

DINÂMICA DE CROMO EM PEIXES DO LAGO PURUZINHO, AMAZÔNIA
OCIDENTAL: INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE, HÁBITOS ALIMENTARES,
AVALIAÇÃO DE RISCO E AVALIAÇÃO ESPACIAL

LUIZA SILVA DO NASCIMENTO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

JUNHO – 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

N244

Nascimento, Luíza Silva do.

DINÂMICA DE CROMO EM PEIXES DO LAGO PURUZINHO, AMAZÔNIA OCIDENTAL :
INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE, HÁBITOS ALIMENTARES, AVALIAÇÃO DE RISCO E AVALIAÇÃO
ESPACIAL / Luíza Silva do Nascimento. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

72 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Biociências e Biotecnologia, 2021.

Orientador: Inácio Abreu Pestana.

1. Cromo. 2. Peixes. 3. Pulso de inundação. 4. Hábitos alimentares. 5. Amazônia. I.
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 577

DINÂMICA DE CROMO EM PEIXES DO LAGO PURUZINHO, AMAZÔNIA
OCIDENTAL: INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE, HÁBITOS ALIMENTARES,
AVALIAÇÃO DE RISCO E AVALIAÇÃO ESPACIAL

LUIZA SILVA DO NASCIMENTO

Dissertação apresentada ao Centro de
Biodiversidade e Biotecnologia da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense, como parte das exigências
para a obtenção do título de Mestre em
Ecologia e Recursos Naturais.

Orientador: Dr. Inácio Abreu Pestana

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

JUNHO – 2021

DINÂMICA DE CROMO EM PEIXES DO LAGO PURUZINHO, AMAZÔNIA
OCIDENTAL: INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE, HÁBITOS ALIMENTARES,
AVALIAÇÃO DE RISCO E AVALIAÇÃO ESPACIAL

LUIZA SILVA DO NASCIMENTO

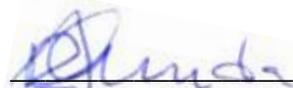
Dissertação apresentada ao Centro de
Biotecnologia e Biotecnologia da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense, como parte das exigências
para a obtenção do título de Mestre em
Ecologia e Recursos Naturais.

Aprovada em: **01/06/2021**

Comissão Examinadora:



Prof.^a Daniele Kasper (Dra. em Ciências Biológicas – Biofísica) – UFRJ



Prof. Ronaldo de Almeida (Dr. em Ciências Biológicas – Biofísica) – UNIR



Dr. Marcelo Gomes Almeida (Dr. em Biotecnologia e Biotecnologia) – UENF



Dr. Inácio Abreu Pestana (Dr. em Ecologia e Recursos Naturais) – UENF (Orientador)



Governo do Estado do Rio de Janeiro
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

DECLARAÇÃO

Eu, Marina Satika Suzuki, coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais (PPG-ERN) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), seguindo a Resolução CPPG nº2 de 2021, declaro validadas as assinaturas constantes da Folha de Assinaturas da Dissertação intitulada “DINÂMICA DE CROMO EM PEIXES DO LAGO PURUZINHO, AMAZÔNIA OCIDENTAL: INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE, HÁBITOS ALIMENTARES, AVALIAÇÃO DE RISCO E AVALIAÇÃO ESPACIAL” de autoria de Luiza Silva do Nascimento, defendida no dia 01 de junho de 2021.

Campos dos Goytacazes, 24 agosto de 2021

Marina Satika Suzuki
Coordenadora PPG-ERN / UENF
ID. Funcional 641333-1



Documento assinado eletronicamente por **Marina Satika Suzuki, Coordenadora**, em 24/08/2021, às 14:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento nos art. 21º e 22º do [Decreto nº 46.730, de 9 de agosto de 2019](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.fazenda.rj.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=6, informando o código verificador **21347541** e o código CRC **3CE6156A**.

Referência: Processo nº SEI-260009/002124/2021

SEI nº 16736771

Avenida Alberto Lamego, 2000, - Bairro Pq. Califórnia, Campos dos Goytacazes/RJ, CEP 28013-602
Telefone: - www.uenf.br

“Sabemos muito pouco, mas é
surpreendente que saibamos tanto, e
ainda mais surpreendente que tão pouco
conhecimento possa nos dar tanto poder.”

- Bertrand Russell

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que me apoiam em todas as jornadas que eu decido trilhar. Aos meus irmãos, Milena, Suzane e João Pedro, eu agradeço pela companhia, carinho e descontração. O apoio constante e inabalável de vocês foi fundamental para mim.

Agradeço aos amigos que me acompanharam nessa caminhada, graças a vocês tudo se tornou mais leve. À Layra, minha companheira constante no mestrado, muito obrigada pela cumplicidade e amizade em todos os momentos que passamos juntas. Obrigada pela sua calma nos meus momentos de leve desespero, e pela parceria em todos os trabalhos que desenvolvemos juntas.

Agradeço especialmente a professora Cristal, que com seu entusiasmo genuíno pela ciência me inspirou a entrar no programa de pós graduação em Ecologia e Recursos Naturais na UENF e me acolheu como um de seus orientandos. Nossa convivência, por mais breve que tenha sido, foi suficiente para marcar minha trajetória acadêmica, e a minha vida.

Agradeço ao Inácio, sem sua orientação, carinho e apoio constantes eu não teria conseguido superar todos os obstáculos acadêmicos e cotidianos que surgiram nessa caminhada. Você já é tudo aquilo que um grande professor deve ser. O seu entusiasmo pela ciência, assim como o da Cristal, contagia a todos que convivem com você. Meu pensamento crítico e visão do mundo estarão para sempre marcados pelos seus ensinamentos, e por isso eu sou muito grata.

Agradeço a UENF, ao Programa de Pós Graduação e Ecologia e Recursos Naturais e ao Laboratório de ciências ambientais pela estrutura oferecida e apoio. Ao Dr. Marcelo Almeida e ao técnico Braulio Cherene obrigada pela ajuda na escolha da metodologia e na realização das análises.

Agradeço a FAPERJ e a CAPES pelo financiamento dessa pesquisa e pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE MATERIAL SUPLEMENTAR	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
ESTE ESTUDO	xvi
1. Introdução Geral	17
1.1 Cromo	19
1.1.1 Cromo na Amazônia	20
1.2 Peixes na Amazônia: consumo e riscos associados	21
Artigo: Dinâmica de Cromo em peixes do lago Puruzinho, Amazônia Ocidental: Influência da sazonalidade, hábitos alimentares, avaliação de risco e avaliação espacial.	
1. Introdução	26
2. Materiais e Métodos	29
2.1 Área de Estudo	29
2.2 Análise Espacial	31
2.3 Amostragem e Tratamento das Amostras	31
2.4 Análises Químicas	32
2.4.1 Determinação de Cr	32
2.4.2 Determinação de Fe	33
2.4.3 Determinação de Isótopos de C e N	33
2.5 Determinação da Ingestão de Cr	33
2.6 Análise Estatística	34
3. Resultados	35
3.1 Relação entre as concentrações de Cr, hábitos alimentares e sazonalidade	35
3.2 Relação entre as concentrações de Cr e as razões isotópicas de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$)	38
3.3 Ingestão diária de Cr pela população local	39
3.4 Análise Espacial das Concentrações de Cr em peixes de diferentes hábitos alimentares	40
4. Discussão	40
4.1 O efeito do pulso de inundação e hábitos alimentares na dinâmica de Cr	40
4.2 A variação espacial nas concentrações de Cr ao longo do rio Madeira	48
4.3 Avaliação do risco de ingestão de Cr pela população do lago Puruzinho	49
5. Conclusão	51
6. Referências Bibliográficas	52
7. Material Suplementar	60
2. Considerações Finais	62
3. Referências Bibliográficas	64

