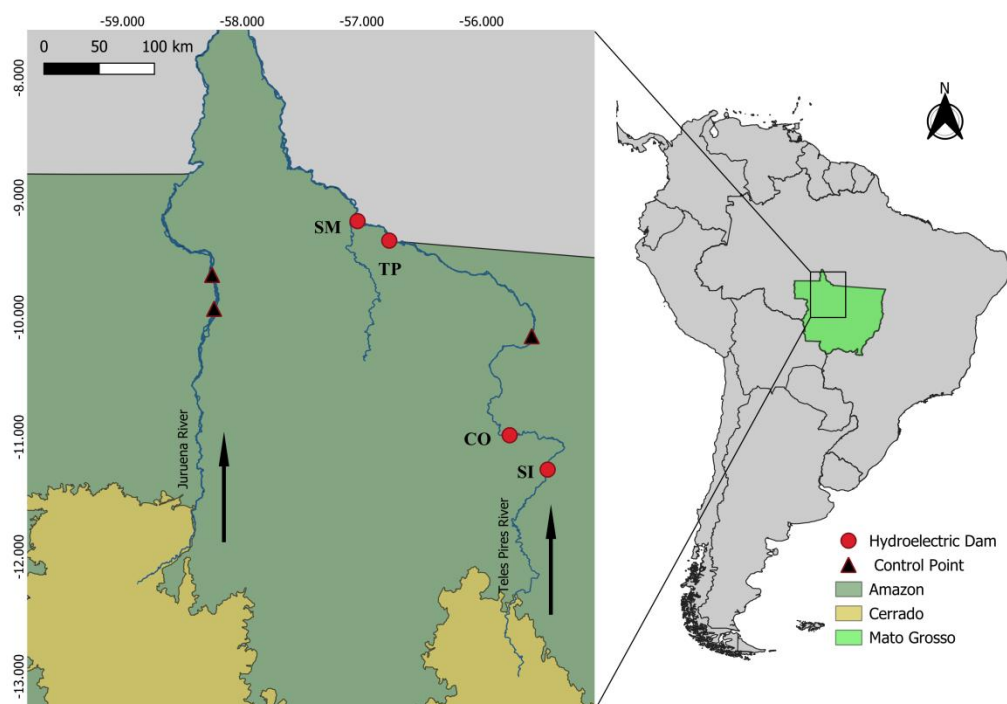


Fig. 1. Locais de amostragem na Bacia Amazônica, Brasil. Círculos vermelhos indicam as usinas hidrelétricas (UHEs) amostradas no rio Teles Pires. Os triângulos pretos são os locais de amostragem controle nos rios Teles Pires e Juruena. SI: UHE Sinop, C CO: UHE Colíder, TP: UHE Teles Pires, SM: UHE São Manoel. Setas indicam o fluxo dos rios

2.2 Amostragem

No rio Teles Pires, as amostras de sedimento e solo foram coletadas em quatro pontos em cada reservatório hidrelétrico, sendo três pontos a montante na fase reservatório e um ponto a jusante, aproximadamente 1 km do reservatório, também houve coleta no ponto controle do rio Teles Pires (solo: 0-30 cm $n = 18$, 30-60 cm $n = 16$, 60-90 cm $n = 15$; sedimento: $n = 35$) e no ponto controle do rio Juruena (solo: $n = 6$; sedimento: $n = 4$). No rio Juruena as amostras dos dois pontos (Fig. 1) foram agrupadas para composição das análises estatísticas (sendo 3 amostras de solo, uma de 0-30 cm, uma de 30-60 cm, e uma 60-90 cm, e duas amostras de sedimento. O solo foi coletado lateralmente a amostragem de sedimento em áreas vegetadas.

O sedimento de fundo foi coletado com auxílio de draga Petersen, armazenado em sacos plásticos de polietileno e resfriados. O solo foi coletado lateralmente aos pontos de amostragem de sedimentos em três profundidades com

auxílio de trado após a remoção da liteira orgânica: 0-30 cm, 30-60 cm e 60-90 cm. Em cada ponto de amostragem de solo, foram coletadas três subamostras nas mesmas profundidades que foram misturadas em uma única amostra para as análises granulométricas e de THg.

A amostragem de sedimento ocorreu em duas campanhas em períodos sazonais distintos, agosto/2022 e abril/2024. A amostragem de solo ocorreu em agosto/2023.

2.3 Caracterização do sedimento e solo

Para a análise granulométrica as amostras de sedimento e solo foram secas a temperatura ambiente ($\sim 30^\circ\text{C}$) por 48h, 100 g de material seco foram submetidos a um processo mecânico de agitação utilizando-se um agitador eletromagnético equipado com uma sequência de peneiras padronizadas por 15 min. As porções retidas em cada peneira foram pesadas, permitindo a classificação de areia grossa $> 0.212\text{ mm}$, $0.212\text{ mm} < \text{areia fina} > 0,053\text{ mm}$, e silte + argila $< 0,053\text{ mm}$.

A análise de perda de ignição foi feita pela queima de uma amostra seca de 5 g (sedimento e solo) a 500°C em um forno mufla por 6 h. Este material foi pesado antes e depois da queima e a diferença de peso usada para cálculo. Isso foi denominado aqui como teor de matéria orgânica (MO).

2.4 Quantificação de THg

Aproximadamente 100 mg de amostras secas de sedimento e solo (granulo inferior a 2 mm) foram acondicionadas em barcas de níquel para leitura. Todas as amostras foram secas em temperatura ambiente e analisadas no Direct Mercury Analyzer com duas células (DMA-80, Milestone) em duplicata. As duplicatas variaram, em média 9.6%. Todos os resultados são apresentados em peso seco.

A curva de calibração foi gerada utilizando solução padrão de Hg 1000 mg L^{-1} , sendo esta com dez pontos referência em duas faixas de concentração de 2 a 10 ng Hg e 10 a 100 ng Hg. O método operacional de análise foi 250°C , inicialização aquecimento de 650°C por 2 minutos e queima à 650°C por 1 minuto. Blind values e amostras brancas foram realizadas a cada 10 análises. O limite de detecção foi de $0.01\text{ }\mu\text{g kg}^{-1}$.

A validação do método foi feita por meio da análise de material de referência certificado ERM-CC141 *loam soil*, cujas concentrações de de THg variaram de 54,79

– 59,86 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (n=3), de acordo com o valor certificado ($83 \pm 17 \mu\text{g kg}^{-1}$). Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Ecotoxicologia do Centro de Pesquisa de Limnologia, Biodiversidade, Etnobiologia do Pantanal (CELBE – UNEMAT).

2.5 Análise de dados

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para verificar diferenças nas concentrações de THg entre as três profundidades do solo. Como apresentaram concentrações semelhantes, as três profundidades foram agrupadas para a análise espacial subsequente. No caso dos sedimentos, foi realizado um teste t para comparar as concentrações de THg entre os períodos sazonais de amostragem (seco versus chuvoso). Como ambos apresentaram níveis semelhantes, os dois períodos foram agrupados para a análise espacial subsequente. Para avaliar as diferenças espaciais nas concentrações de THg no substrato (solo e sedimento), foram realizadas ANOVA seguida de testes post-hoc de Tukey.

A relação entre THg no solo e no sedimento foi avaliada por meio de três regressões lineares, uma para cada profundidade do solo. A relação entre características granulométricas, matéria orgânica (MO) e THg foi analisada por meio de duas Análises de Componentes Principais (PCA), uma para amostras de solo e outra para amostras de sedimento.

A suposição de normalidade dos dados e resíduos foi testada em todos os tratamentos utilizando os testes de Shapiro-Wilk ou Kolmogorov-Smirnov, e a homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Levene. Os dados de concentração de THg nos sedimentos foram log-transformados para atender à distribuição normal exigida pela ANOVA. Todas as análises estatísticas foram realizadas considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). As análises estatísticas foram conduzidas utilizando-se o software R, versão 4.3.1.

3. Resultados

As concentrações de THg tenderam a diminuir ao longo das três profundidades do solo, embora não tenham sido estatisticamente diferentes entre si ($F_{9,41} = 2.238$, $p = 0.12$, Fig. 2). Os dados variaram de 12.09 a 100.19 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (peso seco) na camada mais superficial (0-30 cm) para 7.67 a 59.77 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (peso seco) na camada mais profunda (60-90 cm). Como as concentrações não apresentaram

diferenças significativas entre as profundidades, todas as três camadas de solo foram agrupadas para as análises da dinâmica espacial.

Observou-se um aumento das concentrações de THg no solo ao longo do rio Teles Pires ($F_{9,41} = 28.2$, $p < 0,0001$, Fig. 3). As maiores concentrações de THg em solos das margens dos reservatórios foram registradas nas áreas das UHEs Teles Pires e São Manoel, enquanto a jusante dessas duas barragens as concentrações de THg foram os mais baixos. Nessas duas usinas hidrelétricas, houve diferença significativa nas concentrações entre montante e jusante, o que não ocorreu nas duas primeiras usinas, resultando em concentrações de THg a jusante inferior às dos pontos-controle (Fig. 3).

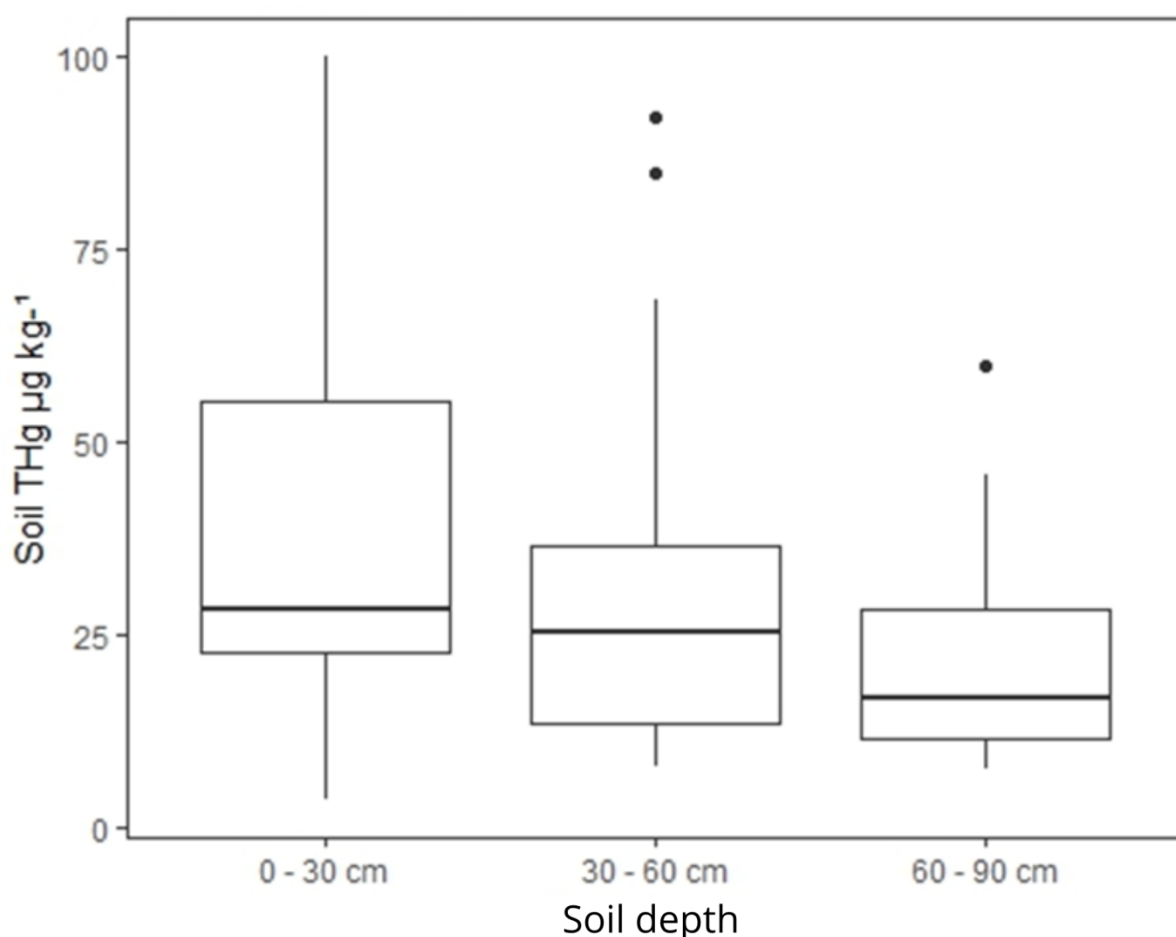


Fig. 2. Concentração de mercúrio total (THg) em solos de diferentes profundidade coletados nas margens do rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle) e rio Juruena (ponto controle sem barragens) na bacia Amazônica. Pontos pretos indicam outliers.

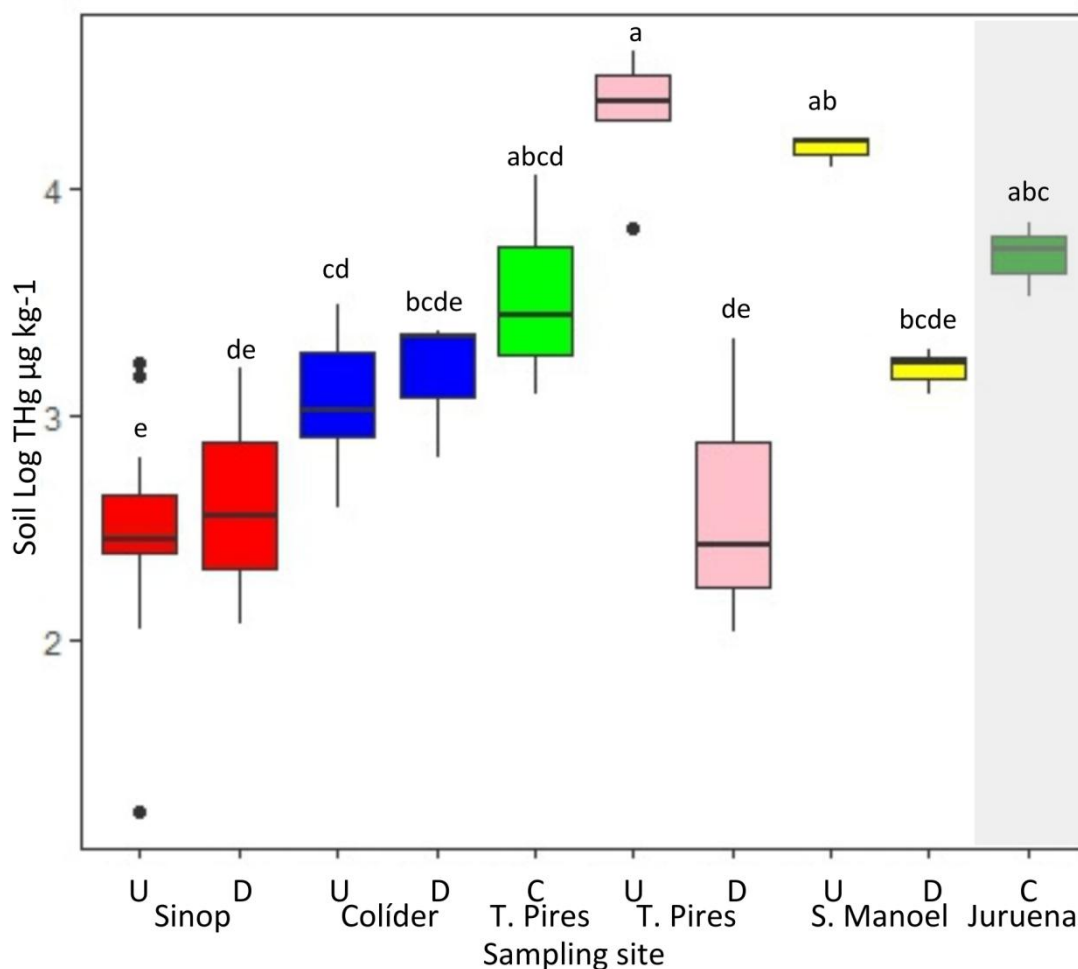


Fig. 3. Concentração de mercúrio total (THg) em amostras desolos coletados as margens do rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e pontos controle) e rio Juruena (ponto controle sem reservatório hidrelétrica) na bacia Amazônica. Letras diferentes no boxplot indicam diferenças estatísticas (Teste de Tukey). Pontos pretos indicam outliers. Letras no eixo X U: montante do reservatório, D: jusante do reservatório, e C: pontos controle.

As concentrações de THg nos sedimentos de fundo foram semelhantes entre as estações de amostragem ($t = -0.316$; $p = 0.758$, Fig. S1). Consequentemente, todo o conjunto de dados, independentemente do período de amostragem, foi utilizado para avaliar as diferenças espaciais subsequentes.

Os locais a montante das barragens apresentaram concentrações de THg sedimento mais elevados do que os pontos de controle ($F_{9,26} = 3.378$, $p = 0.0072$, Fig. 4). Essas concentrações foram mais altas a montante das barragens nas UHEs

Teles Pires e São Manoel. Os quatro locais a jusante apresentaram níveis semelhantes entre si, correspondendo de 1,7% a 13% da média das concentrações a montante.

Devido à variabilidade granulométrica nas amostras de sedimento (dados apresentados abaixo), as concentrações de THg no sedimento foram normalizadas pelo teor de silte+argila (conforme Gomes et al., 2022). Essas concentrações normalizadas de THg (Fig. S2) foram semelhantes aos níveis não normalizadas (dados brutos; Fig. 4).