LISTA DE ABREVIATURAS

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry

C – Carbono

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Cr – Cromo

Cr II – Cromo bivalente

Cr III – Cromo trivalente

Cr VI – Cromo hexavalente

FAO – Food and Agriculture Organization

FAPERJ - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

Fe – Ferro

H₂O₂ – Peróxido de Hidrogênio

Hg - Mercúrio

HNO₃ – Ácido Nítrico

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICP-OES – Espectrômetro de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente

Mn – Manganês

MPS – Material Particulado em Suspensão

N – Nitrogênio

RO – Rondônia

UNEF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNIR – Universidade Federal de Rondônia

LISTA DE TABELAS

Artigo

Tabela 1. Espécies de peixes coletadas, seus hábitos alimentares e N amostral para cada período hidrológico avaliado do lago Puruzinho	31
---	----

LISTA DE FIGURAS

Artigo

Figura 1 - Mapa da área de estudo representando o rio Madeira e o lago Puruzinho, com as demarcações dos pontos das coleta realizadas por Sousa et al. (2015) (pontos pretos), JAM (à montante do distrito Jaci Paraná), RSJ (à jusante do distrito Jaci Paraná), RSA (porção superior do reservatório Santo Antônio), RSB (porção inferior do reservatório Santo Antônio), RST (igarapé Jatuarana I), JAD (igarapé Jatuarana II), BEF (foz do igarapé Belmont), CUN (lago Cuniã), e o ponto de coleta do presente trabalho PUR (lago Puruzinho; ponto branco). As cidades de Porto Velho e Humaitá também estão representadas..... 30

Figura 2 - Taxa média de ingestão diária, em $\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$, para Curimatã (*Prochilodus nigricans*), Pacu (*Mylossoma duriventre*), Piranha (*Serrasalmus rhombeus*) e Tucunaré (*Cichla pleiozona*). As barras pretas representam a taxa média de ingestão diária para cada espécie, a linha pontilhada representa a taxa média de ingestão diária considerando as quatro espécies ($40,4 \text{ g}\cdot\text{pessoa}\cdot\text{dia}^{-1}$) e o sombreado cinza representa a distribuição dos dados. A distribuição dos dados apresenta uma forte assimetria. Os dados foram obtidos em colaboração com Oliveira et al., 2010..... 34

Figura 3 - Concentrações de Cr ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ peso úmido) em *Cichla pleiozona* (carnívoro), *Mylossoma duriventre* (herbívoro), *Prochilodus nigricans* (detritívoro) e *Serrasalmus rhombeus* (piscívoro) por períodos hidrológicos. As linhas contínuas representam a tendência das medianas ao longo dos períodos hidrológicos, extraídas de regressões quadráticas..... 36

Figura 4 - Regressão linear entre as concentrações de Cr e as concentrações de Fe nos peixes analisados..... 37

Figura 5 - Associações entre as concentrações de Cr com as assinaturas isotópicas de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$) nos peixes do lago Puruzinho analisados nesse estudo. As elipses foram construídas à 1 desvio-padrão do seu centroide, representando um intervalo de confiança de 68%. As estatísticas das regressões (equação, R^2 e valor de p) estão dentro de cada gráfico..... 38

Figura 6 - Ingestão diária de Cr ($\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ peso úmido) pela população que vive ao entorno do lago Puruzinho. Os valores de Cr determinados nos peixes (Figura 3) foram combinados com os valores de ingestão de cada uma das espécies pela população do lago Puruzinho (Figura 2; Oliveira et al., 2010) através de análises combinatórias empíricas (Método de Monte Carlo). Esses valores foram comparados com a Ingestão Diária Recomendada para Adultos, $35 \mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ (linha vermelha tracejada), determinado pela ANVISA (2005)..... 39

Figura 7 - Concentração de Cr ($\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ peso úmido) em peixes carnívoros, herbívoros, detritívoros e piscívoros em função da distância do lago Puruzinho. Os dados utilizados são oriundos do período de vazante. A linha vermelha pontilhada representa a localização da cidade Porto Velho, RO. Os dados dos peixes pescados à montante do lago Puruzinho foram extraídos de Sousa et al., 2015. As barras representam o erro padrão quando $n>1$ 41

LISTA DE MATERIAL SUPLEMENTAR

Artigo

Material Suplementar 1 – Regressões lineares entre as concentrações de Cr ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ peso úmido) e o peso (g) para cada espécie. 60

Material Suplementar 2 – Regressões lineares entre as concentrações de Cr ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ peso úmido) e o comprimento (cm) para cada espécie..... 61

RESUMO

Este estudo avaliou a dinâmica sazonal e espacial do cromo (Cr) em peixes de diferentes hábitos alimentares do lago Puruzinho, localizado na bacia do rio Madeira, determinando também a ingestão diária de Cr associada ao consumo desses peixes pela população. Essa avaliação foi realizada através da determinação dos teores de Cr nos peixes em quatro períodos hidrológicos distintos: enchente, águas altas, vazante e águas baixas. As determinações de Cr foram realizadas por meio de espectrometria de emissão ótica (ICP-OES). A ingestão diária de Cr decorrente do consumo dos peixes analisados foi determinada utilizando a concentração de Cr no músculo dos peixes e a taxa de consumo de cada espécie de peixe. A análise espacial foi realizada comparando-se os resultados obtidos nesse estudo com concentrações de Cr em peixes de diferentes hábitos alimentares capturados à montante do lago Puruzinho, no rio Madeira. Os hábitos alimentares e a sazonalidade influenciaram as concentrações de Cr nos peixes analisados de formas distintas ($p < 0.0001$). As medianas de concentração de Cr variaram entre $0,07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ na espécie *C. pleiozona* no período das águas altas e $0,62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ na espécie *M. duriventre* neste mesmo período. A dinâmica de Cr se mostrou fortemente associada à dinâmica de Fe nos peixes analisados ($R^2=0,49$, $p < 0,0001$). A concentração de Cr nos peixes reduziu com o aumento da razão isotópica de nitrogênio nos peixes, indicando que o Cr é biodiluído ao longo da cadeia trófica. Em relação a razão isotópica de carbono, foi observado que a espécie *M. duriventre* apresentou uma razão isotópica de carbono bem distinta de todas as outras espécies analisadas, indicando uma fonte de matéria orgânica diferente para a espécie. Os valores de ingestão diária de Cr decorrente do consumo dos peixes ficaram abaixo do valor recomendado pela ANVISA, $35 \mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$, em todas as espécies e períodos hidrológicos, exceto pela espécie *M. duriventre* no período de águas altas, cujo consumo resultou na ingestão de $55,5 \mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ de Cr. A avaliação da dinâmica espacial demonstrou que existe uma tendência de aumento na concentração de Cr ao longo do rio Madeira para os peixes carnívoros, detritívoros e herbívoros, o que pode indicar que contaminantes presentes no rio Madeira estão sendo carregados por longas distâncias e atingindo áreas preservadas, como o lago Puruzinho.

Palavras-chave: Cromo, peixes, pulso de inundação, hábitos alimentares, Amazônia.

ABSTRACT

This study evaluated the seasonal and spatial dynamics of chromium (Cr) in fish with different feeding habits from lake Puruzinho, located in the Madeira River basin, also determining the daily intake of Cr associated with the consumption of these fish by the population. This assessment was carried out by determining the levels of Cr in fish in four different hydrological periods: rising water, high water, falling water and low water. Cr determinations were performed using optical emission spectrometry (ICP-OES). The daily intake of Cr from the consumption of the fish was determined using the concentration of Cr in the fish muscle and the consumption rate of each fish species. The spatial analysis was performed comparing the results obtained in this study with Cr concentrations in fish of different feeding habits caught upstream of Puruzinho lake, in the Madeira River. Feeding habits and seasonality influenced Cr concentrations in fish in different ways ($p < 0.0001$). The medians of Cr concentration varied between $0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the species *C. pleiozona* in the period of high water and $0.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the species *M. duriventre* in that same period. The Cr dynamics was strongly associated with the Fe dynamics in the analyzed fish ($R^2 = 0.49$, $p < 0.0001$). The concentration of Cr in the fish decreased with the increase of the isotopic ratio of nitrogen, indicating that Cr is biodiluted along the food chain. Regarding the carbon isotope ratio, it was observed that *M. duriventre* presented a carbon isotope ratio different from all the other species analyzed, indicating a different source of organic matter for the species. The values of Cr daily intake resulting from fish consumption were below the value recommended by ANVISA, $35 \mu\text{g} \cdot \text{day}^{-1}$, in all species and hydrological periods, except for the species *M. duriventre* in the high water period, whose consumption resulted in ingestion of $55.5 \mu\text{g} \cdot \text{day}^{-1}$ of Cr. The spatial dynamics evaluation demonstrated that there is a tendency to increase the concentration of Cr along the Madeira River for carnivorous, detritivorous and herbivorous fish, which may indicate that contaminants present in the Madeira River are being carried over long distances and are reaching preserved areas, like the Puruzinho lake.

Keywords: Chromium, fish, flood pulse, feeding habits, Amazon.

ESTE ESTUDO

Essa dissertação é composta de (1) uma introdução geral, onde são abordados aspectos importantes a respeito da contaminação por Cr em peixes, e (2) um artigo científico, que contém os resultados desse trabalho.

1. Introdução Geral

A bacia amazônica, com uma área de captação superior a $7 \cdot 10^6$ km², é reconhecida como o maior sistema fluvial do mundo (Archer, 2005; Sioli, 2012). Composta por um conjunto de rios, lagos, igarapés e planícies de inundação, cerca de 20% do suprimento de água doce do planeta está na bacia amazônica (Santos & Santos, 2005). As planícies de inundação amazônicas cobrem uma área superior a 300.000 km² e estão sujeitas a inundações periódicas devido ao transbordamento sazonal dos rios da região (Junk, 1997).

O regime de precipitação na região amazônica é bem definido em duas estações: uma estação seca entre junho e outubro, e uma estação chuvosa entre dezembro e abril (Junk, 1997). A variação sazonal da precipitação, que caracteriza as estações seca e chuvosa, juntamente com o degelo anual da cordilheira dos Andes, impactam diretamente o nível d'água dos rios amazônicos, gerando quatro períodos hidrológicos bem definidos: vazante, águas baixas, enchente e águas altas (Junk et al., 1989; Jardim-Lima et al., 2005; Santos & Santos, 2005; Pereira, 2012).

No período de águas altas, quando os corpos hídricos atingem a maior altura da coluna d'água, o aumento dos níveis dos rios leva ao alagamento das planícies de inundação que os circundam, conectando-os com os lagos (Junk, 1997; Santos & Santos, 2005; Aprile & Darwich, 2013). As inundações periódicas e sazonais em sistemas formados por rio-planície de inundação são definidas pelo pulso de inundação e causam profundas modificações na estrutura da comunidade aquática e nas características físicas e químicas da água dessas planícies (Junk et al., 1989; Thomaz et al., 2007).

A flutuação dos níveis de água afeta a vegetação das planícies de inundação, pois com o aumento no nível das águas e, conseqüentemente, a entrada de sedimentos e nutrientes, a vegetação flutuante se desenvolve de forma intensa, formando os bancos de macrófitas que ocupam grandes áreas da superfície dos lagos inseridos nas planícies de inundação, conhecidos como lagos de várzea (Junk 1970; Junk, 1997; Magalhães et al., 2015). Os bancos de macrófitas servem de hábitat para diversos organismos, entre

eles, os peixes, que utilizam esses locais como fonte de abrigo e alimento (Junk, 1973; Junk & Howard-Williams, 1984; Lopes et al., 2011; Magalhães et al., 2015).

Os peixes também vão ser influenciados pelas inundações de forma direta, pois o aumento do nível d'água dos corpos hídricos causa uma expansão do habitat disponível para eles e a formação dos bancos de macrófitas gera uma grande quantidade de recursos, como plantas e sementes, que podem ser ingeridos pelas espécies. A queda no nível das águas tem efeito oposto, agrupando os peixes em espaços menores e reduzindo os recursos, exceto para as espécies predadoras, que se beneficiam da maior densidade de suas presas em um menor volume de água (Junk, 1970; Junk, 1997; Castello et al., 2015).

O ciclo biogeoquímico, a biodisponibilidade e acumulação de elementos traço também são influenciados pelos pulsos de inundação (Viers et al., 2004; Almeida et al., 2014; Carvalho et al., 2018; Azevedo et al., 2019; Pestana et al., 2019). As inundações são fatores importantes na dispersão de poluentes, pois ao transportar sedimentos e material particulado, elas acabam transportando os elementos associados a essas partículas para os ecossistemas aquáticos adjacentes aos grandes rios (Ciszewski & Grygar, 2016; Pestana et al., 2019). Os materiais transportados pelos rios podem ser originários de diversos processos, tanto naturais como antropogênicos. Os isótopos estáveis, especialmente o isótopo estável de carbono ($\delta^{13}\text{C}$), são ferramentas importante na determinação da origem da matéria orgânica no ambiente, pois diferentes fontes de matéria orgânica podem apresentar assinaturas isotópicas distintas, e essas diferenças permitem a identificação das fontes desses materiais (Golyshev et al., 1991; Nagel et al., 2009; Pestana et al., 2019; Xuan et al., 2020). Na região amazônica, o $\delta^{13}\text{C}$ pode ser utilizado para identificar a fonte da matéria orgânica e seus contaminantes associados transportados pelos corpos hídricos (Pestana, 2015).

Os corpos hídricos da região amazônica são classificados, de acordo com suas características físicas e químicas, em águas brancas, águas pretas e águas claras (Sioli, 2012). Os rios de águas brancas são caracterizados pela cor barrenta, grande quantidade de material particulado em suspensão e pH próximo a neutralidade, enquanto corpos de águas pretas têm como características principais a cor escura, alto teor de

matéria orgânica dissolvida, baixa quantidade de material particulado em suspensão e pH ácido. Corpos de águas claras, por sua vez, são transparentes ou esverdeados, podem ter pH ácido ou neutro e baixa quantidade de material particulado dissolvido (Junk, 1997). As inundações, ao conectarem os corpos hídricos com características distintas, causam alterações nos parâmetros físicos e químicos da água, afetando a mobilidade e biodisponibilidade dos elementos traço (Gambrell, 1994; Junk, 1997; Almeida et al., 2014).

1.1 Cromo

O cromo (Cr) é um metal de transição amplamente distribuído no ambiente, podendo ser encontrado em rochas, no solo, em plantas e animais (ATSDR, 2011). Esse elemento é usualmente encontrado no ambiente em sua forma trivalente (Cr III), mas também pode ocorrer nas formas bivalente (Cr II) e hexavalente (Cr VI), sendo que as formas mais estáveis são Cr III e Cr VI (Velma et al., 2009).

A ocorrência de Cr no ambiente pode ser decorrente de fontes naturais ou antropogênicas. Como fonte natural, o intemperismo de rochas com Cr em sua composição se destaca e, nesse sentido, o solo formado sob influência desse processo tende a ter também elevadas concentrações do elemento (Guertin et al., 2004). Entre as fontes antropogênicas, as indústrias de produção de aço e ligas metálicas, a mineração, processamento de couro, fabricação de tintas e o processamento de madeira se destacam (Pellerin & Booker, 2000; ATSDR, 2013; Jones et al., 2019; Tumolo et al., 2020). A queima de combustíveis fósseis também é uma fonte antropogênica de Cr no ambiente (ATSDR, 2013).