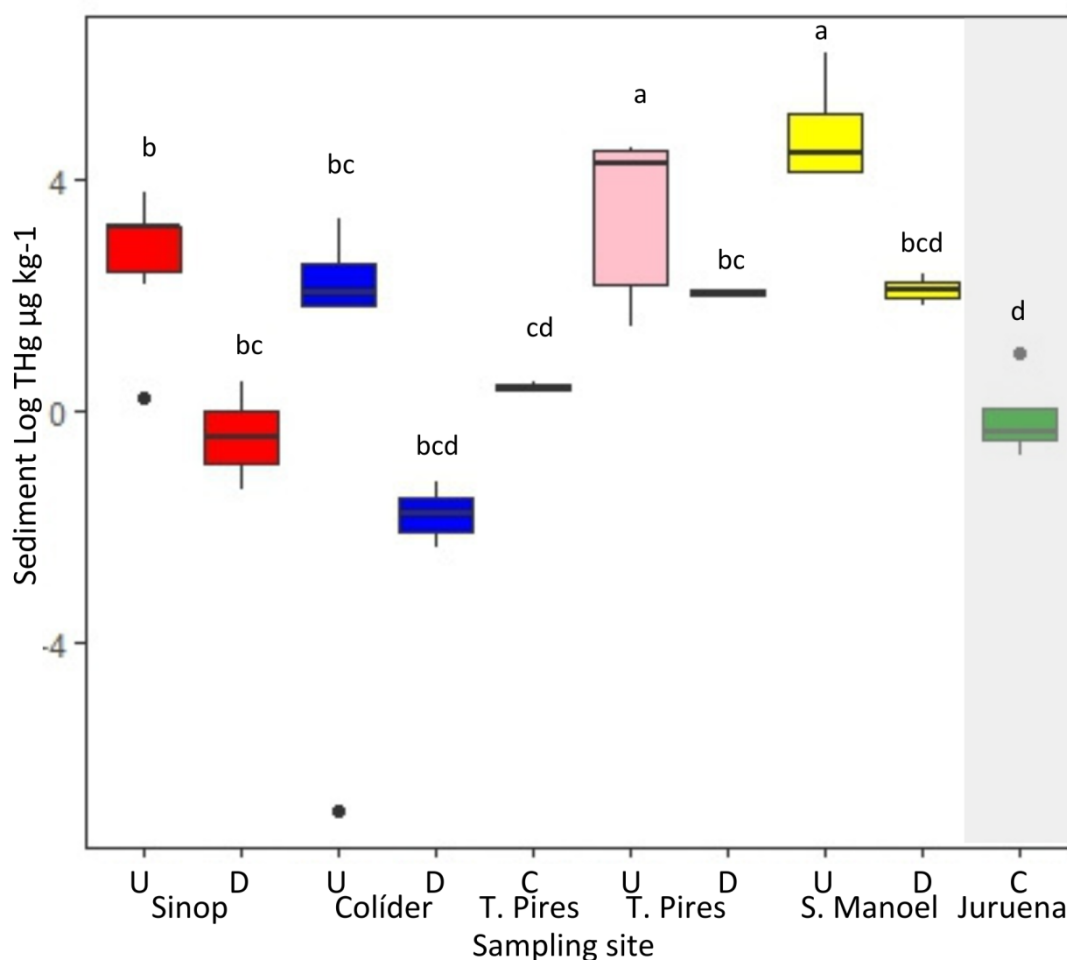


Fig. 4. Concentrações de mercúrio total (THg) em sedimentos de fundo coletados em reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle no rio Teles Pires e rio Juruena (ponto controle) na bacia Amazônica. Pontos pretos indicam outlier. Letras no eixo X U: montante do reservatório, D: jusante do reservatório, e C: pontos controle. Pontos pretos indicam outliers.

A granulometria, a matéria orgânica (OM) e as concentrações de THg nos sedimentos apresentaram uma alta associação com PC1 e PC2 (Fig. 5A), explicando aproximadamente 96% da variabilidade dos dados. Em todos os pontos a jusante, o percentual de silte/argila foi inferior a 1%, a areia fina variou entre 6% e 16%, e a areia grossa entre 84% e 94%. Nos pontos nos reservatórios, os percentuais de silte/argila variaram entre 1% e 19%, a areia fina entre 3% e 70%, e a areia grossa entre 3% e 97%. A OM nos locais a jusante variou entre 0.15% e 0.32%, enquanto no ambiente a montante os valores oscilaram entre 12% e 14%, indicando maior variabilidade granulométrica e níveis mais elevados de OM no sedimento ambiente a montante.

Para os solos, PC1 e PC2 explicaram aproximadamente 77% da variabilidade dos dados de granulometria, OM e THg (Fig. 5B). As três profundidades do solo apresentaram granulometria semelhante entre si, com teor de areia de $84.5 \pm 8.6\%$ e silte/argila de $15.5 \pm 8.6\%$. A OM do solo foi de $6 \pm 4\%$ na camada de 0-30 cm, $6 \pm 3\%$ na de 30-60 cm e $5 \pm 3\%$ na de 60-90 cm. As relações entre as concentrações de THg no sedimento e no solo com OM e granulometria são apresentadas na Fig. S3 (material suplementar). Houve uma relação positiva entre os níveis de THg no sedimento e a porcentagem de silte+argila (Fig. S3, material suplementar).

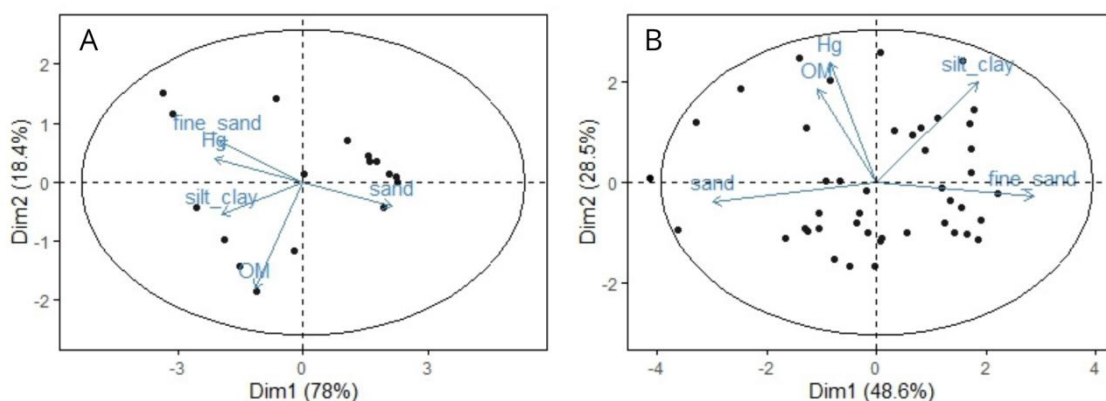


Fig. 5. Biplot baseado em Análise de Componentes Principais para granulometria, matéria orgânica (OM) e concentração de mercúrio total (THg) em sedimento (A) e solo (B) coletados em reservatórios hidrelétricos em cascata e as margens do rio Teles Pires e rio Juruena (ponto controle sem reservatório) na bacia Amazônica.

A granulometria do solo nos pontos de controle do rio Teles Pires consistia em $79.0 \pm 9.1\%$ de areia e $20.1 \pm 9.1\%$ de silte/argila, com um teor de OM de $8.2 \pm$

1.8%. No ponto de controle do rio Juruena, a granulometria do solo foi composta por $76.0 \pm 13.3\%$ de argila e $6.5 \pm 0.9\%$ de silte/argila, com um teor de OM de $6.5 \pm 0.9\%$. Para os sedimentos em ambos os pontos, a areia representou mais de 99.5%, enquanto o teor de OM foi de 4.4% e 0.4% nos pontos de controle dos rios Teles Pires e Juruena, respectivamente.

As relações entre as concentrações de THg no sedimento e no solo apresentaram uma tendência positiva, porém não foram significativas nas camadas de 30-60 cm ($R^2 = -0.02$, $p = 0.58$) e 60-90 cm ($R^2 = -0.004$, $p = 0.36$). Na camada de 0-30 cm, a relação foi marginalmente significativa, mas com um baixo valor de R^2 ($R^2 = 0.07$, $p = 0.07$, Fig. S4).

4 Discussão

As concentrações de THg no substrato (solo/sedimento) na bacia do Tapajós foram influenciadas pela posição em relação à barragem do reservatório (montante versus jusante) e pela posição ao longo do rio e de seus reservatórios em cascata. Previmos que as concentrações de THg seriam menores a jusante da barragem para amostras de sedimento (o que foi observado), mas não para amostras de solo (o que foi parcialmente observado). Também previmos que as concentrações de THg seriam maiores ao longo do rio para as amostras de sedimento, mas não para as de solo, e foi observado que tanto o sedimento quanto o solo apresentaram aumento ao longo do rio. Por fim, previmos que haveria maiores concentrações de THg em sedimentos e solos com partículas menores e com maior teor de OM; os sedimentos com partículas menores apresentaram as maiores concentrações, mas as outras correlações não foram observadas. Essas três previsões são discutidas abaixo.

As concentrações de Hg nos solos aumentaram ao longo do rio e foram menores a jusante da barragem de Teles Pires e da barragem de São Manoel. Não está claro por que esse padrão está ocorrendo. É improvável que os reservatórios influenciem as concentrações de Hg nesses solos. Concentrações mais baixas de Hg nos solos a jusante da barragem hidrelétrica também foram observadas no reservatório de Tucuruí, na Amazônia (Paiva et al., 2024a). Provavelmente, algumas atividades antropogênicas estão influenciando esses padrões. Além disso, a variabilidade natural do solo também pode desempenhar um papel. Estudos mostraram que os solos amazônicos contêm Hg principalmente associado a óxidos

de ferro e alumínio (Roulet et al., 1998; Sahoo et al., 2023) e, portanto, a presença desses óxidos pode influenciar as concentrações de Hg no solo. Sahoo et al. (2023) destacaram a variabilidade das concentrações de Hg nos solos amazônicos e enfatizaram a necessidade de estudos mais detalhados que considerem a região geográfica, a geologia e os fatores antropogênicos.

Várias bacias hidrográficas amazônicas foram investigadas quanto à contaminação por Hg no solo, incluindo a bacia do rio Teles Pires, onde as concentrações máximas de Hg atingiram $248 \mu\text{g.kg}^{-1}$ (Lacerda et al., 2004). Outras bacias amazônicas estudadas apresentaram concentrações máximas Hg no solo de $232 \mu\text{g.kg}^{-1}$ no rio Negro (Fadini e Jardim, 2001), $52 \mu\text{g.kg}^{-1}$ no rio Tocantins (Paiva et al., 2024a) e $540 \mu\text{g.kg}^{-1}$ no rio Itacaiúnas (Sahoo et al., 2023). Em nosso estudo, a maior concentração de Hg no solo foi de $100 \mu\text{g.kg}^{-1}$, proveniente de uma amostra na UHE Teles Pires. Esse valor está abaixo do limite regulatório brasileiro, que considera solo contaminado com Hg aquele que apresenta concentrações acima de $500 \mu\text{g.kg}^{-1}$ (Conama, 2012).

As concentrações de Hg nos solos não apresentaram diferenças significativas entre as profundidades. No entanto, sua variação diminuiu com o aumento da profundidade. As concentrações de Hg na camada superficial dos solos podem ser impactadas por diversos fatores, como a variabilidade da volatilização devido à cobertura florestal (Lacerda et al., 2004), a deposição de mercúrio de fontes atmosféricas naturais e antropogênicas (Hacon et al., 2008; Crespo-Lopes et al., 2021) e a associação com a matéria orgânica da serapilheira (Roulet et al., 1998; Lacerda et al., 2004). Dessa forma, múltiplos fatores podem variar nas camadas superficiais, fazendo com que as concentrações de Hg variem tanto naturalmente quanto devido a influências antropogênicas.

Em relação à matéria orgânica, embora essa relação tenha sido observada em solos (por exemplo, Miretzky et al., 2005), ela não se mostrou um padrão consistente neste estudo quando examinamos todas as amostras em conjunto. Isso indica que outros fatores podem ser mais importantes para o sequestro de Hg nesse compartimento.

Como os solos formam os sedimentos, esperávamos uma correlação entre as concentrações de Hg nessas duas matrizes. No entanto, este estudo encontrou apenas uma relação positiva marginalmente significativa entre as concentrações de

Hg na camada de solo de 0–30 cm e no sedimento. O Hg nos sedimentos pode ter origem no Hg pré-existente no sedimento do rio original, no Hg pré-existente nos solos da área inundada e no Hg transportado por erosão natural e processos de lixiviação desencadeados por chuvas tropicais (Telmer et al., 2006), desmatamento e uso da terra para pecuária (Mainville et al., 2006). Além disso, o sedimento é influenciado por atividades antropogênicas a montante e pela deposição atmosférica (Pestana et al., 2019).

Em nosso estudo, foram observadas atividades como pecuária e monocultura de soja nas áreas ao redor dos reservatórios de Sinop, Colíder e Teles Pires, além da presença de operações de mineração em pequena escala utilizando Hg para amalgamação de ouro com dragas nos reservatórios de Teles Pires e São Manoel. Essas atividades minerárias perturbam o solo lateral e o sedimento e no fundo dos lagos, bem como os solos laterais e das ilhas (Miserendino et al., 2017).

Em todos os reservatórios deste estudo, as concentrações de Hg em sedimento foram maiores a montante da barragem em comparação com as áreas a jusante. Esse padrão também foi observado no reservatório de Tucuruí (Paiva et al., 2024a). Os sedimentos atuam como sumidouros de Hg (Schütze et al., 2021), especialmente em ecossistemas aquáticos lênticos, como os reservatórios. Esse fenômeno não ocorre a jusante. Isso pode ser atribuído a diferenças no tamanho das partículas e no teor de matéria orgânica. Os sedimentos dos reservatórios tendem a ser mais argilosos, com uma maior proporção de partículas finas e maior percentual de matéria orgânica. Em contrapartida, os sedimentos a jusante são predominantemente arenosos, contendo uma maior proporção de partículas maiores (Oliveira et al., 2021).

Partículas finas de sedimento possuem uma maior área superficial específica, o que permite maior adsorção de Hg, resultando em concentrações mais altas (Soares et al., 2015; Pestana et al., 2016). Esse padrão de sedimentação nos reservatórios pode ser ainda mais intensificado em sistemas em cascata, como observado neste estudo. De fato, observamos uma forte relação entre partículas finas e concentrações de Hg nos sedimentos. No entanto, quando normalizamos as concentrações pelo percentual de silte+argila, continuamos a observar essa dinâmica. Portanto, esse fenômeno ocorre independentemente da influência do tamanho das partículas. Assim, esse padrão também está relacionado à dinâmica fluvial a jusante do reservatório, que não favorece a acumulação de Hg nessa

região. Os processos envolvidos nesse fenômeno ainda não estão totalmente esclarecidos.

A dinâmica Hg nos substratos dos reservatórios (solo/sedimento) contrasta com o observado na biota. A jusante desses reservatórios hidrelétricos, os peixes apresentaram concentrações de Hg mais elevadas do que aqueles nos reservatórios a montante (Oliveira et al., 2025). Estudos relataram níveis elevados de Hg em peixes de outras áreas a jusante na bacia amazônica, incluindo planctívoros e piscívoros na UHE Tucuruí (Palermo et al., 2004), onívoros e carnívoros na UHE Samuel (Kasper et al., 2012), piscívoros na UHE Balbina (Kasper et al., 2014), onívoros na UHE Tucuruí (Paiva et al., 2024b) e carnívoros na UHE Petit-Saut (Maury-Brachet et al., 2024).

A liberação de água pelas turbinas exporta metilmercúrio do hipolímnio e do sedimento de fundo para o rio a jusante da barragem, tornando a biota dessa região mais suscetível à bioacumulação de Hg (Pestana et al., 2019). A presença de Hg nos sedimentos a montante, em uma área que já possui condições propícias para a metilação do Hg, pode ser extremamente prejudicial à biota, especialmente a jusante, mesmo que não haja altas concentrações de THg nos sedimentos dessa região. Dessa forma, os reservatórios hidrelétricos atuam como armadilhas de Hg, acumulando e mobilizando o metal por meio de sua metilação e acumulação na biota, afetando diretamente a fauna a jusante.

A questão da contaminação por Hg em reservatórios em cascata ainda é pouco estudada, especialmente no que se refere ao impacto cumulativo ao longo das redes de barragens. Até onde sabemos, este é o primeiro estudo a investigar a dinâmica entre Hg em solos e sedimentos em reservatórios em cascata na América do Sul e em floresta tropical. Nossos resultados indicam que a posição espacial desempenha um papel crucial na acumulação de Hg nos sedimentos, com uma provável transferência de Hg do solo, principalmente durante o enchimento do reservatório e/ou por meio da erosão.

No entanto, Ma et al. (2017) descobriram que, em reservatórios em cascata na China que estavam em operação há mais de um ano, a acumulação de Hg estava mais fortemente correlacionada com o tempo de residência da água do que com a sequência espacial. A maioria dos estudos sobre contaminação por Hg em reservatórios em cascata foca em outros compartimentos ambientais, como os peixes, onde concentrações mais altas de Hg foram observadas em reservatórios

estratificados (Willacker et al., 2023) e são influenciadas pela posição espacial (Oliveira et al., 2025).

5 Conclusão

Este estudo fornece novos insights sobre a distribuição espacial e a dinâmica do mercúrio total (THg) em solos e sedimentos de reservatórios hidrelétricos em cascata na Amazônia com implicações diretas para a qualidade ambiental e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Os resultados destacam o papel dos processos hidrológicos e geoquímicos na acumulação e mobilização de Hg. Nossos resultados destacam três principais conclusões:

1. *Padrões espaciais de acumulação de Hg* – As concentrações de THg em solos e sedimentos foram influenciadas pela posição em relação à barragem e ao longo do contínuo fluvial. Os sedimentos dos reservatórios a montante apresentaram consistentemente concentrações de Hg mais elevadas do que as áreas a jusante, apoiando a hipótese de que os reservatórios funcionam como sumidouros de Hg. Esse padrão foi impulsionado principalmente pela dinâmica de sedimentação, em que partículas mais finas e ricas em silte+argila, com maior área de superfície e conteúdo orgânico, favoreceram a retenção de Hg em ambientes lênticos. Em contraste, as áreas a jusante, dominadas por sedimentos arenosos, apresentaram menor capacidade de retenção de Hg.
2. *Transferência solo-sedimento e dinâmica de mobilização de Hg* – Embora os solos atuem como a principal fonte de Hg para os sedimentos, a relação entre as concentrações de Hg nessas duas matrizes foi apenas marginalmente significativa. Isso sugere que fatores adicionais, como o enchimento do reservatório, erosão e flutuações hidrológicas sazonais, regulam a transferência de Hg. Além disso, apesar da expectativa de uma forte correlação entre Hg e teor de matéria orgânica, essa relação foi inconsistente ao longo do conjunto de dados, indicando que outras interações geoquímicas podem desempenhar um papel mais dominante no sequestro de Hg.
3. *Implicações para a biodisponibilidade e biomagnificação do Hg* – O comportamento contrastante do Hg nos compartimentos abióticos (solo/sedimento) e bióticos (peixes) reforça preocupações sobre seu impacto ecológico. Embora a acumulação de Hg tenha sido concentrada nos sedimentos a montante, estudos anteriores demonstraram que peixes a

jusante de reservatórios hidrelétricos apresentam concentrações mais elevadas de Hg, possivelmente devido à exportação de metilmercúrio por meio das descargas das turbinas. Isso destaca que os reservatórios hidrelétricos atuam não apenas como sumidouros de Hg, mas também como potenciais facilitadores da biodisponibilidade e biomagnificação do Hg, especialmente nos ecossistemas a jusante.