A toxicidade do Cr está diretamente relacionada ao seu estado de oxidação, sendo o Cr VI a forma mais tóxica e reconhecida como um carcinogênico para seres humanos, além de ter ação mutagênica e teratogênica (Miller, 2005; Velma et al., 2009; Mamyrbayev et al., 2015). Aliado à sua alta toxicidade, o Cr VI penetra facilmente membranas biológicas, sendo altamente solúvel e móvel no ambiente aquático (Oliveira, 2012; Bakshi & Panigrahi, 2018).

O Cr III, por sua vez, é considerado de baixa toxicidade, pois, ao contrário do Cr VI, tem dificuldade em penetrar membranas biológicas (Bakshi & Panigrahi, 2018). Por muitos anos o Cr III foi considerado um microelemento essencial para seres humanos, participando do metabolismo de carboidratos e gordura (Anderson, 1997), contudo, estudos mais recentes indicam que não há evidências para considerá-lo um elemento essencial (Di Bona et al., 2011; Vincent, 2017).

1.1.1 Cromo na Amazônia

Os estudos de contaminação ambiental na Amazônia são em sua maioria voltados para a contaminação por Hg (Malm et al., 1995; Pinheiro et al., 2007; Azevedo-Silva et al., 2016; Siqueira et al., 2018; Vieira et al., 2018; Azevedo et al., 2019; da Silva et al., 2019; Pestana et al., 2019), porém, teores elevados de outros elementos traço, como Cr, vêm sendo identificados na Amazônia e podem representar riscos para a população local (Lima, 2013; Sousa et al., 2015; Sousa et al., 2016; Ribeiro et al., 2017; Moreira et al., 2018).

Lima (2013) encontrou concentrações médias de Cr acima do permitido pela legislação ($0,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Brasil, 1965) em vinte e três espécies de peixes na bacia do rio Cassiporé, um rio de águas brancas da região amazônica. O autor relacionou os elevados valores encontrados ao teor natural de Cr no solo da bacia do rio Cassiporé, que chega aos $90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Lima, 2013). No sudoeste amazônico (Mato Grosso e Rondônia), Santos & Alleoni (2013) determinaram o valor de $44,8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ como o *background* Cr no solo, enquanto Carvalho (2011) encontrou valores de Cr no solo de $8,15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ na bacia do rio Madeira, o que demonstra uma grande heterogeneidade espacial na distribuição desse elemento na região.

Valores elevados de Cr em peixes também foram encontrados por Sousa et al. (2015), que observaram concentrações acima do permitido pela legislação em quatro espécies de peixes, de hábitos alimentares distintos, pescados no rio Madeira. Os peixes do referido estudo foram pescados à montante e à jusante de Porto Velho (RO) e os valores de Cr determinados nos peixes coletados à jusante da cidade foram maiores do que os valores de Cr determinados nos peixes coletados à montante. O enriquecimento de Cr nos peixes à jusante da cidade foi atribuído ao descarte de efluentes urbanos não

tratados e a presença de empresas de curtumes (processamento de couro) que liberam efluentes ricos em Cr (Sousa et al., 2015).

Também no estado de Rondônia, Sousa et al. (2016) determinaram concentrações de Cr em águas superficiais, material particulado em suspensão e sedimentos expostos aos efluentes de empresas de curtumes no rio Candeias, afluente do rio Jamari, que deságua no rio Madeira. As coletas foram realizadas em diferentes estações e à montante e à jusante das empresas de curtumes. Os resultados mostraram um enriquecimento de Cr nos sedimentos após a zona de descarga dos efluentes das empresas de curtumes, o que indica que essa atividade está sendo uma fonte de contaminação por Cr na região (Sousa et al., 2016).

As empresas de curtumes são uma importante fonte de contaminação por Cr no ambiente aquático (Pawlikowski et al., 2006). O efluente dessa atividade é rico em Cr III (Walsh & O'Halloran, 1996; Pawlikowski et al., 2006), a forma menos tóxica do elemento, e quando o efluente é despejado em corpos hídricos a tendência é que o Cr III, devido à sua baixa solubilidade, se acumule nos sedimentos (Kotas & Stasicka, 1999; Pawlikowski et al., 2006). Contudo, alterações nas características dos corpos hídricos, como a presença de óxidos de manganês, pode ocasionar a oxidação do Cr III em Cr VI, forma mais tóxica e biodisponível (Kotas & Stasicka, 1999; Dominik et al., 2007; Szalinska et al., 2010). A insolubilidade do Cr III reduz a sua biodisponibilidade, o que é benéfico para a biota, contudo, a acumulação de Cr nos sedimentos pode representar um risco para a fauna bentônica (Pawlikowski et al., 2006).

Na região amazônica, onde os peixes são importantes fontes de proteína animal e de renda para população, a expansão da atividade agropecuária é preocupante, uma vez que a quantidade de empresas de curtumes, e conseqüentemente, contaminação por Cr, também deve aumentar (Sousa et al., 2016).

1.2 Peixes na Amazônia: consumo e riscos associados

O consumo *per capita* de peixe no Brasil é consideravelmente mais baixo do que a média mundial, com um valor de 8,9 kg·ano⁻¹ (Sonoda & Shirota, 2012), enquanto a média mundial é de 20,3 kg·ano⁻¹ (FAO, 2017). Contudo, há grande heterogeneidade no

consumo desse item alimentar entre as regiões do Brasil, uma vez que a região norte apresenta um consumo *per capita* que pode chegar aos 34,7 kg·ano⁻¹ (IBGE, 2008). Especificamente na região amazônica, já foram registrados valores que ultrapassam 140 kg·pessoa⁻¹·ano⁻¹ (Oliveira et al., 2010; Isaac et al., 2015), um valor comparável a países como as Maldivas (142 kg·pessoa⁻¹·ano⁻¹), cuja população tem uma alimentação baseada em peixes e frutos do mar e registra um dos maiores consumos *per capita* de peixe do mundo (FAO, 2016).

O consumo de peixes é uma importante fonte de proteína para a população humana (Tacon & Metian, 2013). Contudo, a capacidade que os peixes têm de absorver poluentes do ambiente os tornam uma das principais via de contaminação para os seres humanos (Dougherty et al., 2000). A absorção de contaminantes pelos peixes pode ocorrer através da dieta ou através da pele e brânquias, pelo contato com a coluna d'água (Javed, 2005; Nhiwatiwa, 2011). Como a dieta é a principal fonte de contaminação para os peixes, o hábito alimentar das espécies pode influenciar na absorção e acumulação de elementos traço (Pourang, 1995; Andres, 2000). De acordo com Dutton & Fisher (2011), os itens alimentares que compõe a dieta dos peixes influenciam diretamente a taxa de assimilação e excreção desses elementos.

A variação de hábitos alimentares implica em uma variação na assinatura dos isótopos estáveis de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) nos peixes, uma vez que o $\delta^{15}\text{N}$ aumenta entre 3‰ e 4‰ no consumidor em relação ao seu alimento (Peterson & Fry, 1987; Post, 2002). Essa variação permite que o $\delta^{15}\text{N}$ seja utilizado para estimar níveis tróficos (Post, 2002). Os isótopos estáveis de nitrogênio são muito utilizados em estudos de contaminação envolvendo peixes, pois a associação entre o $\delta^{15}\text{N}$ e as concentrações de um contaminante é uma ferramenta importante para avaliar como os contaminantes se comportam ao longo da cadeia trófica (Marín-Guirao et al., 2008; Yohannes et al., 2013; Liu et al., 2018; Azevedo et al., 2021). Contaminantes que se biomagnificam, ou seja, aumentam de concentração ao longo da cadeia trófica, são especialmente preocupantes para a saúde humana (Ali & Khan, 2019).

Peixes têm sido amplamente utilizados como bioindicadores de contaminação por elementos traço em ambientes aquáticos (Naigaga et al., 2011; Van der Oost et al., 2013;

Atobatele & Olutona, 2015; Mataba et al., 2016; Benzer, 2017; Jiang et al., 2018). A capacidade de acumular contaminantes, sensibilidade a poluição, longevidade e tamanho são fatores que fazem dos peixes bons bioindicadores de contaminação ambiental (Chovanec et al., 2003). A utilização dos peixes como bioindicadores é interessante também porque, além de refletirem as condições ambientais, o monitoramento da contaminação nesses organismos é uma ferramenta para garantir a segurança alimentar da população (Plesl et al., 2017).

Os estudos de avaliação da contaminação por elementos traço que utilizam peixes como bioindicadores quantificam as concentrações desses elementos em diversos tecidos e vísceras, como rim, guelra, fígado e músculo. O músculo, por ser a parte do peixe mais consumida por seres humanos, é o foco da maioria dos estudos (Dougherty et al., 2000; Jovičić et al., 2015; Silva et al., 2016).

De acordo com a USEPA (2016), avaliação de risco é o processo que estima a natureza e a probabilidade de efeitos adversos à saúde em seres humanos que estão expostos a produtos químicos, agora ou no futuro. Modelos matemáticos desenvolvidos pela USEPA são utilizados em muitos estudos para avaliar o risco de danos à saúde humana decorrente do consumo de alimentos contaminados (Basim & Khoshnood, 2016; Caldas et al., 2016; Mataba et al., 2016; Azevedo et al., 2018; Gusso-Choueri et al., 2018; Jiang et al., 2018; USEPA, 2019).

A quantificação de contaminantes e a avaliação do risco associado ao consumo de peixes tem grande importância, uma vez que podem fornecer informações sobre ameaças à saúde humana (Atobatele & Olutona, 2015; Alipour & Banagar, 2018). Na região amazônica, onde a população tem no peixe sua principal fonte de proteína animal (Isaac et al., 2015) e altas concentrações de Cr já foram identificadas nesses animais em estudos anteriores (Lima, 2013; Sousa et al., 2015; Sousa et al., 2016; Ribeiro et al., 2017; Moreira et al., 2018), essa avaliação se torna ainda mais crítica.

**Dinâmica de Cromo em peixes do lago Puruzinho, Amazônia
Occidental: Influência da sazonalidade, hábitos alimentares, avaliação
de risco e avaliação espacial**

Dinâmica de Cromo em peixes do lago Puruzinho, Amazônia Ocidental: Influência da sazonalidade, hábitos alimentares, avaliação de risco e avaliação espacial

Resumo

Este estudo avaliou a dinâmica sazonal e espacial do Cr (cromo) em peixes de diferentes hábitos alimentares do lago Puruzinho, localizado na bacia do rio Madeira, determinando também a ingestão diária de Cr associada ao consumo desses peixes pela população. Os hábitos alimentares e a sazonalidade influenciaram as concentrações de Cr nos peixes analisados de formas distintas ($p < 0.0001$). As medianas de concentração de Cr variaram entre $0,07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ na espécie *C. pleiozona* no período das águas altas e $0,62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ na espécie *M. duriventre* neste mesmo período. A dinâmica de Cr se mostrou fortemente associada à dinâmica de Fe nos peixes analisados ($R^2=0,49$, $p < 0,0001$). A concentração de Cr nos peixes reduziu com o aumento de $\delta^{15}\text{N}$, indicando que o Cr é biodiluído ao longo da cadeia trófica. Os valores de ingestão diária de Cr decorrente do consumo dos peixes ficaram abaixo do valor recomendado pela ANVISA, $35 \mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$, em todas as espécies e períodos hidrológicos, exceto pela espécie *M. duriventre* no período de águas altas, cujo consumo resultou na ingestão de $55,5 \mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ de Cr. A avaliação da dinâmica espacial demonstrou que existe uma tendência de aumento na concentração de Cr ao longo do rio Madeira para os peixes carnívoros, detritívoros e herbívoros, o que pode indicar que contaminantes presentes no rio Madeira estão sendo carregados por longas distâncias e atingindo áreas preservadas, como o lago Puruzinho.

Palavras-chave: Cromo, peixes, pulso de inundação, hábitos alimentares, Amazônia.

1. Introdução

A contaminação ambiental por cromo (Cr) causa crescente preocupação, uma vez que esse metal representa perigo para a fauna e flora (Oliveira, 2012; Choppala et al., 2013). Na Amazônia, a maioria dos estudos de contaminação ambiental são dedicados ao ciclo do Hg devido ao histórico de contaminação desse elemento na região (Nriagu et al., 1992; Malm et al., 1995; Pinheiro et al., 2007; Almeida et al., 2014; Pestana et al., 2019; Azevedo et al., 2021). Em contrapartida, poucas informações estão disponíveis sobre a contaminação por Cr e outros elementos que também podem ser prejudiciais à saúde humana e a qualidade ambiental (Sousa et al., 2015).

O Cr ocorre no ambiente principalmente em suas formas trivalente (Cr III) e hexavalente (Cr VI) (Velma et al., 2009; Choppala et al., 2013). A especiação do Cr é determinante para sua biodisponibilidade, mobilidade e toxicidade, sendo a espécie Cr III considerada menos solúvel e de baixa toxicidade, enquanto o Cr VI é mais móvel, solúvel, biodisponível e tóxico, apresentando efeitos cancerígenos e mutagênicos (Choppala et al., 2013; Mamyrbayev et al., 2015; Mishra & Bharagava, 2016).

As fontes de Cr no ambiente podem ser naturais ou antropogênicas. Entre as fontes naturais, o intemperismo de rochas com Cr em sua composição é predominante (ATSDR, 2013). Entre as fontes antropogênicas, se destacam a produção de aço, conservação de madeira, produção de tintas, empresas de curtumes e cromagem (Zhitkovic, 2011; ATSDR, 2013).

As empresas de curtumes são consideradas uma das maiores fontes de Cr para o ambiente, devido aos lançamentos de efluentes resultantes do processamento de couro que possuem altas concentrações desse elemento (Barnhart, 1997; Belay, 2010; Thakur et al., 2016). A espécie de Cr predominante nos efluentes de curtume é o Cr III, contudo, alterações nas características físicas e químicas dos corpos hídricos receptores desse efluente ou a presença de óxidos de manganês pode levar a oxidação do Cr III à Cr VI, espécie mais tóxica, móvel e disponível para a biota (Kotas & Stasicka, 1999; Pawlikowski et al., 2006; Dominik et al., 2007; Szalinska et al., 2010). No rio Madeira, o material particulado em suspensão (MPS) é rico em Mn (Costa Júnior, 2017). A presença de compostos de Fe no ambiente é outro fator que pode afetar a mobilidade e

disponibilidade do Cr (Chebeir & Liu, 2018), pois esse elemento pode ser adsorvido e coprecipitado por compostos de Fe em ambientes aquáticos (Rai et al., 1987; Richard & Bourg, 1991; Charlet & Manceau, 1992).

Na Amazônia, concentrações elevadas de Cr foram registradas em peixes, na água e em sedimentos em áreas próximas a descarga de efluentes de curtumes (Sousa et al., 2015; Sousa et al., 2016). Concentrações elevadas de contaminantes em peixes são especialmente preocupantes na região amazônica, uma vez que o consumo de peixes *per capita* na região está entre os maiores do mundo, registrando-se média de $406 \text{ g}\cdot\text{pessoa}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$ (Oliveira et al., 2010). Apesar de sua importância para a população amazônica enquanto fonte de alimento e renda, o consumo de peixes pode trazer riscos à população humana, pois esses organismos são eficientes na absorção de contaminantes dos corpos hídricos (Dougherty et al., 2000). A absorção de contaminantes por peixes pode se dar através da dieta ou diretamente pelo contato com a coluna d'água, através da pele e das guelras. Contudo, a dieta é considerada a principal fonte de contaminação para esses animais (Javed, 2005; Nhiwatiwa, 2011).