Os achados deste estudo contribuem para uma compreensão mais ampla do ciclo do Hg em reservatórios tropicais em cascata, uma área ainda pouco estudada. As tendências espaciais observadas ressaltam a necessidade de programas de monitoramento de longo prazo para avaliar o destino do Hg sob diferentes condições hidrológicas e operacionais. Pesquisas futuras devem focar em:

1. Investigar os mecanismos que impulsionam a metilação do Hg em ambientes de reservatórios, particularmente a influência da anóxia, composição da matéria orgânica e atividade microbiana.
2. Avaliar as variações sazonais e interanuais no transporte e deposição de Hg para melhor quantificar o impacto de longo prazo das barragens hidrelétricas na dinâmica do Hg.
3. Expandir a análise para incluir estudos de transferência trófica, examinando como a bioacumulação de Hg em peixes responde à heterogeneidade espacial na disponibilidade de Hg.

À medida que a expansão hidrelétrica continua na Amazônia e em outras regiões tropicais, uma compreensão mais profunda do ciclo do Hg em reservatórios em cascata é essencial para informar estratégias de gestão sustentável que mitiguem os riscos da contaminação por Hg nos ecossistemas aquáticos e nas populações humanas que dependem desses recursos.

Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (2025). Sistema de gerações de informações da ANEEL. Available on line at: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel/resource/11ec447d-698d-4ab8-977f-b424d5deee6a> (accessed february, 2025)

Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) (2012) Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Correlações: Revoga as Resoluções No 344 de 2004 e No 421.

Resoluções CONAMA No 454, de 01 de novembro de 2012 Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brazil (2012)

Crespo-Lopez, M. E., Augusto-Oliveira, M., Lopes-Araújo, A., Santos-Sacramento, L., Takeda, P. Y., de Matos Macchi, B., Nascimento, J. L. M., Maia, C. S. F., Lima, R. R., & Arrifano, G. P. (2021). Mercury: What can we learn from the Amazon?. *Environment international*, 146, 106223.

Fadini, P. S., & Jardim, W. F. (2001). Is the Negro River Basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury?. *Science of the Total Environment*, 275(1-3), 71-82.

Fearnside, P. M. (2019). *Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras*, v. 3. Manaus: Editora INPA.

Gomes, P. R., Pestana, I. A., de Almeida, M. G., de Oliveira, B. C. V., & de Rezende, C. E. (2022). Effects of illegal gold mining on Hg concentrations in water, *Pistia stratiotes*, suspended particulate matter, and bottom sediments of two impacted rivers (Paraíba do Sul River and Muriaé River), Southeastern, Brazil. *Environmental monitoring and assessment*, 194(11), 797.

Guimaraes, J. R. (2020). Mercury in the Amazon: Problem or opportunity? A commentary on 30 years of research on the subject. *Elem Sci Anth*, 8(1), 032.

Hacon, S., Artaxo, P., Gerab, F., Yamasoe, M. A., Campos, R. C., Conti, L. F., & De Lacerda, L. D. (1995). Atmospheric mercury and trace elements in the region of Alta Floresta in the Amazon basin. *Water, Air, and Soil Pollution*, 80, 273-283.

Hacon, S., Barrocas, P. R., Vasconcellos, A. C. S., Barcellos, C., Wasserman, J. C., Campos, R. C., Ribeiro, C., & Azevedo-Carlioni, F. B. (2008). An overview of mercury contamination research in the Amazon basin with an emphasis on Brazil. *Cadernos de Saúde Pública*, 24, 1479-1492.

Hsu-Kim, H., Kucharzyk, K. H., Zhang, T., & Deshusses, M. A. (2013). Mechanisms regulating mercury bioavailability for methylating microorganisms in the aquatic environment: a critical review. *Environmental science & technology*, 47(6), 2441-2456.

Hylander, L. D., Gröhn, J., Tropp, M., Vikström, A., Wolpher, H., e Silva, E. C., Meili, M., & Oliveira, L. J. (2006). Fish Mercury in Lago Manso, new hydroelectric reservoir in tropical Brazil. *Journal of environmental management*, 81(2), 155-166.

ICMBio (2011) *Plano de manejo do Parque Nacional do Juruena*. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Brasília.

Kasper, D., Palermo, E. F. A., Branco, C. W. C., & Malm, O. (2012). Evidence of elevated mercury levels in carnivorous and omnivorous fishes downstream from an Amazon reservoir. *Hydrobiologia*, 694, 87-98.

Kasper, D., Forsberg, B. R., Amaral, J. H., Leitão, R. P., Py-Daniel, S. S., Bastos, W. R., & Malm, O. (2014). Reservoir stratification affects methylmercury levels in river water, plankton, and fish downstream from Balbina hydroelectric dam, Amazonas, Brazil. *Environmental Science & Technology*, 48(2), 1032-1040.

- Kasper, D., Forsberg, B. R., Amaral, J. H., Py-Daniel, S. S., Bastos, W. R., & Malm, O. (2017). Methylmercury modulation in Amazon rivers linked to basin characteristics and seasonal flood-pulse. *Environmental science & technology*, 51(24), 14182-14191.
- Lacerda, L. D., de Souza, M., & Ribeiro, M. G. (2004). The effects of land use change on mercury distribution in soils of Alta Floresta, Southern Amazon. *Environmental pollution*, 129(2), 247-255.
- Lázaro, W. L., Díez, S., da Silva, C. J., Ignácio, Á. R., & Guimarães, J. R. (2016). Waterscape determinants of net mercury methylation in a tropical wetland. *Environmental Research*, 150, 438-445.
- Lino, A. S., Kasper, D., Guida, Y. S., Thomaz, J. R., & Malm, O. (2019). Total and methyl mercury distribution in water, sediment, plankton and fish along the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Chemosphere*, 235, 690-700.
- Ma, H., Chen, Y., Chen, Q., Liu, D., Zhang, J., & Tonina, D. (2022). Dam cascade unveils sediment methylmercury dynamics in reservoirs. *Water Research*, 212, 118059.
- Mainville, N., Webb, J., Lucotte, M., Davidson, R., Betancourt, O., Cueva, E., & Mergler, D. (2006). Decrease of soil fertility and release of mercury following deforestation in the Andean Amazon, Napo River Valley, Ecuador. *Science of the Total Environment*, 368(1), 88-98.
- Mato Grosso (2004). Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral – SEPLAN, 2004. *Zoneamento socioeconômico-ecológico do Estado de Mato Grosso: relatório técnico e projeto de lei*. Cuiabá: SEPLAN/BIR D/PRODEAGRO.
- Maury-Brachet, R., Dassié, É. P., Legeay, A., Gonzalez, P., Feurtet-Mazel, A., Gourand, F., ... & Vigouroux, R. (2024). Influence of a hydroelectric dam on fish mercury contamination along the Sinnamary River (French Guiana). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115771.
- Miretzky, P., Bisinoti, M. C., & Jardim, W. F. (2005). Sorption of mercury (II) in Amazon soils from column studies. *Chemosphere*, 60(11), 1583-1589.
- Miserendino, R.A, Guimarães, J. R. D., Schudel, G., Ghosh, S., Godoy, J. M., Silbergeld, E. K., Less, P. S., & Bergquist, B. A. (2017). Mercury pollution in Amapá, Brazil: mercury amalgamation in artisanal and small-scale gold mining or land-cover and land-use changes?. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2(5), 441-450.
- Moreno-Brush, M., Rydberg, J., Gamboa, N., Storch, I., & Biester, H. (2016). Is mercury from small-scale gold mining prevalent in the southeastern Peruvian Amazon? *Environmental Pollution*, 218, 150–159
- Oliveira, C. A. S, Kasper, D., Sargentini Junior, E., Bolson, M. A., Torrezani, L., & Zara, L. F. (2021). Influence of environmental conditions on the mercury levels of the sediment along the Balbina Reservoir, Brazilian Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1), 50.

Oliveira, E., Ignácio, A. R. A., Lázaro, W. L., Díez, S., Guimarães, J. R. D., & Santos-Filho, M. (2023). Green kingfishers as sentinel species for mercury contamination in Amazon. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 85(1), 34-45.

Oliveira, E., Kasper, D., da Silva, S. A. A., Lázaro, W. L., Muniz, C. C., Carvalho, G. S., ... & Ignácio, Á. R. A. (2025). Cascade reservoirs affect mercury concentrations in fish from Teles Pires river, Brazilian Amazon. *Ecotoxicology*, 1-12.

Paiva, T. C., Pestana, I. A., de Oliveira, B. C. V., Malm, O., de Rezende, C. E., & Kasper, D. (2024a). Temporal variation of mercury levels in fish, soil, and sediments in an Amazon reservoir: insights from 35 years of river impoundment in Pará State, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1089.

Paiva, T.C., Pestana, I. A., Oliveira, B. C. V., Almeida, M. G., Malm, O., Rezende, C. E., & Kasper, D. (2024b). Mercury concentrations and differences in isotopic niches of fish from upstream and downstream of an Amazon reservoir dam. *Ecotoxicology*, 33(7), 762-771.

Palermo, E. F. A., Kasper D, Reis T. S., Nogueira, S., Branco, C. W. C., & Malm, O. (2004) Mercury level increase in fish tissues downstream the Tucuruí reservoir, Brazil. *Rmz Mat Geoenviro* 51:1292–1294.

Pereira, C.F. R. Monitoramento das Hidreletricas na Bacia do Juruena. Programa de Direitos Indigenas, Política Indiginista e Informação a Sociedade. Operação Amazônia Nativa, 2023.

Pestana, I. A., Bastos, W. R., Almeida, M. G., de Carvalho, D. P., Rezende, C. E., & Souza, C. M. M. (2016). Spatial-temporal dynamics and sources of total Hg in a hydroelectric reservoir in the Western Amazon, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 9640-9648.

Pestana, I. A., Azevedo, L. S., Bastos, W. R., & de Souza, C. M. M. (2019). The impact of hydroelectric dams on mercury dynamics in South America: A review. *Chemosphere*, 219, 546-556.

Pestana, I. A., de Rezende, C. E., Almeida, R., de Lacerda, L. D., & Bastos, W. R. (2022). Let's talk about mercury contamination in the Amazon (again): The case of the floating gold miners' village on the Madeira River. *The Extractive Industries and Society*, 11, 101122.

Roulet, M., Lucotte, M., Saint-Aubin, A., Tran, S., Rheault, I., Farella, N., da Silva, E. J., Dezencourt, J., Souza-Passos, C.-J., Santos Soares, G., Guimarães, J.-R., D., & Amorim, M. (1998). The geochemistry of mercury in central Amazonian soils developed on the Alter-do-Chao formation of the lower Tapajos River Valley, Para state, Brazil. *Science of the Total Environment*, 223(1), 1-24.

Sahoo, P. K., Dall'Agnol, R., Deus, S. C. S. R., Salomão, G. R., Guimarães, J. T. F., Angelica, R. S., Ramos, S. J., Costa, M. F. & de Siqueira, J. O. (2023). Mercury in multimedia system of Itacaiúnas Basin, Brazilian Amazon: An integrated approach to understand its distribution, origin, and ecological risk. *Environmental Research*, 232, 115107.

Schütze, M., Gatz, P., Gilfedder, B. S., & Biester, H. (2021). Why productive lakes are larger mercury sedimentary sinks than oligotrophic brown water lakes. *Limnology and Oceanography*, 66(4), 1316-1332.

Soares, L. C., Linhares, L. A., Egreja Filho, F. B., Windmoller, C. C., & Yoshida, M. I. (2015). Mercúrio em solos da região sudeste do Brasil sem influência antropogênica e sua correlação com as características químicas e físicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 903-914.

Telmer, K., Costa, M., Angélica, R. S., Araujo, E. S., & Maurice, Y. (2006). The source and fate of sediment and mercury in the Tapajós River, Pará, Brazilian Amazon: Ground-and space-based evidence. *Journal of environmental management*, 81(2), 101-113.

Wang, Y., Gu, B., Lee, M. K., Jiang, S., & Xu, Y. (2014). Isotopic evidence for anthropogenic impacts on aquatic food web dynamics and mercury cycling in a subtropical wetland ecosystem in the US. *Science of the total environment*, 487, 557-564.

Wasserman, J. C., Hacon, S., & Wasserman, M. A. (2003). Biogeochemistry of mercury in the Amazonian environment. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 32(5), 336-342.

Willacker, J. J., Eagles-Smith, C. A., Chandler, J. A., Naymik, J., Myers, R., & Krabbenhoft, D. P. (2023). Reservoir Stratification Modulates the Influence of Impoundments on Fish Mercury Concentrations along an Arid Land River System. *Environmental Science & Technology*, 57(50), 21313-21326.

Yang, L., Zhang, W., Ren, M., Cao, F., Chen, F., Zhang, Y., & Shang, L. (2020). Mercury distribution in a typical shallow lake in northern China and its re-emission from sediment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 192, 110316.

Zhao, L., Guo, Y., Meng, B., Yao, H., & Feng, X. (2017). Effects of damming on the distribution and methylation of mercury in Wujiang River, Southwest China. *Chemosphere*, 185, 780-788.

Material Suplementar**Dinâmica do mercúrio em sedimentos e solos de reservatórios hidrelétricos
em cascata ao longo de um rio amazônico****Mercury Dynamics in Sediments and Soils of Cascade Hydroelectric
Reservoirs along an Amazonian River**

Edvagner Oliveira^a; Daniele Kasper^b; Solange Aparecida Arrolho da Silva^c, Wilkinson
Lopes Lázaro^d, Manoel Diego Santos Hurtado^e; Eduarda da Silva Vieira^e, Gabriela
Vitória Leite da Silva^e; Thays Emmanuely O. Crispin^f; Áurea Regina Alves Ignácio^a

5 páginas, 4 figuras

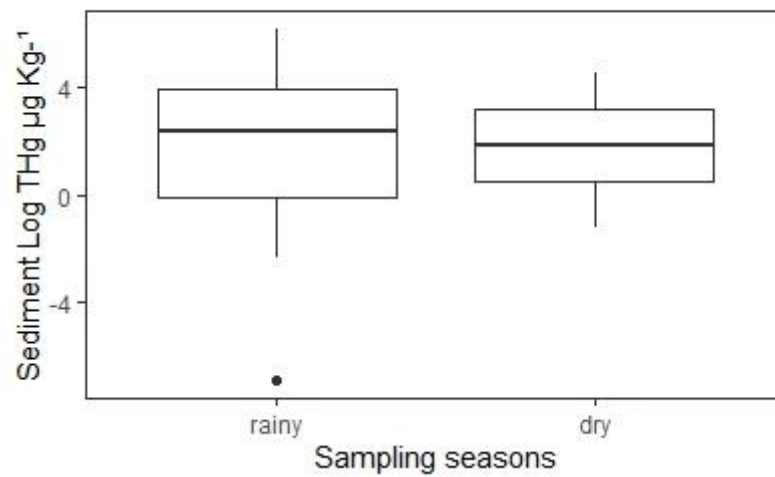


Fig. S1. Concentração de mercúrio total (THg) em sedimentos do rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle) e rio Juruena (ponto controle) na bacia Amazônica. Amostras coletadas durante period seco e chuvoso. Ponto preto indica outlier.