A ANVISA, agência nacional de vigilância sanitária, regulamenta os limites de contaminantes em alimentos no Brasil. Atualmente não existe um limite de concentração de Cr em alimentos em vigor, devido à revogação do Decreto nº 55871, de 26 de março de 1965 (Brasil, 2019), que estabelecia como valor máximo $0,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Cr em qualquer alimento. Contudo, a ANVISA recomenda a ingestão diária de $35 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ de Cr para a população (2005). Para fins de avaliação de risco, limites de concentrações de contaminantes em alimentos a serem comercializados impostos por lei podem não estimar de forma apropriada o risco que o consumo de um determinado alimento pode acarretar, pois consideram dados genéricos de frequência de ingestão dos mesmos, podendo sub ou super estimar o risco para uma população. Neste sentido, a determinação da ingestão diária de um elemento utilizando dados de frequência alimentar da população avaliada reflete de forma mais adequada o risco a que esta população está exposta.

A dinâmica de contaminantes em ecossistemas aquáticos na região amazônica pode ser afetada pela sazonalidade, uma vez que a região está sujeita ao pulso de

inundação: enchentes periódicas que causam profundas modificações na estrutura da comunidade aquática, no ciclo biogeoquímico e na biodisponibilidade e acumulação de elementos traço (Junk et al., 1989; Viers et al., 2004; Thomaz et al., 2007; Almeida et al., 2014; Carvalho et al., 2018; Azevedo et al., 2019; Pestana et al., 2019). O ciclo do Cr na Amazônia não é completamente elucidado, portanto, pouco se sabe sobre como esse elemento é afetado pela variação hidrológica na região. Além disso, a influência do pulso de inundação sobre as fontes de Cr para os peixes também é desconhecida, e, sendo assim, não se sabe o efeito da sazonalidade sobre a acumulação de Cr em peixes de diferentes hábitos alimentares.

Diante disso, o objetivo deste estudo é avaliar a dinâmica sazonal e espacial do Cr (cromo) em peixes de diferentes hábitos alimentares do lago Puruzinho, determinando também a ingestão diária de Cr associada ao consumo desses peixes pela população. Nossas hipóteses são três: (I) Considerando a presença de empresas de curtumes próximas à cidade de Porto Velho que lançam seus efluentes ricos em Cr em rios que fluem para o rio Madeira (Sousa et al., 2015), as notícias de outras empresas de pequena escala que também lançam seus efluentes nesse rio (Sousa et al., 2015) e a expansão das atividades pecuárias da região Amazônica que tendem a aumentar o número de empresas de curtume na região (Sousa et al., 2016), espera-se encontrar concentrações elevadas desse contaminante nos peixes do lago Puruzinho, comparativamente aos peixes de hábitos alimentares similares coletados no rio Madeira, uma vez que os lagos, ao contrário dos rios, são ambientes propícios a acumulação de contaminantes (Esteves, 1988; García, 1999). (II) Considerando que o Cr (III), principal forma química liberada pelas indústrias de curtume, é um metal insolúvel em água e tende a se acumular nos sedimentos (Kotaš e Stasicka, 2000; Pawlikowski et al., 2006), é esperado que peixes com hábitos detritívoros (que estão em íntimo contato com o sedimento) apresentem maiores concentrações do metal em relação aos demais hábitos alimentares. Finalmente, (III) considerando as mudanças provocadas pelo pulso de inundação sobre a disponibilidade de recursos alimentares e os habitats disponíveis para os peixes (Junk, 1997), é esperado que as concentrações de Cr nesses organismos variem em função dos hábitos alimentares e da sazonalidade. Portanto, uma vez que o período de cheia representa um momento de abundância de recursos para peixes herbívoros e detritívoros

(Almeida et al., 1993; Junk, 1997), espera-se que esses organismos apresentem as maiores concentrações de Cr nesse período. Para os peixes carnívoros e piscívoros, que têm maior eficiência de predação no período de seca (Junk, 1997; Winemiller, 2004), é esperado que as maiores concentrações de Cr também sejam identificadas nesse período.

2. Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo se localiza na bacia do rio Madeira, abrangendo desde Jaci-Paraná, distrito de Porto Velho, (9°27'26.0"S; 64°25'22.0"W) até o lago Puruzinho (7°21'43.9"S; 63°03'35.9"W) (Figura 1), compreendendo a região metropolitana de Porto Velho, capital do estado de Rondônia e maior cidade do estado, com uma população estimada em 539.354 habitantes (IBGE, 2020).

O rio madeira é um rio de águas brancas (Sioli, 1984), que tem como características principais a cor marrom, grande quantidade de material particulado em suspensão e pH neutro (Junk, 1997). O rio Madeira é o segundo maior afluente do rio Amazonas (Vauchel et al., 2017), podendo contribuir com até 50% da carga de sedimentos desse rio (Laraque et al., 2005; Vauchel et al., 2017). Os sedimentos do rio Madeira têm, predominantemente, origem andina, sendo decorrentes da erosão da cordilheira dos andes. Contudo, a erosão das margens do rio Madeira também é uma fonte importante de sedimentos para o rio (Guyot et al., 2007; Carvalho et al., 2018).

Localizado à margem esquerda do rio Madeira, o lago Puruzinho é um ecossistema de água preta, cujas principais características são águas escuras e transparentes, alto teor de matéria orgânica dissolvida, pH ácido e baixa quantidade de material particulado (Junk, 1997; Oliveira, 2006). O lago Puruzinho se conecta com o rio Madeira por meio de um canal estreito (Figura 1) e sofre uma variação acentuada no nível da água entre as estações (Oliveira, 2006). Nas águas altas, a coluna d'água do lago Puruzinho pode chegar a 12,5 m e nas águas baixas esse valor pode cair para 0,30 m (Almeida et al., 2014).

O Lago Puruzinho se localiza no município de Humaitá, Amazonas. No entorno do lago, de acordo com o censo realizado em 2017, vive uma população de 123 pessoas (Pedrosa, 2018). A população local depende da agricultura de subsistência, da caça e da pesca. O peixe é a principal fonte de proteína animal, sendo consumido diariamente (Oliveira, 2006; Fonseca, 2007).