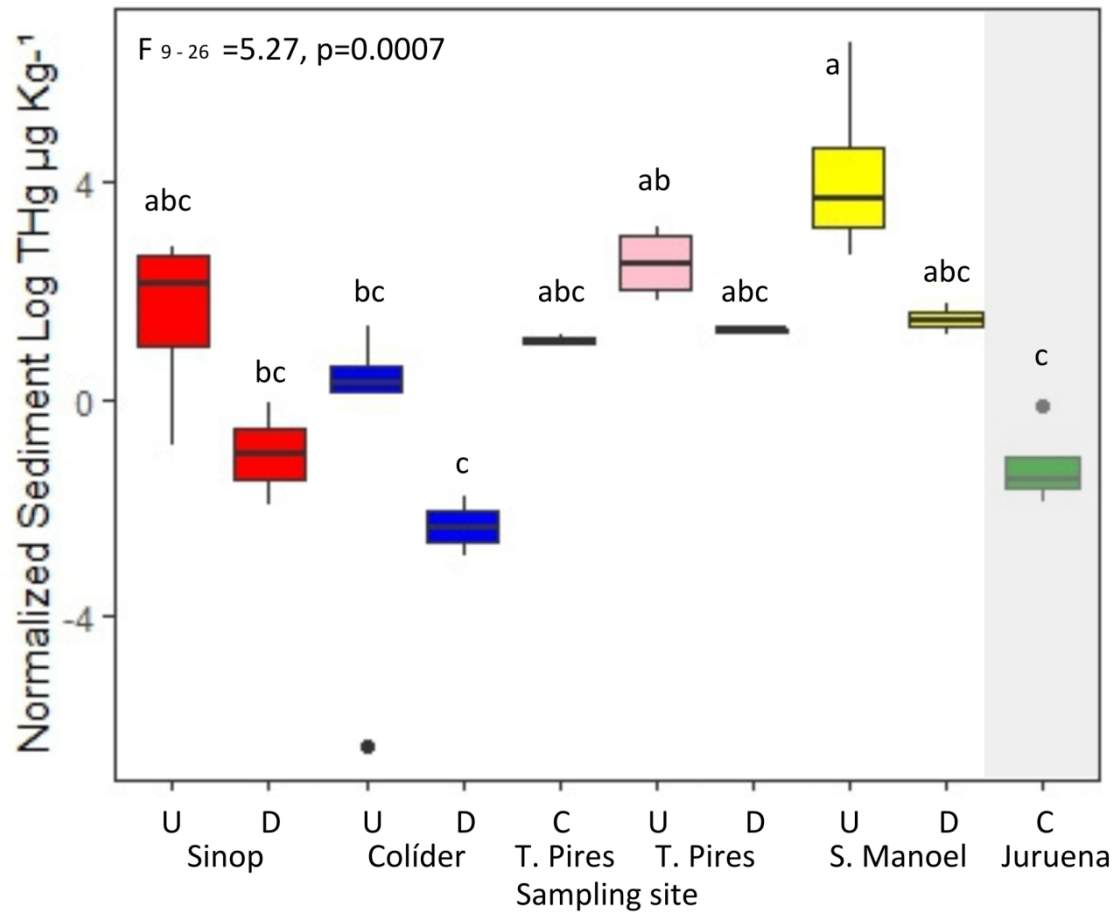


Fig. S2. Concentração de mercúrio total (THg) normalizada pelo teor de silte+argila em sedimentos de fundo coletados no Rio Teles Pires (usinas hidrelétricas em cascata e pontos controle) e do Rio Juruena (pontos de controle sem barragens) na Bacia Amazônica. Letras diferentes acima do boxplot indicam diferenças estatísticas (teste de Tukey). Os pontos pretos representam outliers. As letras no eixo X significam U: montante da barragem, D: jusante da barragem, C: controle e T. Pires: Teles Pires.

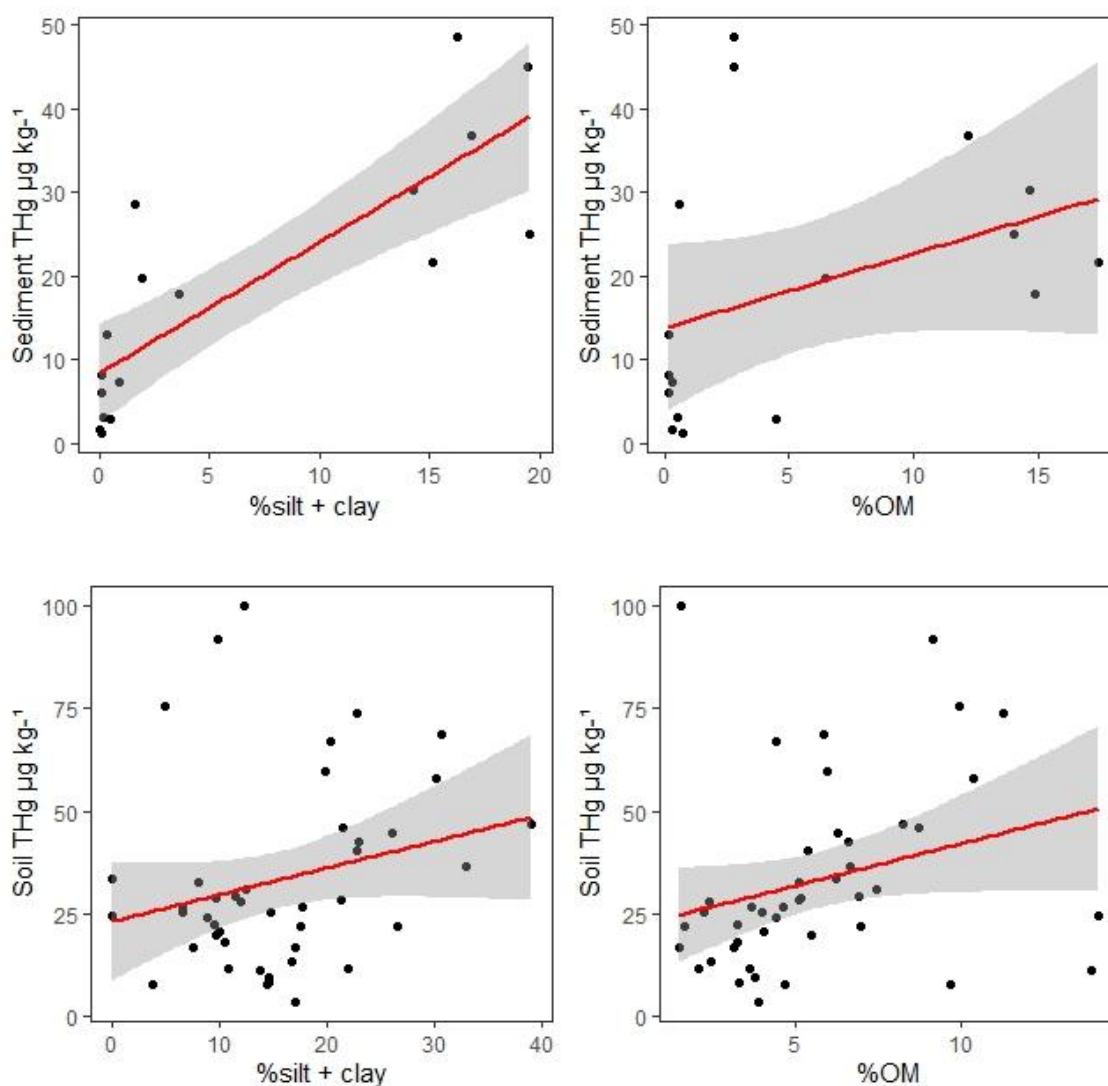


Fig. S3. Concentração de mercúrio total (THg) em sedimentos de fundo e solos pelo percentual de silte+argila e material orgânica (OM) coletados no rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle) e rio Juruena (ponto controle sem barragem) na bacia amazônica.

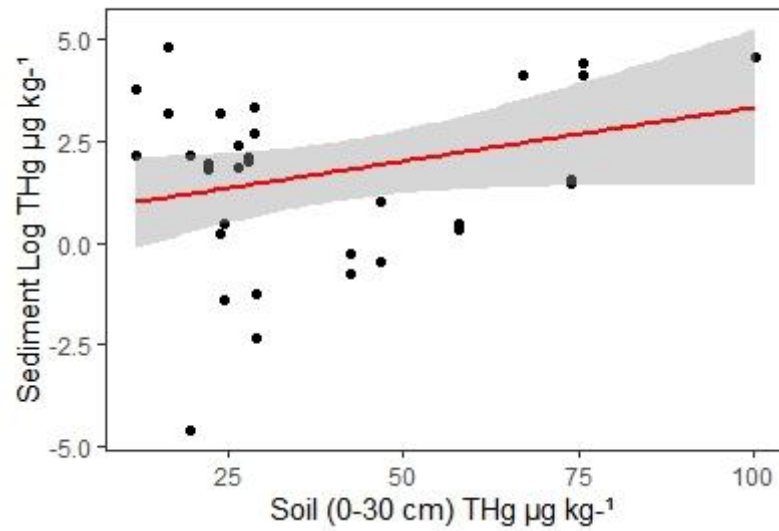


Fig. S4. Relação da oncentração de mercúrio total (THg) em sediment e solo (0-30 cm) coletados no rio Teles Pires (reservatórios hidrelétricos em cascata e ponto controle) e rio Juruena (ponto controle) na bacia amazônica.

ARTIGO 3

Aumento de Mercúrio em seston a jusante de reservatórios hidrelétricos em cascata na Amazônia

Mercury in seston increases downstream along cascade hydroelectric reservoirs in the Amazon

Edvagner Oliveira^a; Daniele Kasper^b; Solange Arrolho da Silva^c, Juliano André Bogoni^a;... & Áurea Regina Alves Ignácio^a

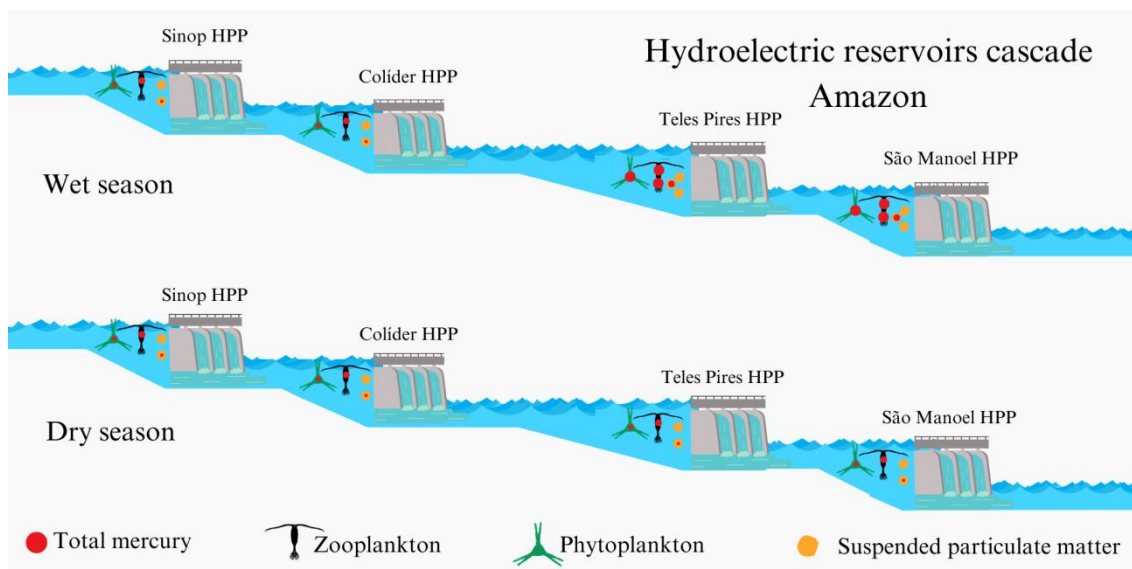
^aPrograma de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Estudos em Limnologia, Biodiversidade e Etnobiologia do Pantanal, Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, Mato Grosso Brazil

^bInstituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

^cPrograma de Mestrado profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ANA/UNEMAT), Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta, Mato Grosso, Brazil

[Preparado de acordo com as normas de publicação da revista Archives of Environmental Contamination and Toxicology (Print ISSN: 0090-4341. Online ISSN: 1432-0703). Fator de impacto 3.3. Situação da submissão: em elaboração.

Graphical abstract



Resumo

O mercúrio (Hg) está entre os principais poluentes que afetam os ecossistemas. Reservatórios hidrelétricos contribuem para a bioacumulação de Hg em diferentes organismos aquáticos, sendo comum a observação de maiores concentrações é observadas a jusante das barragens. Neste estudo, investigamos a dinâmica do mercúrio total em diferentes compartimentos bióticos e abióticos em quatro reservatórios em cascata na Amazônia brasileira. Foram amostrados material particulado em suspensão (SPM), fitoplâncton e zooplâncton nos reservatórios e imediatamente a jusante, em dois períodos pluviométricos (seco e chuvoso), em 2022 e 2023. As concentrações de Hg seguiram a ordem $SPM < \text{fitoplâncton} < \text{zooplâncton}$, que sugere a biomagnificação do Hg nos locais amostrados. Os três compartimentos apresentaram concentrações 1.6 a 2.5 vezes mais altas no período chuvoso. Nesse período, observou-se amplificação das concentrações de Hg em todos os compartimentos apresentaram amplificação ao longo dos reservatórios hidrelétricos, de montante a jusante: UHE Sinop < UHE Colíder < UHE Teles Pires < UHE São Manoel, sugerindo um efeito cumulativo. Ao contrário, durante a estação seca, não foram observadas diferenças espaciais significativas. Os resultados reforçam a necessidade de aprimoramento na legislação ambiental de sistemas em cascata, com especial atenção às concentrações de Hg nos reservatórios mais a jusante no sistema, que podem representar maior risco ambiental.

Palavras-chave: Mercúrio total, Plâncton, Material Particulado em Suspensão, rio Teles Pires, biomagnificação

Abstract

Mercury (Hg) is among the major pollutants affecting ecosystems. Hydroelectric reservoirs contribute to Hg bioaccumulation in different aquatic organisms, with the highest concentrations generally observed downstream of dams. We investigated the dynamics of total mercury in different biotic and abiotic compartments across four cascade reservoirs in the Brazilian Amazon. Suspended particulate matter (SPM), phytoplankton, and zooplankton were sampled within the reservoirs and immediately downstream during two hydrological periods in 2022 and 2023. Hg concentrations followed the pattern $SPM < \text{phytoplankton} < \text{zooplankton}$, suggesting Hg biomagnification at the sampled sites. All three compartments exhibited concentrations 1.6 to 2.5 times higher during the rainy season. In this period, Hg concentrations in all compartments increased along the cascade of hydroelectric reservoirs from upstream to downstream: Sinop HPP < Colíder HPP < Teles Pires HPP < São Manoel HPP, suggesting a cumulative effect. Conversely, during the dry season, concentrations did not differ spatially. Therefore, it is suggested that river management in cascade reservoir systems should be particularly cautious regarding concentrations in the downstream reservoirs.

Keywords: Total mercury, plankton, suspended particulate matter, Teles Pires River, biomagnification.

Introdução

O mercúrio (Hg) está entre os poluentes ambientais mais preocupantes para a biota e para a saúde humana, ocasionando efeitos deletérios nas populações e comunidades de diferentes ecossistemas do globo (Burger et al., 2015; WHO, 2024). Na Amazônia, as principais fontes de Hg são naturais, com solos que apresentam estoques principalmente ligados a oxi-hidróxidos de alumínio e ferro presentes em sua composição (Roulet et al., 1998). Fontes antropogênicas estão principalmente relacionadas à mineração de pequena escala, localmente conhecida como “garimpos”, onde o Hg é utilizado para a amalgamação e purificação do ouro

(Guimarães, 2020; Pestana et al., 2022), bem como ao desmatamento e às queimadas (Crespo-Lopes et al., 2021). O ciclo do Hg pode ainda ser modificado, tornando o Hg mais biodisponível, devido à construção de grandes hidrelétricas (Forsberg et al., 2017), impacto que vem se tornando cada vez mais frequente na região amazônia dada a necessidade crescente por energia e o não investimento em fontes alternativas.

Os reservatórios hidrelétricos transformam o ambiente hídrico lótico em lântico ou semilótico e, conseqüentemente, podem alterar as condições limnológicas (Canavan et al., 2000). Dentre as alterações, estão a estratificação térmica em locais de grande profundidade, a redução do oxigênio dissolvido e pH na coluna d'água (Kasper et al., 2014). Esses e outros fatores limnológicos podem estar associados à disponibilidade de Hg para a biota aquática como, por exemplo, para os organismos planctônicos em reservatórios (Nascimento et al., 2020).

Os organismos na base dos elos tróficos aquáticos podem se contaminar de diferentes formas, como por meio da adsorção e/ou absorção nos organismos fitoplanctônicos ou via dieta para o zooplâncton (Fisher and Hook, 2002). Com a entrada na cadeia trófica, o Hg torna-se biodisponível para os elos tróficos superiores, ocasionando a amplificação do Hg nesses níveis, em um processo denominado biomagnificação (Marshall et al., 2016).

Além do plâncton, o material particulado em suspensão é um carreador de Hg nos corpos hídricos pois o Hg pode ficar adsorvido às partículas que são carregadas à jusante seguindo o fluxo dos rios. Isso pode deslocar a contaminação pelo elemento que ocorreu em algum ponto da bacia hidrográfica para jusante, contaminando áreas que não tinham sido impactadas (Lino et al., 2019). Nos reservatórios hidrelétricos, principalmente na fase lacustre, onde o ambiente tende a ser lântico e profundo, a diminuição do fluxo hídrico favorece a deposição das partículas, que passam a compor os sedimentos (Lino et al., 2019). O sedimento de fundo, portanto, pode atuar como sumidouro de Hg, sendo um dos locais onde pode ocorrer o processo de metilação do Hg, que posteriormente é disponibilizado para a biota (Vieira et al., 2018).

A contaminação por Hg já foi avaliada no plâncton e material particulado em suspensão de diversos reservatórios hidrelétricos na Amazônia como, por exemplo, em Samuel (Kasper et al., 2012), Balbina (Kasper et al., 2014), Tucuruí (Paiva et al., 2024), Petit Saut (Maury-Brachet et al., 2024). Observou-se que há uma dinâmica

espacial no Hg do seston ao longo do reservatório graças à transformação de um sistema lótico para lêntico em direção à barragem (Pestana et al., 2019a; Oliveira et al., 2021), assim como uma transferência do Hg associado ao seston para jusante desta (Kasper et al., 2012, 2014). No entanto, apesar da Amazônia possuir uma série de reservatórios hidrelétricos de grande porte e de ter um extenso planejamento para construção de novos empreendimentos, pouco se sabe acerca de efeitos de uma série de duas ou mais barragens em um mesmo trecho de rio (chamada de reservatórios em cascata). Estudos de Oliveira et al. (2025) demonstraram que as concentrações de Hg em peixes predadores aumentam ao longo do rio, sendo maiores nos reservatórios mais à jusante. Apesar do conhecimento deste padrão no pescado, pouco se sabe acerca da dinâmica no seston, uma matriz que é mais dinâmica no tempo e que pode trazer informações importantes acerca da variabilidade temporal deste padrão ao longo da cascata.

Este estudo teve o objetivo de investigar as concentrações de mercúrio total (THg) em plâncton e material particulado em suspensão em barragens hidrelétricas em cascata no rio Teles Pires, na Amazônia brasileira, em dois períodos pluviométricos. Com isso, hipotetizamos que: 1) as concentrações de THg aumentam ao longo do gradiente longitudinal dos reservatórios em cascata, de montante para jusante do rio, em ambos os períodos sazonais; 2) que os compartimentos apresentariam concentrações crescentes de THg na ordem de magnitude $SPM < \text{fitoplâncton} < \text{zooplâncton}$, evidenciando o processo de biomagnificação.

Materiais e métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido ao longo de aproximadamente 485 km do rio Teles Pires, abrangendo uma área onde estão localizadas quatro usinas hidrelétricas (UHE), e em uma área de aproximadamente 50 km no rio Juruena, em uma região sem barragens (Figura 1). Os rios Teles Pires e Juruena são afluentes importantes da bacia hidrográfica do Tapajós, situada ao norte do Estado de Mato Grosso, na Amazônia Meridional, uma região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia (Oliveira et al. 2025). Os períodos estacionais são bem marcantes na região, com índices pluviométricos de aproximadamente 1400 mm no período chuvoso e 200 mm no período de seca (Inmet, 2025).

O rio Teles Pires possui uma extensão de 1.370 km e, no trecho analisado, foram construídas quatro UHEs: Sinop (461 MW, com enchimento e operação iniciados em 2019), Colíder (342 MW, enchimento em 2017, operação desde 2019), Teles Pires (1.820 MW, enchimento em 2014, operação desde 2015) e São Manoel (746 MW, enchimento em 2017, operação desde 2018). As áreas inundadas pelos reservatórios dessas usinas são de 330 km² para a UHE Sinop, 172 km² para a UHE Colíder, 152 km² para a UHE Teles Pires e 53 km² para a UHE São Manoel (Fearnside, 2019). A região foi um importante centro de garimpo de ouro nas décadas de 1980 e 1990, período durante o qual houve intenso lançamento de Hg na atmosfera (Hacon et al., 1995). Atualmente, a área é uma das principais regiões produtoras de grãos, como soja e milho, e se destaca pelas atividades de pecuária e extração de madeira (Mato Grosso, 2004). Durante as coletas de amostras, foram observadas cinco balsas em atividade de garimpo no reservatório da UHE Teles Pires e onze na UHE São Manoel. Nesta última, também foram avistadas balsas inutilizadas à jusante da barragem do reservatório.

O rio Juruena, com aproximadamente 1.080 km de extensão, é caracterizado por numerosos meandros ao longo de seu curso e um complexo de ilhas (ICMBio, 2011), sendo margeado por mata ciliar com árvores de grande porte em todo o trecho amostrado (Oliveira et al. 2023). A ocupação do solo na região é dominada por extensas áreas dedicadas à pecuária, à produção de grãos e cana-de-açúcar, além da indústria madeireira (ICMBio, 2011). No trecho amostrado, não há barragens hidrelétricas, porém, em 2023, foram registrados 179 aproveitamentos hidrelétricos de diferentes modalidades (CGH, PCH e UHE) (Pereira, 2023). Duas usinas hidrelétricas (UHEs) estão em construção (Aneel, 2025) localizadas aproximadamente 500 km a montante do local de amostragem. O trecho utilizado como ponto controle o rio Juruena não possui reservatórios próximos.

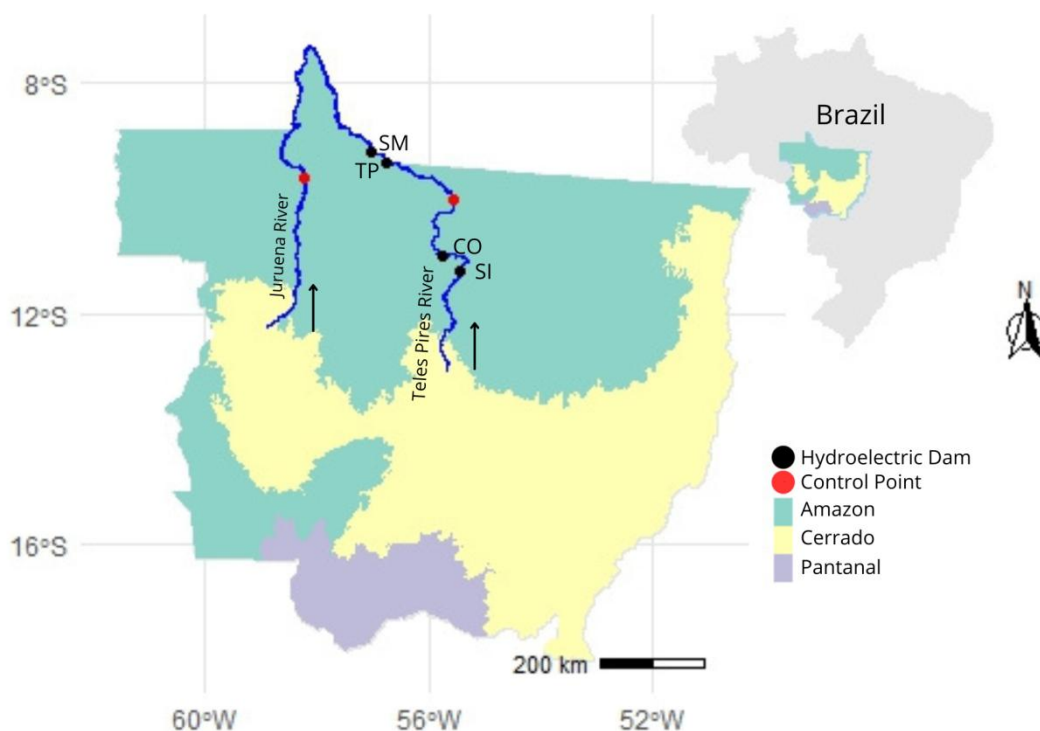


Fig. 1. Locais de amostragem na Bacia Amazônica, Brasil. Usinas Hidrelétricas no Rio Teles Pires: SI: Sinop, CO: Colíder, TP: Teles Pires, SM: São Manoel. Seta indica o fluxo do rio.

Amostragem

Em cada uma das quatro usinas hidrelétricas do rio Teles Pires, as amostras foram coletadas em três pontos do reservatório (1: na transição entre o rio e a zona alagada do reservatório, 2: na porção intermediária do corpo dos reservatórios, 3: na região lacustre próximo a barragem) e um ponto a jusante da barragem. No mesmo rio, ainda foram coletadas amostras em um trecho sem hidrelétricas entre as UHE Colíder e Teles Pires denominado Ponto Controle. No rio Jurueña, as amostras foram coletadas em dois pontos distantes 50 km um do outro, e foram considerados aqui como um único pool amostral representando o ponto controle do rio Jurueña. Em todos os pontos amostrais foram coletados fitoplâncton, zooplâncton e material particulado em suspensão. Essas coletas ocorreram em agosto/2022, considerada estação seca, e abril/2023, considerada estação chuvosa.

O fitoplâncton e o zooplâncton foram coletados, respectivamente, com auxílio de redes cônicas de plâncton de 20 e 68 μ m. Não houve separação e identificação taxonômica das espécies. Como a classificação foi realizada com base no tamanho

da malha, é provável que algumas algas tenham sido incluídas na amostra de zooplâncton, e que alguns organismos do zooplâncton tenham sido incluídos na amostra de fitoplâncton. Tal abordagem é comumente utilizada em estudos acerca da contaminação por Hg em plâncton na Amazônia (e.g. Kasper et al. 2012, Brito et al. 2016, Lino et al. 2020). Em cada ponto, as redes foram lançadas abaixo da superfície d'água e com o auxílio de um barco motorizado foram arrastadas horizontalmente a uma velocidade de 4,5 km/h por 5 minutos. O procedimento de amostragem ocorreu duas vezes em cada ponto amostral. As amostras foram colocadas em frascos de politereftalato de etileno, previamente lavados água ultra-pura acidificada com HCl ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e enxaguada com água ultrapura, e armazenadas em local refrigerado. As amostras de fitoplâncton e zooplâncton foram filtradas em filtro de celulose (Química Moderna) de $8 \mu\text{m}$ e $20\text{-}25 \mu\text{m}$ de porosidade, respectivamente. Os filtros foram secos em estufa a $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

A coleta de material particulado em suspensão (SPM) e a mensuração dos parâmetros físicos e químicos da água (pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e temperatura) ocorreram concomitantemente às amostragens de plâncton. A coleta foi realizada na superfície e a cada 5 m de profundidade com uma garrafa de van Dorn para mensuração dos parâmetros físicos e químicos com sonda multiparâmetros Asko e para obtenção de amostras de água para a mensuração do SPM. A água coletada para esta última variável foi armazenada em garrafa de politereftalato de etileno, previamente limpa com água ultrapura acidificada com HCl ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e enxaguada com água ultrapura, e imediatamente resfriada. Estas foram filtradas em filtro de celulose (Química Moderna) de $2 \mu\text{m}$ de porosidade, que foram secos em estufa a $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

Análise de THg

Os filtros de plâncton e SPM foram acondicionados e pesados diretamente em barcas de níquel para a quantificação do Hg. Todas as análises foram realizadas em duplicata utilizando o analisador direto de mercúrio (Direct Mercury Analyzer, DMA-80, Milestone). O método operacional adotado incluiu aquecimento inicial a $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, seguido de aquecimento a $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 2 minutos e queima a $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 1 minuto. Os vapores de Hg gerados foram direcionados para um catalisador contendo um amálgama de ouro que retém Hg, após aquecimento a célula de amalgamação liberou vapor de Hg, e o fluxo de oxigênio o transporta para uma célula de absorção

para quantificação. Amostras brancas foram analisados a cada 40 análises, resultando em valores de $0,0001 \mu\text{g kg}^{-1}$. A curva de calibração foi gerada a partir de uma solução padrão de Hg a 1000 mg L^{-1} , utilizando dez pontos de referência em duas faixas de concentração: de 2 a 10 ng Hg e de 10 a 100 ng Hg. O valor mínimo detectado foi de $1.1 \mu\text{g kg}^{-1}$. O limite de detecção foi de $0.01 \mu\text{g kg}^{-1}$.

Material certificado de referência DORM-3 (proteína de peixe, Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá) foi analisado para checar a exatidão do método analítico empregado. A concentração de THg no DORM-3 foi $420 \pm 58,8 \mu\text{g kg}^{-1}$ ($n = 4$), em conformidade com o valor certificado de $382 \pm 60 \mu\text{g kg}^{-1}$. O coeficiente de variação entre as duplicatas foi $8.6 \pm 16.9 \%$ para fitoplâncton, $11.8 \pm 7.5\%$ para zooplâncton e $9 \pm 9.5 \%$ para SPM.

Todas as análises foram conduzidas no Laboratório de Ecotoxicologia do Centro de Pesquisa de Limnologia, Biodiversidade e Etnobiologia do Pantanal, na Universidade do Estado de Mato Grosso.

Análise de dados

A Anova com dois fatores foi utilizada para verificar diferenças sazonais e espaciais (entre reservatórios) nas concentrações de THg do SPM (somente superficial), fitoplâncton e zooplâncton. Não foram utilizados os pontos controles nesta análise. A Anova com dois fatores também foi utilizada para avaliar as diferenças sazonais e espaciais (entre reservatórios) nas concentrações de THg no SPM das diferentes profundidades dos ambientes lacustres dos reservatórios. Nestas mesmas amostras, utilizamos o modelo linear generalizado (GLM) para verificar a relação entre as concentrações de THg no SPM e as variáveis limnológicas, o local de coleta, o período e a profundidade de amostragem no ambiente lacustre.

Utilizamos a Anova com dois fatores para verificar a existência de diferenças nas concentrações de THg espaciais (entre reservatórios) e de compartimento analisado (SPM somente da água superficial, fitoplâncton e zooplâncton). O teste T foi utilizado para comparar as diferenças nas concentrações de THg entre os dois períodos sazonais amostrados (SPM utilizado aqui refere-se a todas as profundidades amostradas). A suposição de normalidade dos resíduos foi testada em todos os tratamentos usando o teste de Kolmogorov-Smirnov. Todas as análises estatísticas foram conduzidas a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

Para analisar as possíveis relações de causa e efeito entre as concentrações de THg nos diferentes compartimentos, as variáveis limnológicas e os locais de amostragem, utilizamos modelagem de equações estruturais, pacote *lavaan*, R 4.3.1 (SEM). Todas as análises de dados foram realizadas utilizando o R 4.3.1.

Resultados

As concentrações de THg nas amostras superficiais do SPM variaram sazonalmente ($F_{3, 22} = 5.04$, $p=0.002$) e espacialmente ($F_{1, 22} = 51.69$, $p<0.001$), mas a interação entre ambas não foi significativa ($F_{3, 22} = 2.5$, $p = 0.087$, Fig. 2). Já as concentrações no SPM das diferentes profundidades coletadas apenas na região lacustre dos reservatórios tiveram uma interação estatisticamente significativa entre a sazonalidade e a espacialidade (diferentes reservatórios) ($F_{3, 31} = 4.00$, $p = 0.0162$, Fig. 3). Nestas amostras de SPM das diferentes profundidades do ambiente lacustre dos reservatórios (Fig. S1), a concentração de THg foi influenciada negativamente pelo pH ($p = 0.0013$) e temperatura ($p = 0.0514$), e positivamente por DO ($p = 0.0013$), enquanto os demais parâmetros não apresentaram efeito significativo (profundidade: $p=0.09$, condutividade: $p = 0.51$).

As concentrações de THg no fitoplâncton não variaram espacialmente ($F_{3, 22} = 0.42$, $p = 0.7$), mas apresentaram diferença sazonal ($F_{1, 22} = 4.1$, $p = 0.05$) e a interação entre estas duas variáveis não foi significativa ($F_{3, 22} = 0.98$, $p = 0.42$, Fig. 3). Para zooplâncton, observou-se padrão semelhante. As concentrações de THg não foram espacialmente diferentes ($F_{3, 21} = 1.77$, $p = 0.18$), mas houve variação sazonal ($F_{1, 21} = 11.85$, $p = 0.0025$) e a interação entre estas variáveis também foi significativa ($F_{3, 21} = 0.73$, $p = 0.54$, Fig. 3).

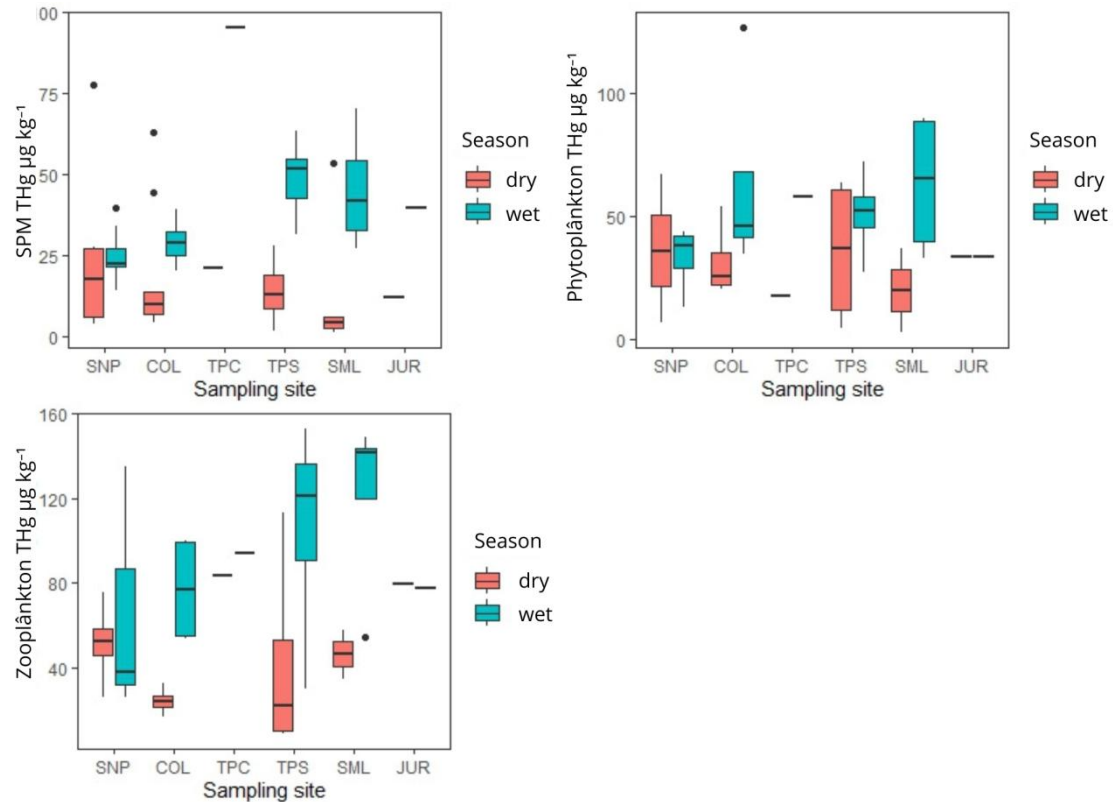


Fig. 2. Concentração de mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão de amostras superficiais (SPM), fitoplâncton e zooplâncton em reservatórios hidrelétricos na Amazônia Meridional nos períodos pluviométricos seco (dry) e chuvoso (wet). Usinas Hidrelétricas de SNP: Sinop, COL: Colíder, TPS: Teles Pires, SML: São Manoel. Pontos pretos indicam outliers.