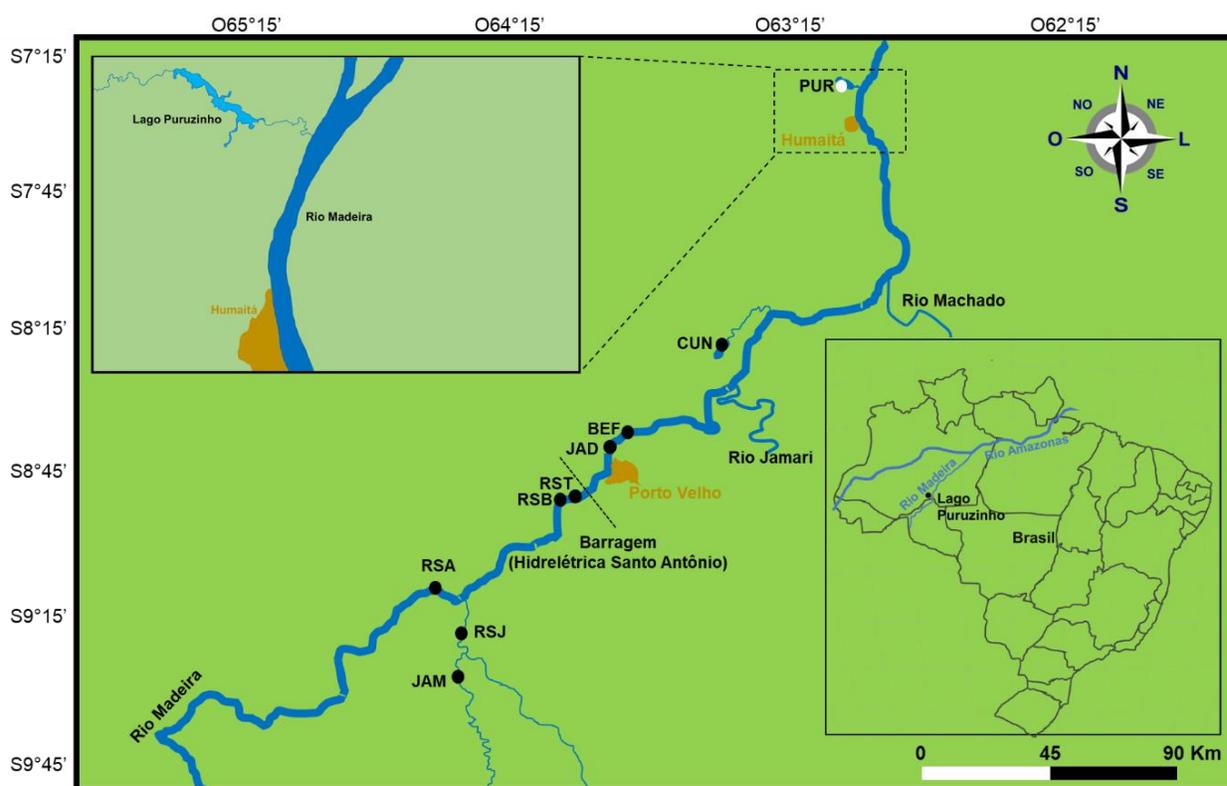


Figura 1 – Mapa da área de estudo representando o rio Madeira e o lago Puruzinho, com as demarcações dos pontos das coletas realizadas por Sousa et al. (2015) (pontos pretos), JAM (à montante do distrito Jaci Paraná), RSJ (à jusante do distrito Jaci Paraná), RSA (porção superior do reservatório Santo Antônio), RSB (porção inferior do reservatório Santo Antônio), RST (igarapé Jatuarana I), JAD (igarapé Jatuarana II), BEF (foz do igarapé Belmont), CUN (lago Cuniã), e o ponto de coleta do presente trabalho PUR (lago Puruzinho; ponto branco). As cidades de Porto Velho e Humaitá também estão representadas.

Os pontos de coleta à montante do lago Puruzinho (JAM, RSJ, RSA, RSB, RST, JAD, BEF E CUN) são pertencentes ao trabalho realizado por Sousa et al. (2015). O ponto de coleta PUR, localizado no lago Puruzinho, é relativo à coleta realizada para o presente estudo.

2.2 Análise Espacial

A análise da variação espacial das concentrações de Cr em um transecto formado entre o rio Madeira até o lago Puruzinho foi realizada extraíndo-se os dados de Sousa et al. (2015) que determinaram a concentração de Cr em peixes de diferentes hábitos alimentares na bacia do rio Madeira. Dos pontos coletados por Sousa et al. (2015) (Figura 1), dois se localizam no rio Jaci Paraná, um à montante (JAM) e outro à jusante do distrito Jaci Paraná (RSJ). Outros dois pontos se localizam no reservatório da usina hidrelétrica Santo Antônio, um na porção superior (RSA) e outro na porção inferior (RSB). Três pontos se localizam em igarapés ligados ao rio Madeira, Jatuarana I (RST), Jatuarana II (JAD) e a foz do igarapé Belmont (BEF), e outro ponto se localiza no lago Cuniã (CUN).

As concentrações de Cr em peixes de diferentes hábitos alimentares determinadas por Sousa et al. (2015) e as concentrações de Cr determinadas nesse trabalho foram plotadas em função da distância, em km, até o lago Puruzinho.

Foram traçadas linhas de tendência (derivadas de regressões lineares) para se observar o comportamento das concentrações de Cr nos peixes analisados ao longo do rio Madeira.

2.3 Amostragem e Tratamento das Amostras

A amostragem dos peixes analisados nesse estudo ocorreu entre dezembro/2016 e dezembro/2018 e foram coletados peixes de quatro espécies diferentes nos períodos de enchente, águas altas, vazante e águas baixas no lago Puruzinho (Tabela 1).

Tabela 1. Espécies de peixes coletadas, seus hábitos alimentares e N amostral para cada período hidrológico avaliado do lago Puruzinho.

Espécies	<i>Cichla pleiozona</i>	<i>Prochilodus nigricans</i>	<i>Serrasalmus rhombeus</i>	<i>Mylossoma duriventre</i>
Nome Comum	Tucunaré	Curimatã	Piranha	Pacu
Hábito Alimentar	Carnívoro	Detritívoro	Piscívoro	Herbívoro
Enchente	6	16	10	13
Águas Altas	19	20	10	20
Vazante	35	20	20	25
Águas Baixas	12	20	14	6
N Total			266	

Um total de 266 espécimes foram obtidos por meio do apoio de pescadores da região. Após a coleta, os espécimes foram medidos e pesados para obtenção do comprimento e peso total. O tecido muscular foi extraído com bisturi, pinça e tesoura inoxidáveis na Universidade Federal de Rondônia e enviados ao Laboratório de Ciências Ambientais (LCA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, onde foram liofilizados (FreezeDry System, Labconco, Model 7522900, Kansas City, USA) e macerados utilizando gral e pistilo.

2.4 Análises Químicas

2.4.1 – Determinação de Cr

A determinação de Cr no músculo utilizou uma alíquota de 1,0 g (peso seco) de cada amostra e ocorreu da seguinte maneira (adaptado de Paez-Osuna *et al.*, 1995): Foi realizada uma extração com 2 mL de H₂O₂ 30% e 10 mL de HNO₃ 65%; as amostras sofreram aquecimento progressivo começando a 60 °C e terminado a 120 °C até a completa solubilização; Em seguida, o volume foi reduzido para 1 mL à 160 °C; Foi então realizada uma filtração com filtro Whatman® 40 seguida de aferição do volume até 35 mL com HNO₃ 0,5 N.

A determinação de Cr no extrato final ocorreu através de espectrometria de emissão ótica (ICP-OES 720 ES, Varian, Australia) com limite de detecção de 0,267 µg·g⁻¹ peso seco.

O controle de qualidade analítico das amostras foi avaliado por meio de réplicas, brancos e pela utilização do material certificado de referência (DORM-3). As análises foram realizadas no Laboratório de Ciências Ambientais. O coeficiente de variação entre réplicas foi < 5% e a recuperação foi de 95%±0,01 (n=3).

Os resultados das análises foram apresentados em µg·g⁻¹ peso úmido, considerando-se uma composição de 77% de água para a espécie *Cichla pleiozona* (Inhamuns e Franco, 2008), 73% de água para *Mylossoma duriventre* (Melo et al., 2019), 71% de água para *Prochilodus nigricans* (Inhamuns, 2000) e 78% de água para *Serrasalmus rhombeus* (Hiane et al., 2002). O peso e o comprimento das espécies não apresentaram relação com os teores de Cr (Material Suplementar 1 e 2) e, portanto, nenhuma padronização foi necessária para apresentação dos resultados.

2.4.2 – Determinação de Fe

Os dados da concentração de Fe nos peixes foram extraídos de Oliveira et al. (em preparação), que foi realizado concomitantemente a esse estudo, e utilizou o mesmo processo de digestão e os mesmos espécimes avaliados nesse estudo, com limite de detecção de $0,467 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ peso seco e recuperação de $78\%\pm 0,03$.