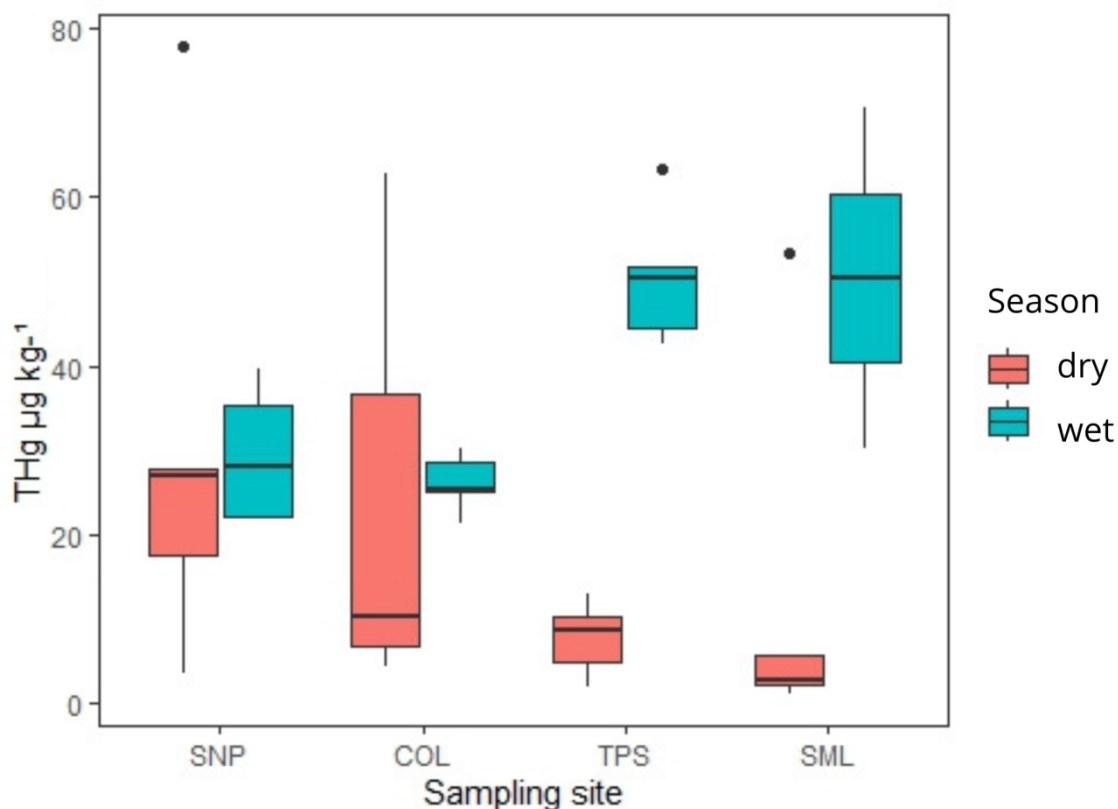


Fig. 3. Concentração de mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão (SPM) da região lacustre de reservatórios hidrelétricos na Amazônia Meridional nos períodos pluviométricos seco (dry) e chuvoso (wet). Pontos pretos indicam outliers.

Alguns parâmetros físicos e químicos da água influenciaram a concentração de THg nos compartimentos avaliados aqui. As concentrações no SPM foram correlacionadas negativamente pelo pH da água ($p = 0.006$) e positivamente pela condutividade elétrica ($p = 0.015$) e oxigênio dissolvido ($p = 0.1$). As concentrações de THg no plâncton foram influenciadas positivamente pela condutividade elétrica (Fitoplâncton: $p = 0.1$; Zooplâncton: $p=0.1$, Fig. 4).

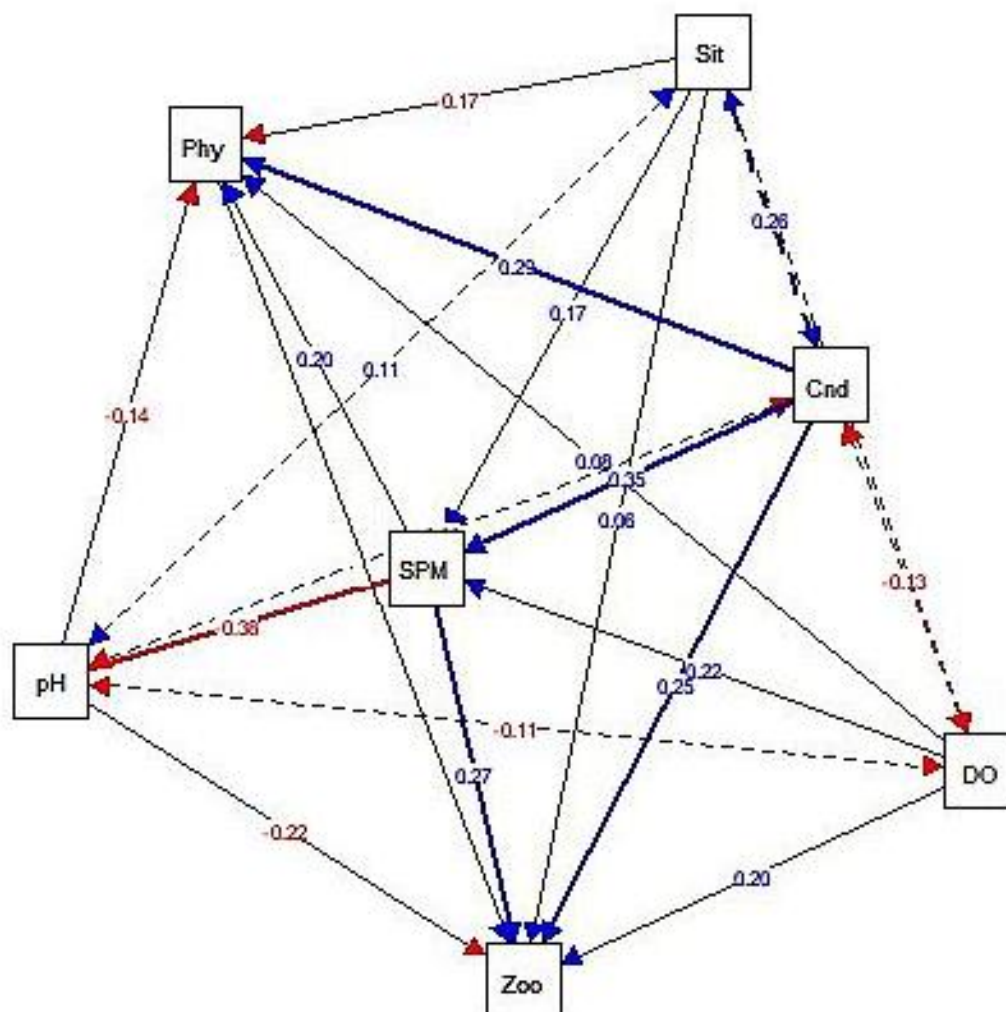


Fig. 4. Modelo de equações estruturais para indicar as relações lineares de causa e efeito entre as concentrações de mercúrio total (THg) no zooplâncton (Zoo), fitoplâncton (Phy) e material particulado em suspensão (SPM), os parâmetros limnológicos e os pontos de amostragem (Sit) em reservatórios hidrelétricos na Amazônia Meridional. Os vetores azuis e vermelhos representam efeitos positivos e negativos, respectivamente. Vetores contínuos indicam a relação entre as variáveis propostas no modelo, vetores pontilhados indicam interação observadas no modelo teórico. A espessura dos vetores indica o tamanho dos efeitos. pH: potencial hidrogeniônico; DO: oxigênio dissolvido; Cnd: condutividade elétrica.

Considerando as duas estações do ano, não foi possível observar a variação espacial nas concentrações de THg ($F_{5, 84} = 1.6$, $p=0.16$; Fig. 5). No entanto as diferenças entre os três compartimentos analisados foram evidentes com as concentrações de Hg aumentando na seguinte ordem: SPM (somente da água

superficial) < fitoplâncton < zooplâncton ($F_{2, 84} = 15.3$, $p < 0.001$; Fig. 5). Também não foi observada interação entre compartimento e local ($F_{10, 84} = 0.58$, $p = 0.82$; Fig. 5).

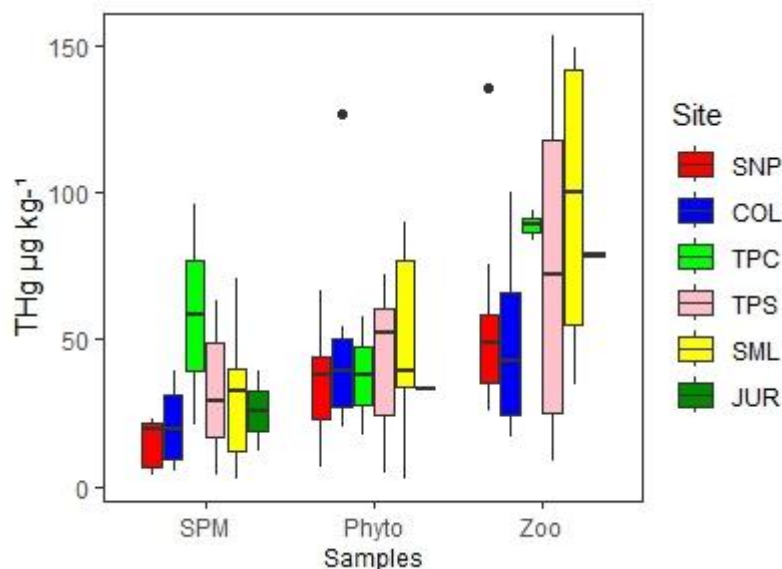


Fig. 5. Concentração de mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão da água superficial (SPM), fitoplâncton (Phyto) e zooplâncton (Zoo) em reservatórios hidrelétricos e pontos controles na Amazônia Meridional. Usinas hidrelétricas de SNP: Sinop, COL: Colíder, TPS: Teles Pires, SML: São Manoel. Pontos controles nos rios Teles Pires (TPC) e Juruena (JUR). Pontos pretos indicam outliers.

As concentrações de THg foram, em média, 2.5, 1.6 e 2 vezes maiores no período chuvoso quando comparadas com o período seco no SPM em todas as profundidades ($t = 7.06$, $p < 0.0001$), fitoplâncton ($t = 2.46$, $p = 0.02$) e zooplâncton ($t = 3.53$, $p = 0.0013$), respectivamente (Fig. 6).

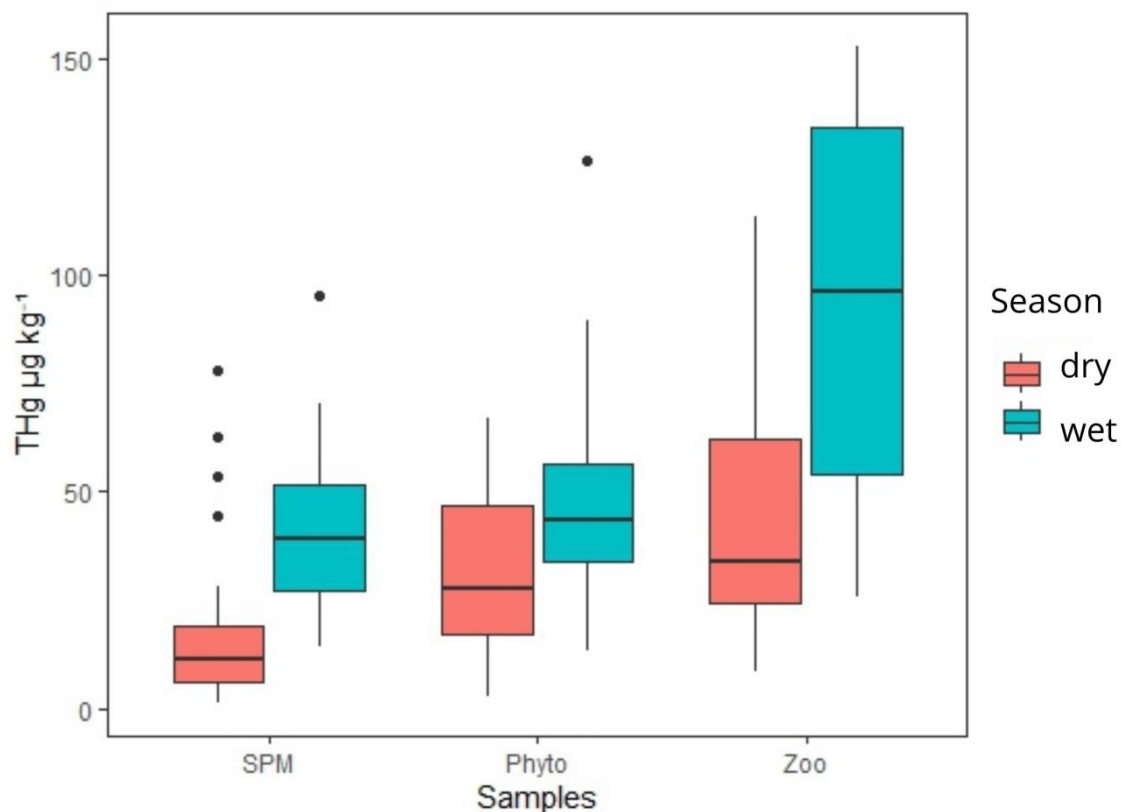


Fig. 6. Concentração de mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão da água superficial (SPM), fitoplâncton (Phyto) e zooplâncton (Zoo) no período seco (dry) e chuvoso (wet) em reservatórios hidrelétricos e pontos controle na Amazônia Meridional. Pontos pretos indicam outliers.

Discussão

Investigamos as concentrações de THg em plâncton e SPM em barragens hidrelétricas em cascata no rio Teles Pires, Amazônia brasileira, em dois períodos pluviométricos. Nossa hipótese foi parcialmente corroborada, pois, conforme previsto, as concentrações de THg aumentaram ao longo dos reservatórios em cascata durante o período chuvoso. Além disso, os compartimentos apresentaram uma magnificação nas concentrações de THg na ordem SPM < fitoplâncton < zooplâncton.

A concentração de Hg no SPM, fitoplâncton e zooplâncton aumentou de acordo com a posição de cada barramento no fluxo dos reservatórios em cascata no rio Teles Pires especialmente no período chuvoso, enquanto na estação seca as concentrações de THg foram mais semelhantes espacialmente. Essa diferença ressalta o papel da sazonalidade na disponibilidade e concentração de Hg nos

compartimentos. Na estação seca, os reservatórios normalmente apresentam condições físico-químicas mais favoráveis à metilação do Hg, como pH e DO mais baixos (Pestana et al. 2019a, Nascimento et al. 2020). Além disso, reservatórios profundos tendem a apresentar estratificação térmica, o que também favorece a metilação (Kasper et al. 2014). Neste período, o SPM é composto majoritariamente por partículas menores, proporcionando uma maior superfície de contato para a adsorção do Hg e apresentando uma distribuição mais uniforme do Hg na coluna d'água (Pestana et al. 2019b). Entretanto, em nosso estudo, observamos tendência inversa: maiores concentrações de Hg no período chuvoso. Provavelmente devido ao pH mais baixo nas zonas lacustres e intermediárias dos reservatórios no período chuvoso (4,8 – 6,34) em comparação ao período seco (5,74 – 7,6). Além disso, o maior aporte de Hg via inundação sazonal (Roulet et al. 2001) pode ter contribuído para maiores concentrações de Hg no período chuvoso.

Em ambos os períodos sazonais, todos os reservatórios apresentaram condições de hipóxia ou anoxia (DO 0,2 – 2,5 mg/L), em toda coluna d'água (Material Suplementar – Fig. S1) o que favorece a metilação do Hg e já foi observada em reservatórios hidrelétricos na Amazônia (e.g., Kasper et al. 2014, Pestana et al. 2019a, Nascimento et al. 2020). Estas baixas concentrações de DO podem estar relacionadas às características do reservatório como um sistema lântico com maior tempo de residência da água e grande quantidade de matéria orgânica, resultando condições propícias para a metilação do Hg (Pestana et al. 2019a). Por exemplo, no reservatório da UHE Sinop, apenas 30% da vegetação da área de inundação foi suprimida antes do alagamento fazendo com que uma grande carga de matéria orgânica seja colocada para o ambiente aquático e modificando o metabolismo deste (Fearnside, 2014). Ambientes com alta carga de matéria orgânica são propícios para o desenvolvimento de bactérias responsáveis pela metilação do Hg, o que pode favorecer sua entrada na cadeia trófica (Brito et al. 2016, Lázaro et al. 2018, Wu et al. 2019). Além disso, esse aporte orgânico pode ter contribuído para a formação de bancos de macrófitas nos reservatórios hidrelétricos, sendo essas plantas substratos, especialmente nas raízes, para bactérias responsáveis pela metilação do Hg (Lazaro et al. 2013, Pestana et al. 2019b).

No período chuvoso, o aumento da vazão, com o efeito da erosão e lixiviação do solo também contribui para a entrada de Hg no ambiente aquático e consequente incorporação pelo zooplâncton (Nascimento et al. 2020). Embora o efeito da vazão

possa induzir a diluição, que pode reduzir as concentrações de Hg, Kasper et al. (2017) observaram as maiores concentrações de MeHg e fluxos deste elemento nos sistemas lóticos de diversas bacias da Amazônia Brasileira justamente durante os períodos de água-altas, quando a vazão dos rios é maior. Portanto, essa diluição não necessariamente diminui as concentrações de MeHg nos rios (Kasper et al., 2017), o que é consistente com os dados obtidos neste estudo. O maior tempo de residência da água, pode permitir maior absorção de MeHg pela biota. Além disso, é possível que em reservatórios em cascata, principalmente naqueles mais a jusante, é possível que haja maior disponibilidade de MeHg oriundo do lançamento dos hipolímnios. Como as UHEs liberam a água do hipolímnio a jusante com maiores níveis de MeHg (Canavan et al. 2000, Schetagne et al. 2000, Kasper et al. 2014), pode haver um efeito cumulativo do Hg nos reservatórios subsequentes, com concentrações de Hg mais altas nos reservatórios mais a jusante.

O Hg dissolvido na água e aquele adsorvido ao SPM pode ser transportado e absorvido pelo plâncton rio abaixo, com evidências até 35 km à jusante da barragem nas condições da bacia amazônica (Kasper et al. 2014). No período chuvoso a exportação de MeHg dos sedimentos, contribui para sua redistribuição (Pestana et al. 2019b), exposição dos organismos planctônicos à contaminação por Hg rio abaixo (Nascimento et al. 2009, Kasper et al. 2014).

Na bacia hidrográfica do rio Tapajós, na região do médio Tapajós, região a jusante das hidrelétricas em cascata avaliadas neste estudo, foram observadas concentrações de THg em SPM (de 19 a 157 $\mu\text{g kg}^{-1}$ d.w.), no fitoplâncton (de 34 a 159 $\mu\text{g kg}^{-1}$ d.w.) e no zooplâncton (de 72 a 316 $\mu\text{g kg}^{-1}$ d.w., Lino et al. 2019). As concentrações máximas observadas para as três matrizes por Lino et al. (2019) foram maiores do que aquelas observadas no presente estudo. Embora essa área não possua barramentos, ela é fortemente impactada por atividades que podem contaminar os sistemas aquáticos por Hg, como mineração de ouro e desmatamento. Assim, ressaltamos que a combinação de usos e ocupação do solo, que carregam o Hg para o sistema aquático, e a presença de reservatórios em cascata, que pode potencializar a contaminação rio abaixo, pode ser crucial para a elevação das concentrações de Hg nos sistemas aquáticos da Amazônia e que, portanto, deve ser pensada nas políticas de gestão dos recursos hídricos da região.

As concentrações nos compartimentos analisados sugerem transferência trófica de Hg típica da biomagnificação. O plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) é a

base orgânica, e o SPM é a base inorgânica para a entrada de Hg na cadeia trófica aquática, com influência sobre organismos de níveis tróficos superiores (Yoshino et al., 2020). O fitoplâncton absorve e adsorve o Hg ligado ao SPM (Le Faucheur et al. 2014, Nascimento et al. 2020), e o zooplâncton, sendo consumidor primário, apresenta concentrações superiores ao fitoplâncton (Lino et al. 2019).

Pesquisas sobre contaminação de Hg em reservatórios hidrelétricos em cascata ainda são escassas, devido a complexidade das análises, logística e financiamento. Estudo com peixes desenvolvido na Amazônia em sistemas semelhantes revelaram efeitos cumulativos ao longo da cascata, e a posição do reservatório influencia na contaminação de Hg nesses organismos, sobretudo entre as espécies predadoras, com maiores concentrações de Hg nos reservatórios mais a jusante (Oliveira et al. 2025). Até o presente momento, não há registros de pesquisas com dados de SPM e plâncton nesse tipo de ambiente, o que torna nosso estudo pioneiro e importante para a compreensão da dinâmica do Hg em sistemas de reservatórios em cascata cada vez mais comuns em rios do mundo.

Conclusão

A análise das concentrações de Hg em material particulado em suspensão, fitoplâncton e zooplâncton nos reservatórios hidrelétricos em cascata do rio Teles Pires demonstra o processo de bioacumulação de Hg e o potencial de biomagnificação na cadeia trófica. A predominância de condições anóxica e hipóxica, combinadas com baixos valores de pH, predominante em todos os reservatórios analisados, favorece a metilação do Hg e sua consequente entrada na cadeia trófica.

Todos os compartimentos apresentaram concentrações mais altas no período chuvoso, além de uma tendência de aumento das concentrações de Hg ao longo do fluxo dos reservatórios em cascata. Esses resultados sugerem, portanto, uma amplificação cumulativa das concentrações de Hg ao longo do sistema.

Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (2025). Sistema de gerações de informações da ANEEL. Available on line at: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel/resource/11ec447d-698d-4ab8-977f-b424d5deee6a> (accessed february, 2025)

Brito, B. C., Forsberg, B. R., Kasper, D., Amaral, J. H. F., Vasconcelos, M. R. R., Sousa, O. P., Cunha, F. A. G., & Bastos, W. R. (2016). The influence of inundation and lake morphometry on the dynamics of mercury in the water and plankton in an Amazon floodplain lake. *Hydrobiologia*, 790, 35–48. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-3017-y>.

Burger, J., Tsipoura, N., Niles, L. J., Gochfeld, M., Dey, A., & Mizrahi, D. (2015). Mercury, lead, cadmium, arsenic, chromium and selenium in feathers of shorebirds during migrating through Delaware Bay, New Jersey: comparing the 1990s and 2011/2012. *Toxics*, 3(1), 63-74.

Canavan, C. M., Caldwell, C. A., & Bloom, N. S. (2000). Discharge of methylmercury-enriched hypolimnetic water from a stratified reservoir. *Science of the Total Environment*, 260(1-3), 159-170.

Crespo-Lopez, M. E., Augusto-Oliveira, M., Lopes-Araújo, A., Santos-Sacramento, L., Takeda, P. Y., de Matos Macchi, B., ... & Arrifano, G. P. (2021). Mercury: What can we learn from the Amazon?. *Environment international*, 146, 106223.

Fearnside, P. M. (2014). Análisis de los principales proyectos hidro-energéticos en la región amazónica. *Derecho, Ambiente y Recursos Naturales*, 55.

Fearnside, P. M. (2019). Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras, v. 3. Manaus: Editora INPA.

Fisher, N. S., & Hook, S. E. (2002). Toxicology tests with aquatic animals need to consider the trophic transfer of metals. *Toxicology*, 181, 531-536.

Forsberg, B. R., Melack, J. M., Dunne, T., Barthem, R. B., Goulding, M., Paiva, R. C., ... & Weisser, S. (2017). The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PloS one*, 12(8), e0182254.

Guimaraes, J. R. (2020). Mercury in the Amazon: Problem or opportunity? A commentary on 30 years of research on the subject. *Elem Sci Anth*, 8(1), 032.

Hacon, S., Artaxo, P., Gerab, F., Yamasoe, M. A., Campos, R. C., Conti, L. F., & De Lacerda, L. D. (1995). Atmospheric mercury and trace elements in the region of Alta Floresta in the Amazon basin. *Water, Air, and Soil Pollution*, 80, 273-283.

ICMBio (2011). Plano de manejo do Parque Nacional do Juruena. Instituto Chico Mendes de Conservacao da Biodiversidade, Brasilia.

Inmet (2025). Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura e Pecuária. Ano 2021 (atualizada). INMET_CO_MT_A920_JUINA. Available online at: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. accessed march, 2025

Kasper, D., Palermo, E. F. A., Branco, C. W. C., & Malm, O. (2012). Evidence of elevated mercury levels in carnivorous and omnivorous fishes downstream from an Amazon reservoir. *Hydrobiologia*, 694, 87-98.

Kasper, D., Forsberg, B. R., Amaral, J. H., Leitão, R. P., Py-Daniel, S. S., Bastos, W. R., & Malm, O. (2014). Reservoir stratification affects methylmercury levels in river

water, plankton, and fish downstream from Balbina hydroelectric dam, Amazonas, Brazil. *Environmental Science & Technology*, 48(2), 1032-1040.

Kasper, D., Forsberg, B. R., Amaral, J. H., Py-Daniel, S. S., Bastos, W. R., & Malm, O. (2017). Methylmercury modulation in Amazon rivers linked to basin characteristics and seasonal flood-pulse. *Environmental Science & Technology*, 51(24), 14182-14191.

Lázaro, W. L., Guimarães, J. R. D., Ignácio, A. R., Da Silva, C. J., & Díez, S. (2013). Cyanobacteria enhance methylmercury production: a hypothesis tested in the periphyton of two lakes in the Pantanal floodplain, Brazil. *Science of the total environment*, 456, 231-238.

Lázaro, W. L., Díez, S., Silva, C. J., Ignácio, A. R. A., & Guimarães, J. R. D. (2018). Seasonal changes in peryphytic microbial metabolism determining mercury methylation in a tropical wetland. *Science of the Total Environment*, 627, 1345–1352.

Le Faucheur, S., Campbell, P. G., Fortin, C., & Slaveykova, V. I. (2014). Interactions between mercury and phytoplankton: speciation, bioavailability, and internal handling. *Environmental toxicology and chemistry*, 33(6), 1211-1224.

Lino, A. S., Kasper, D., Guida, Y. S., Thomaz, J. R., & Malm, O. (2019). Total and methyl mercury distribution in water, sediment, plankton and fish along the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Chemosphere*, 235, 690-700.

Marshall, B. G., Forsberg, B. R., Thomé-Souza, M., Peleja, R., Moreira, M. Z., & Freitas, C. E. C. D. (2016). Evidence of mercury biomagnification in the food chain of the cardinal tetra *Paracheirodon axelrodi* (Osteichthyes: Characidae) in the Rio Negro, central Amazon, Brazil. *Journal of Fish Biology*, 89(1), 220-240.

MATO GROSSO. Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral – SEPLAN, 2004. *Zoneamento socioeconômico-ecológico do Estado de Mato Grosso: relatório técnico e projeto de lei*. Cuiabá: SEPLAN/BIR D/PRODEAGRO.

Maury-Brachet, R., Dassié, É. P., Legeay, A., Gonzalez, P., Feurtet-Mazel, A., Gourand, F., ... & Vigouroux, R. (2024). Influence of a hydroelectric dam on fish mercury contamination along the Sinnamary River (French Guiana). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115771.

Mergler, D., Anderson, H. A., Chan, L. H. M., Mahaffey, K. R., Murray, M., Sakamoto, M., & Stern, A. H. (2007). Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(1), 3-11.

Nascimento, E. L., Gomes, J. P. O., Carvalho, D. P., Almeida, R., Bastos, W. R., & Miyai, K. R. (2009). Mercúrio na comunidade planctônica do reservatório da Usina Hidrelétrica de Samuel (RO), Amazônia Ocidental. *Geochimica Brasiliensis*, 23(1).

Nascimento, E. L., Miyai, R. K., de Oliveira Gomes, J. P., de Almeida, R., de Carvalho, D. P., Manzatto, Â. G., ... & Bastos, W. R. (2020). Dynamics of mercury in the plankton of a hydroelectric reservoir, Western Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-18.

Oliveira, C. A. S., Kasper, D., Sargentini Junior, E., Bolson, M. A., Torrezani, L., & Zara, L. F. (2021). Influence of environmental conditions on the mercury levels of the sediment along the Balbina Reservoir, Brazilian Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1), 50.

Oliveira, E., Ignácio, A. R. A., Lázaro, W. L., Díez, S., Guimarães, J. R. D., & Santos-Filho, M. (2023). Green kingfishers as sentinel species for mercury contamination in Amazon. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1-12.

Oliveira, E., Kasper, D., da Silva, S. A. A., Lázaro, W. L., Muniz, C. C., Carvalho, G. S., ... & Ignácio, Á. R. A. (2025). Cascade reservoirs affect mercury concentrations in fish from Teles Pires river, Brazilian Amazon. *Ecotoxicology*, 1-12.

Paiva, T. C., Pestana, I. A., de Oliveira, B. C. V., Malm, O., de Rezende, C. E., & Kasper, D. (2024a). Temporal variation of mercury levels in fish, soil, and sediments in an Amazon reservoir: insights from 35 years of river impoundment in Pará State, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1089.

Pereira, C.F. R. Monitoramento das Hidreletricas na Bacia do Juruena. Programa de Direitos Indígenas, Política Indigenista e Informação a Sociedade. *Operação Amazônia Nativa*, 2023.

Pestana, I. A., Azevedo, L. S., Bastos, W. R., & de Souza, C. M. M. (2019a). The impact of hydroelectric dams on mercury dynamics in South America: A review. *Chemosphere*, 219, 546-556.

Pestana, I. A., Bastos, W. R., Almeida, M. G., Mussu, M. H., & Souza, C. M. M. (2019b). Methylmercury in environmental compartments of a hydroelectric reservoir in the Western Amazon, Brazil. *Chemosphere*, 215, 758–765. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.106>.

Pestana, I. A., de Rezende, C. E., Almeida, R., de Lacerda, L. D., & Bastos, W. R. (2022). Let's talk about mercury contamination in the Amazon (again): The case of the floating gold miners' village on the Madeira River. *The Extractive Industries and Society*, 11, 101122.

Roulet, M., Lucotte, M., Saint-Aubin, A., Tran, S., Rheault, I., Farella, N., ... & Amorim, M. (1998). The geochemistry of mercury in central Amazonian soils developed on the Alter-do-Chao formation of the lower Tapajos River Valley, Para state, Brazil. *Science of the Total Environment*, 223(1), 1-24.

Roulet, M., Guimarães, J. R. D., & Lucotte, M. (2001). Methylmercury production and accumulation in sediments and soils of an Amazonian floodplain—effect of seasonal inundation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 128, 41-60.

Schetagne, R., Doyon, J. F., & Fournier, J. J. (2000). Export of mercury downstream from reservoirs. *Science of the Total Environment*, 260(1-3), 135-145.

Vieira, M., Bernardi, J. V., Dórea, J. G., Rocha, B. C., Ribeiro, R., & Zara, L. F. (2018). Distribution and availability of mercury and methylmercury in different waters from the Rio Madeira Basin, Amazon. *Environmental pollution*, 235, 771-779.

World Health Organization (WHO). Mercury and Health. 2024. Available online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health> (accessed on 24 March 2025).

Wu, P., Kainz, M., Akerblom, S., Bravo, A. G., Sonesten, L., Branfireun, B., Deininger, A., Bergstrom, A. K., & Bishop, K. (2019). Terrestrial diet influences mercury bioaccumulation in zooplankton and macroinvertebrates in lakes with differing dissolved organic carbon concentrations. *Science of the Total Environment*, 669, 821–832. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.171>.

Yoshino, K., Mori, K., Kanaya, G., Kojima, S., Henmi, Y., Matsuyama, A., & Yamamoto, M. (2020). Food sources are more important than biomagnification on mercury bioaccumulation in marine fishes. *Environmental pollution*, 262, 113982.

Material Suplementar

ARTIGO 3

Aumento de Mercúrio em seston a jusante de reservatórios hidrelétricos em cascata na Amazônia

Mercury in seston increases downstream along cascade hydroelectric reservoirs in the Amazon

Edvagner Oliveira^a; Daniele Kasper^b; Solange Arrolho da Silva^c; Juliano André Bogoni^a; Áurea Regina Alves Ignácio^a

1 página, 1 figura

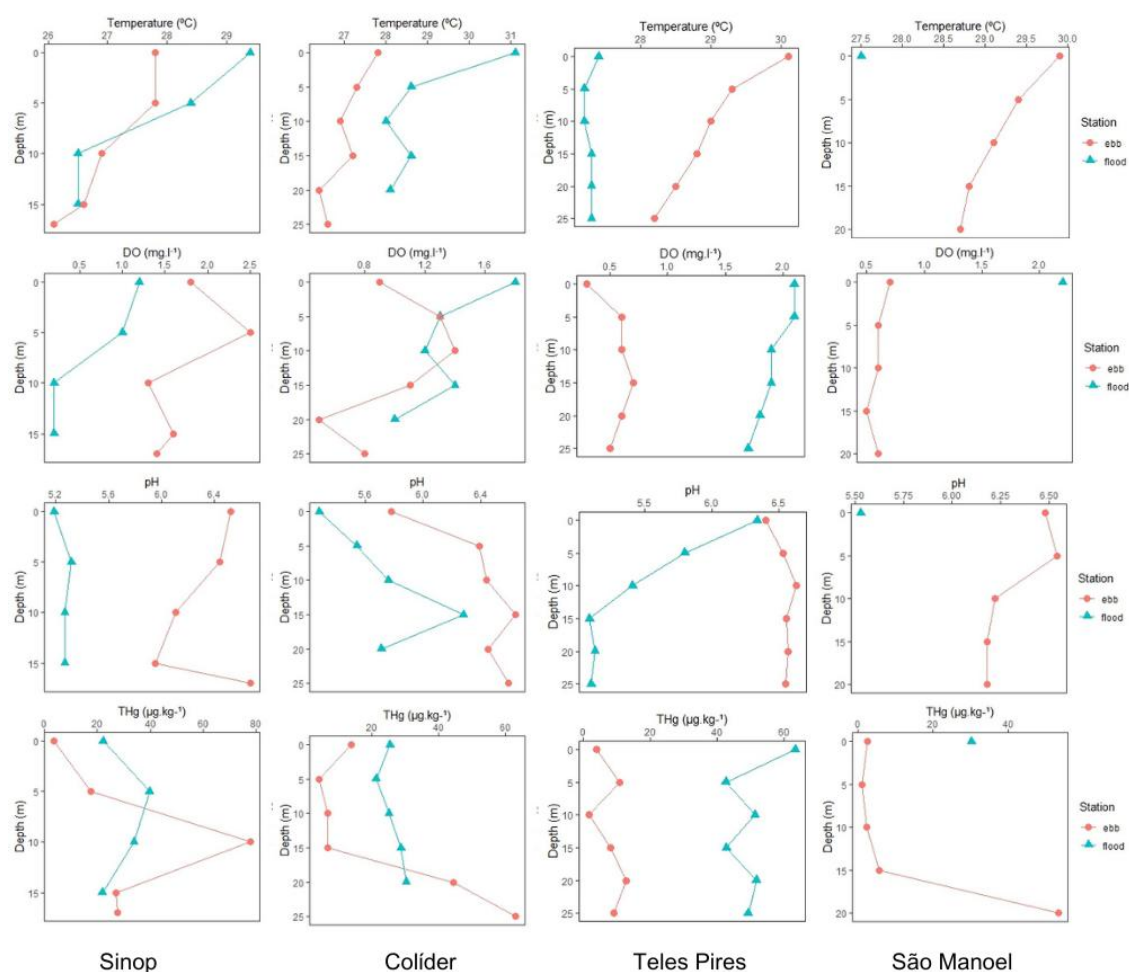


Fig. S1. Variação sazonal em perfil vertical dos parâmetros limnológicos e mercúrio total (THg) em material particulado em suspensão (SPM) no ambiente lacustre dos reservatórios hidrelétricos em cascata no rio Teles Pires, Amazônia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os reservatórios hidrelétricos em cascata do rio Teles Pires impactam significativamente a dinâmica do mercúrio (Hg) nos compartimentos bióticos e abióticos, com excessão do solo, evidenciando efeitos cumulativos que se manifestam ao longo do sistema. Os peixes predadores apresentaram amplificação do mercúrio ao longo dos reservatórios em cascata (de montante para jusante), assim como nos reservatórios analisados individualmente, onde as concentrações de Hg foram superiores a jusante, devido ao lançamento do hipolímnio pelas turbinas e/ou comportas.

Por outro lado, os peixes não predadores não apresentaram um padrão claro de acumulação de Hg ao longo do complexo de reservatórios neste estudo, embora alguns espécimes tenham excedido os limites estabelecidos pela legislação brasileira para consumo humano.

As concentrações de Hg nos sedimentos foram influenciadas pela granulometria, matéria orgânica (OM) e posição do reservatório no complexo de reservatórios em cascata, reforçando a hipótese de que ambientes lênticos atuam como sumidouros (estoques) de Hg no sistema, especialmente pela maior deposição de partículas finas e orgânicas. Em contrapartida, os ambientes lóticos a jusante dos reservatórios, apresentaram maiores teores de Hg, funcionando como vias de transporte do contaminante.

Encontramos relações marginalmente significativas entre as concentrações de Hg no solo e nos sedimentos, sugerindo que outros processos, como flutuações sazonais, transporte de sedimentos a montante e uso e ocupação do solo, podem afetar a dinâmica da transferência de Hg nesses compartimentos.

A análise das concentrações de Hg no material particulado em suspensão, fitoplâncton e zooplâncton evidenciou o processo de bioacumulação de Hg e o potencial de biomagnificação na cadeia trófica. A condição anóxica e hipóxica, aliada ao baixo pH predominante em todos os reservatórios analisados, pode favorecer a metilação do Hg e sua consequente entrada na cadeia trófica.

Diante desse cenário, ressaltamos a importância de monitoramentos contínuos para avaliar, a longo prazo, o comportamento do Hg em reservatórios tropicais e seus impactos nos ecossistemas aquáticos. Além disso, consideramos essencial que os efeitos cumulativos do Hg sejam incorporados em estudos

ambientais e nas regulamentações associadas à instalação e operação de novas usinas hidrelétricas na Amazônia e em outras regiões tropicais.

ANEXO



Ministério do Meio Ambiente - MMA
 Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio
 Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBIO

Registro de Expedição
Licença permanente para coleta de material zoológico

Número: 73787	Data da emissão: 09/08/2022 12:03:15
Número da solicitação: 24215	Data da expedição: 10/08/2022 à 31/08/2022

Dados do titular

Nº de Registro: 268530	Nome: Claumir César Muniz	CPF: 603.966.951-91
------------------------	---------------------------	---------------------

Equipe

#	Nome	Função	CPF	Nacionalidade	Resp.
1	EDVAGNER DE OLIVEIRA	Pesquisador Responsável	001.054.401-16	Brasileiro	Sim
2	GIOVANI SPINOLA DE CARVALHO	Pesquisador	976.507.221-04	Brasileiro	Não

Atenção: A participação de pessoa natural ou jurídica estrangeira nas atividades descritas no art. 3º da Instrução Normativa nº 154/2007 deverá ser autorizada pelo órgão brasileiro responsável pela política nacional científica e tecnológica, exceto os casos previstos em legislação específica. De acordo com o art. 29 da Portaria nº 55/1990, do Ministério da Ciência e Tecnologia, é vedado o exercício das atividades de coleta aos estrangeiros portadores de visto de turista ou de outro tipo de visto não compatível com a natureza dos trabalhos a serem desenvolvidos no País.

Locais onde as atividades de campo serão executadas

#	Descrição do local	Município-UF	Bioma	Caverna?	Tipo
1	Rio Teles Pires	MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal



Ministério do Meio Ambiente - MMA

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio

Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBIO

Registro de Expedição

Licença permanente para coleta de material zoológico

Número: 73821	Data da emissão: 06/09/2022 15:55:22
Número da solicitação: 24215	Data da expedição: 08/09/2022 à 30/09/2022

Dados do titular

Nº de Registro: 268530	Nome: Claumir César Muniz	CPF: 603.966.951-91
------------------------	---------------------------	---------------------

Equipe

#	Nome	Função	CPF	Nacionalidade	Resp.
1	EDVAGNER DE OLIVEIRA	Pesquisador Responsável	001.054.401-16	Brasileiro	Sim

Atenção: A participação de pessoa natural ou jurídica estrangeira nas atividades descritas no art. 3º da Instrução Normativa nº 154/2007 deverá ser autorizada pelo órgão brasileiro responsável pela política nacional científica e tecnológica, exceto os casos previstos em legislação específica. De acordo com o art. 29 da Portaria nº 55/1990, do Ministério da Ciência e Tecnologia, é vedado o exercício das atividades de coleta aos estrangeiros portadores de visto de turista ou de outro tipo de visto não compatível com a natureza dos trabalhos a serem desenvolvidos no País.

Locais onde as atividades de campo serão executadas

#	Descrição do local	Município-UF	Bioma	Caverna?	Tipo
1	Rio Teles Pires	Colíder-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
2	Rio Teles Pires	Paranaíta-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
3	Rio Teles Pires	Apiacás-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
4	Rio Teles Pires	Jacareacanga-PA	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
5	Rio Juruena	Cotriguaçu-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
6	Rio Teles Pires	Sinop-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
7	Rio Teles Pires	Itaúba-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal



Ministério do Meio Ambiente - MMA

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio

Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBIO

Registro de Expedição

Licença permanente para coleta de material zoológico

Número: 74073	Data da emissão: 24/03/2023 17:00:53
Número da solicitação: 24215	Data da expedição: 25/03/2023 à 04/05/2023

Dados do titular

Nº de Registro: 268530	Nome: Claumir César Muniz	CPF: 603.966.951-91
------------------------	---------------------------	---------------------

Equipe

#	Nome	Função	CPF	Nacionalidade	Resp.
1	EDVAGNER DE OLIVEIRA	Pesquisador Responsável	001.054.401-16	Brasileiro	Não

Atenção: A participação de pessoa natural ou jurídica estrangeira nas atividades descritas no art. 3º da Instrução Normativa nº 154/2007 deverá ser autorizada pelo órgão brasileiro responsável pela política nacional científica e tecnológica, exceto os casos previstos em legislação específica. De acordo com o art. 29 da Portaria nº 55/1990, do Ministério da Ciência e Tecnologia, é vedado o exercício das atividades de coleta aos estrangeiros portadores de visto de turista ou de outro tipo de visto não compatível com a natureza dos trabalhos a serem desenvolvidos no País.

Locais onde as atividades de campo serão executadas

#	Descrição do local	Município-UF	Bioma	Caverna?	Tipo
1	Rio Teles Pires	Cláudia-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
2	Rio Juruena	Cotriguaçu-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
3	Rio Teles Pires	Sinop-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
4	Rio Teles Pires	Itaúba-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
5	Rio Teles Pires	Alta Floresta-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
6	Rio Teles Pires	Colíder-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
7	Rio Teles Pires	Jacareacanga-PA	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
8	Rio Teles Pires	Carlinda-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal
9	Rio Teles Pires	Paranaíta-MT	Amazônia	Não	Fora de UC Federal

PARECER 03/2022

DADOS DO PROCESSO 01/2022 - CEUA/UNEMAT

Projeto de Pesquisa: Avaliação dos efeitos das barragens de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Usinas Hidrelétricas no acúmulo de mercúrio em compartimentos bióticos e abióticos no norte do Pantanal e Sul da Amazônia

Pesquisador: Edvagner de Oliveira

Áreas temáticas: Ciências Ambientais

Instituição Proponente: Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT

Patrocinador Principal: UNEMAT.

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 03/2022

Data da Relatoria: 13/06/2022

APRESENTAÇÃO:

O parecer em comento refere-se aos esclarecimentos solicitados no **PARECER 02/2022, PROCESSO 01/2022 - CEUA/UNEMAT**, ao projeto de pesquisa “**Avaliação dos efeitos das barragens de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Usinas Hidrelétricas no acúmulo de mercúrio em compartimentos bióticos e abióticos no norte do Pantanal e Sul da Amazônia**”. O referido projeto tem como objetivos:

OBJETIVO GERAL:

Avaliar o efeito das barragens de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Usinas Hidrelétricas nas concentrações de mercúrio em componentes bióticos e abióticos no Pantanal e Amazônia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as concentrações de mercúrio total e metilmercúrio em diferentes tecidos de peixes a montante, jusante e reservatórios de PCH's e UHE's no Pantanal e Amazônia mato-grossense;
- Avaliar as concentrações de mercúrio em fitoplâncton e zooplâncton a montante, jusante e reservatórios de PCH's e UHE's no Pantanal e Amazônia mato-grossense;

- Avaliar a concentração de mercúrio em sedimentos a montante, a jusante e reservatórios de PCH's e UHE's no Pantanal e Amazônia mato-grossense;
- Avaliar as concentrações de mercúrio no solo da mata ciliar a montante, a jusante e reservatórios de PCH's e UHE's no Pantanal e Amazônia mato grossense;
- Analisar o efeito sazonal das concentrações de mercúrio nos compartimentos biológicos nos reservatórios de PCHs e UHEs, a montante e jusante das barragens no Pantanal e Amazônia mato-grossense;
- Analisar os efeitos da estratificação térmica e variáveis limnológicas (pH, oxigênio dissolvido, turbidez) nas concentrações de mercúrio dos organismos a montante e jusante e nos reservatórios hidrelétricos;
- Avaliar o efeito cumulativo de barragens hidrelétricas no rio Teles Pires nas concentrações de mercúrio em diferentes componentes bióticos e abióticos.

COMENTÁRIOS E CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO:

QUANTO AOS CUIDADOS E MANEJO DOS ANIMAIS E RISCOS AOS PESQUISADORES:

Os esclarecimentos declarados pelo pesquisador estão descritos abaixo:

1. Esclarecer o quantitativo de pontos amostrais nos ambientes;

As amostras ocorrerão em 33 pontos amostrais por dois períodos sazonais. Os dois pontos de amostragem por reservatório discriminados abaixo, ocorrerão na estrutura do reservatório e brevemente a jusante, exceto nas áreas controle (livre de barramento). Entre a UHE Colíder e UHE Teles Pires terá um ponto de coleta fora de áreas de influência dos reservatórios devido a distância entre os mesmos. Os pontos de coleta são discriminados abaixo. UHE/PCH Rio Jauru Antonio Brennand – 2 pontos de amostragem Ombreiras – 2 pontos de amostragem Indiavaí – 2 pontos de amostragem Salto – 2 pontos de amostragem Figueirópolis – 2 pontos de amostragem Jauru – 2 pontos de amostragem UHE/PCH Rio Juba/Seputuba Juba I – 2 pontos de amostragem Juba II – 2 pontos de amostragem Graça Brennand – 2 pontos de amostragem Pampeana – 2 pontos de amostragem UHE/PCH Rio Teles Pires Sinop – 2 pontos de amostragem Colíder – 2 pontos de amostragem Teles Pires – 2 pontos de amostragem São Manuel – 2 pontos de

amostragem Entre os barramentos de Colíder e Teles Pires existe um (01) ponto de amostragem devido o distanciamento entre os mesmos. As amostras para controle (livres de barramentos) Rio Cabaçal –2 pontos de amostragem Rio Juruena (alterado por refletir maior complexidade estrutural que o rio Cristalino) – 2 pontos de amostragem

Elencar o(s) critério(s) para a definição de 15 espécimes por local de amostragem;

A quantidade de espécies (pelo menos 4) se dá pela necessidade de coleta de diferentes níveis tróficos (guilda trófica) para evidenciar/compreender a biomagnificação do mercúrio. As guildas necessárias para este trabalho são de peixes detritívoros, insetívoros/invertívoros, onívoros e carnívoros/piscívoros. A quantidade de espécimes (15 por espécie) decorre da compreensão do processo de bioacumulação de mercúrio nos organismos e na estrutura da população. A bioacumulação de mercúrio ocorre individualmente nos organismos, portanto, para a compreensão deste processo há necessidade de um n amostral que reflita a população biológica estudada. Ressaltamos que a dieta de alguns organismos podem variar de acordo com a ontogenia, disponibilidade de alimentos e estratégia de captura alimentar. Além disso, nos barramentos hidrelétricos, as alterações da estrutura de habitat podem alterar a comunidade biológica e sua alimentação, daí a necessidade de coleta no reservatório e a jusante em um quantitativo que reflita a população e as variações intraespecíficas de biometria e padrões de bioacumulação. O número de espécimes também está fundamentado em estudos desenvolvidos em reservatórios hidrelétricos brasileiros (Bastos et al. 2008; Kasper et al. 2012; Cebalho et al. 2017)

1. Esclarecer a necessidade do quantitativo do total de amostras de 4230 espécimes.

O quantitativo de espécimes é retificado, **totalizando 3960**. O cálculo se dá pela multiplicação dos pontos amostrais (33), períodos de coleta (2), número de espécies por pontos (pelo menos 4), número de espécimes por espécie (15). O total de espécimes reflete a amplitude e complexidade da área amostral – número de reservatórios hidrelétricos e a estrutura trófica ao longo dos pontos de amostragem.

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TERMOS DE APRESENTAÇÃO OBRIGATÓRIA:

Os documentos apresentados encontram-se de acordo com as exigências institucionais.

RECOMENDAÇÕES:

Não há.

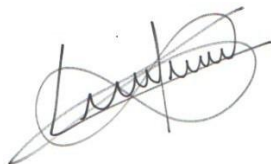
CONCLUSÕES OU PENDÊNCIAS E LISTA DE INADEQUAÇÕES:

A Comissão de Ética no Uso de Animais da Universidade do Estado de Mato Grosso CEUA/UNEMAT após análise dos esclarecimentos encaminhados ao **PROCESSO 01/2022 - CEUA/UNEMAT**, de acordo com a Lei nº 11.794 de 08/10/2008 é de parecer **APROVADO** ao desenvolvimento do projeto: **Avaliação dos efeitos das barragens de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Usinas Hidrelétricas no acúmulo de mercúrio em compartimentos bióticos e abióticos no norte do Pantanal e Sul da Amazônia**

SITUAÇÃO DO PARECER:

APROVADO

Cáceres - MT, 13/06/2022.



**Presidente em exercício da Comissão de Ética no Uso de Animais
– CEUA-UNEMAT/ PRPPG**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS - CAC****ATA Nº 5**

Aos 25 dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e cinco, às 08h00min, nas dependências da Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário de Cáceres/MT, foi instalada a sessão pública para julgamento da tese do aluno Edvagner de Oliveira, do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, intitulada: "EFEITOS DE BARRAGENS DE USINAS HIDRELÉTRICAS EM CASCATA NO ACÚMULO DE MERCÚRIO EM COMPARTIMENTOS BIÓTICOS E ABIÓTICOS NA AMAZÔNIA". Após a abertura da sessão, a Profa. Dra. Aurea Regina Alves Ignacio (UNEMAT), orientadora e presidente da banca julgadora, deu seguimento aos trabalhos, apresentando os demais examinadores: Examinadores internos Profa. Dra. MARIA APARECIDA PEREIRA PIERANGELI (UNEMAT) e GUSTAVO RODRIGUES CANALE (UNEMAT) e Examinadores externos Prof. Dr. INÁCIO ABREU PESTANA (UFF) e JULIANA SOUZA-KASPRZYK (AMU). Foi dada a palavra ao autor que iniciasse a apresentação da tese e expôs seu trabalho e, em seguida, concluída a exposição, a Profa. AUREA REGINA ALVES IGNACIO, presidente, passou a palavra aos examinadores externos, para arguir o candidato, e, em seguida, aos examinadores internos, para que fizessem o mesmo. Terminada a leitura, procedeu-se à arguição e respostas do discente. Ao final, a banca, reunida em separado, resolveu aprovar o doutorando. Conforme as normas vigentes na Universidade do Estado de Mato Grosso. A versão final da tese deverá ser entregue ao programa, no prazo de 90 dias; contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Ainda, conforme a Resolução da pós-graduação, o candidato não terá o título se não cumprir as exigências acima. Nada mais havendo a tratar, foi encerrada a sessão e lavrada a presente ata que será assinada por quem de direito.

Documento assinado digitalmente



INACIO ABREU PESTANA

Data: 30/04/2025 14:41:37-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>**Dr. INÁCIO ABREU PESTANA, UFF**

Examinador

Documento assinado digitalmente



JULIANA SOUZA KASPRZYK

Data: 07/05/2025 11:03:15-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>**Dr. JULIANA SOUZA-KASPRZYK, AMU**

Examinadora Externa à Instituição

Documento assinado digitalmente



GUSTAVO RODRIGUES CANALE

Data: 30/04/2025 23:58:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>**Dr. GUSTAVO RODRIGUES CANALE, UFMT**

Examinador



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS - CAC**

Documento assinado digitalmente



MARIA APARECIDA PEREIRA PIERANGELI
Data: 30/04/2025 13:19:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

MARIA APARECIDA PEREIRA PIERANGELI, UNEMAT

Examinadora Interna

Documento assinado digitalmente



AUREA REGINA ALVES IGNACIO
Data: 30/04/2025 14:35:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AUREA REGINA ALVES IGNACIO, UNEMAT

Presidente

EDVAGNER DE OLIVEIRA

Doutorando



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS - CAC**

FOLHA DE CORREÇÕES

ATA Nº 5

Autor: EDVAGNER DE OLIVEIRA

Título: EFEITOS DE BARRAGENS DE USINAS HIDRELETRICAS EM CASCATA NO
ACÚMULO DE MERCURIO EM COMPARTIMENTOS BIOTICOS E ABIOTICOS NA
AMAZONIA

Banca examinadora:

Prof. INÁCIO ABREU PESTANA

Examinador

Prof. JULIANA SOUZA-KASPRZYK

Examinadora Externa à
Instituição

Prof. GUSTAVO RODRIGUES CANALE

Examinador

Prof. MARIA APARECIDA PEREIRA PIERANGELI Examinadora Interna

Prof. AUREA REGINA ALVES IGNACIO

Presidente

Os itens abaixo deverão ser modificados, conforme sugestão da banca

1. [] INTRODUÇÃO
2. [] REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
3. [] METODOLOGIA
4. [] RESULTADOS OBTIDOS
5. [] CONCLUSÕES

COMENTÁRIOS GERAIS:

Declaro, para fins de homologação, que as modificações, sugeridas pela banca examinadora, acima mencionada, foram cumpridas integralmente.

Prof. AUREA REGINA ALVES IGNACIO

Orientador