2.4.3 – Determinação de Isótopos de C e N

Os dados de isótopos de Carbono e Nitrogênio nos peixes foram extraídos de Azevedo et al. (2021). Para a determinação da assinatura isotópica de C e N, Azevedo et al. (2021) utilizaram uma alíquota do músculo dorsal dos peixes, liofilizada (Sistema FreezeDry, Labconco, Modelo 7.522.900, Kansas City, EUA) e macerada. A análise de isótopos estáveis foi realizada em um espectrômetro de massa Thermo Finnigan Delta V Advantage (espectrômetro de massa de razão isotópica, IRMS, Thermo Scientific, Milão, Itália) acoplado a um analisador elementar orgânico Flash 2000 (Thermo Scientific, Milão, Itália). Pee Dee Belemnite (PDB) e nitrogênio atmosférico foram usados como padrões para $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, respectivamente. O coeficiente de variação entre réplicas foi $\pm 0.2\text{‰}$ para $\delta^{13}\text{C}$ e $\pm 0.3\text{‰}$ para $\delta^{15}\text{N}$. A assinatura do $\delta^{13}\text{C}$ foi corrigida para remover a influência dos lipídios (McConnaughey & McRoy, 1979).

2.5 Determinação da Ingestão de Cr

A determinação da ingestão diária de Cr associada ao consumo dos peixes do lago Puruzinho foi realizada através da multiplicação da concentração de Cr nos peixes (Tópico 2.3.1) com a taxa média de ingestão diária, em $\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$, para as quatro espécies de peixes analisados neste estudo.

A taxa média de ingestão diária de peixes, considerando todas as espécies consumidas na região de estudo, é de $406 \text{g}\cdot\text{pessoa}\cdot\text{dia}^{-1}$ (Oliveira et al., 2010). Considerando apenas as quatro espécies escolhidas para esse estudo, a taxa média de ingestão diária é de $40,4 \text{g}\cdot\text{pessoa}\cdot\text{dia}^{-1}$. Através dos dados brutos de Oliveira et al. (2010) foi possível determinar a taxa média de ingestão diária das quatro espécies de peixes analisadas nesse estudo (Figura 2).

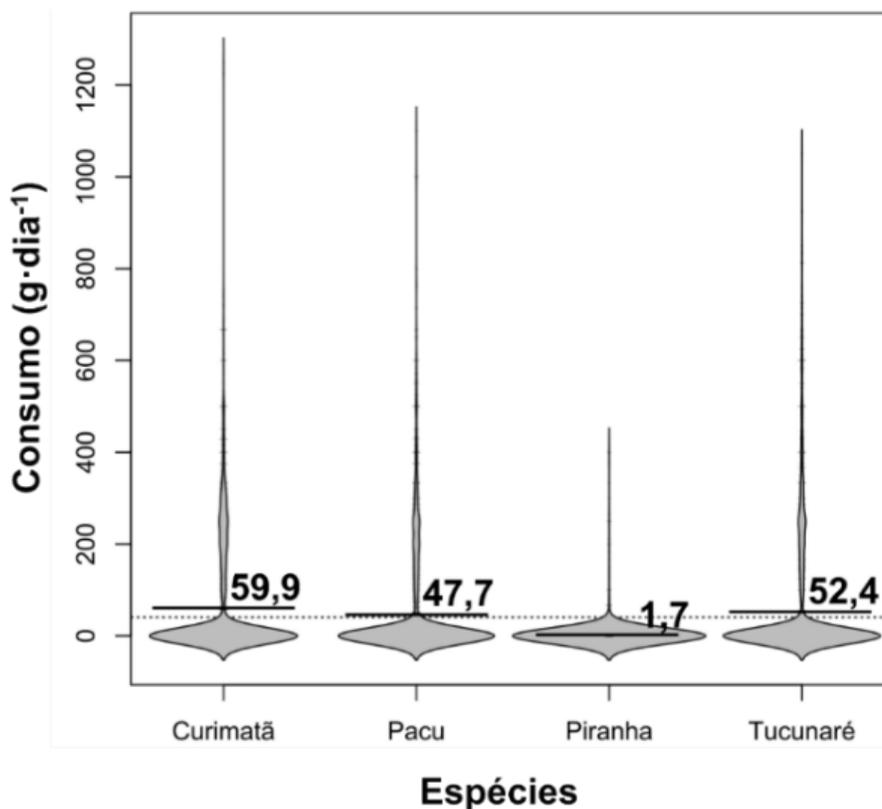


Figura 2 - Taxa média de ingestão diária, em $\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$, para Curimatã (*Prochilodus nigricans*), Pacu (*Mylossoma duriventre*), Piranha (*Serrasalmus rhombeus*) e Tucunaré (*Cichla pleiozona*). As barras pretas representam a taxa média de ingestão diária para cada espécie, a linha pontilhada representa a taxa média de ingestão diária considerando as quatro espécies ($40,4 \text{ g}\cdot\text{pessoa}\cdot\text{dia}^{-1}$) e o sombreado cinza representa a distribuição dos dados. A distribuição dos dados apresenta uma forte assimetria. Os dados foram obtidos em colaboração com Oliveira et al., 2010.

Não foi possível encontrar trabalhos que apresentassem valores de especiação de Cr em peixes devido à alta dificuldade da realização de especiação química para esse elemento com os métodos disponíveis (Hamilton et al., 2018). Contudo, é esperado que o Cr VI, ao ser ingerido, seja reduzido a Cr III no ambiente ácido do estômago (Milačič & Štupar, 1994; Vacchina et al., 2015; Hamilton et al., 2018). Portanto, para fins de avaliação de risco de ingestão, a concentração de Cr total determinada no músculo do peixe analisado foi considerada Cr III.

2.6 Análise Estatística

As análises estatísticas foram realizadas no programa estatístico R (R Core Team, 2021).

Foi realizada uma ANOVA Two-Way (função aov, base package, R Core Team, 2021), para avaliar o efeito da sazonalidade, dos hábitos alimentares e da interação entre essas variáveis sobre as concentrações de Cr no músculo dos peixes.

Foram realizadas também regressões lineares (função aov, base package, R Core Team, 2021) entre as concentrações de Cr, as concentrações de Fe e as assinaturas isotópicas de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$), de forma a identificar associações entre elas. Nas análises de regressão entre as concentrações de Cr e os isótopos estáveis, a distribuição Cr-isótopo foi representada através de elipses (função data.ellipse, car package; Fox and Weisberg 2019) construídas à 1 desvio-padrão de distância de seu centroide (intervalo de confiança de 68%).

Uma função de verossimilhança máxima (boxcox, MASS package, Venables e Ripley, 2002) foi utilizada para realizar transformações nos dados, quando necessário, de forma a atender as premissas das regressões lineares realizadas (normalidade, linearidade, homocedasticidade). As regressões foram validadas utilizando gráficos diagnósticos (Altman & Krzywinski, 2016).

Para a avaliação do risco de ingestão de Cr, os dados da concentração e ingestão do elemento foram combinados utilizando análises combinatórias empíricas (Método de Monte Carlo; função expand.grid; base package; Khitalishvili, 2016) de forma a simular todos os cenários possíveis de ingestão.

Em todos os casos foi assumido um erro tipo I a priori de 5% ($\alpha = 0,05$).

3. Resultados

3.1 Relação entre as concentrações de Cr, hábitos alimentares e sazonalidade

As concentrações de Cr nos peixes do lago Puruzinho variaram de forma diferente ao longo dos períodos hidrológicos de acordo com seus hábitos alimentares (ANOVA two-way interaction; $p < 0,001$) (Figura 3).

Os menores e maiores valores de mediana das concentrações de Cr observados foram $0,07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ na espécie *C. pleiozona* no período das águas altas e $0,62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ na espécie *M. duriventre* neste mesmo período.

Para as espécies *M. duriventre* e *P. nigricans*, foi observado um padrão similar de aumento na concentração de Cr na estação cheia (enchente e águas altas) e uma redução nos valores de Cr na estação seca (vazante e águas baixas). Apesar de seguirem um padrão de variação similar ao longo dos períodos hidrológicos, *M. duriventre* registrou uma queda mais expressiva na concentração de Cr entre a vazante e as águas baixas (72% menor) quando comparado com *P. nigricans* (13% menor) no mesmo período.

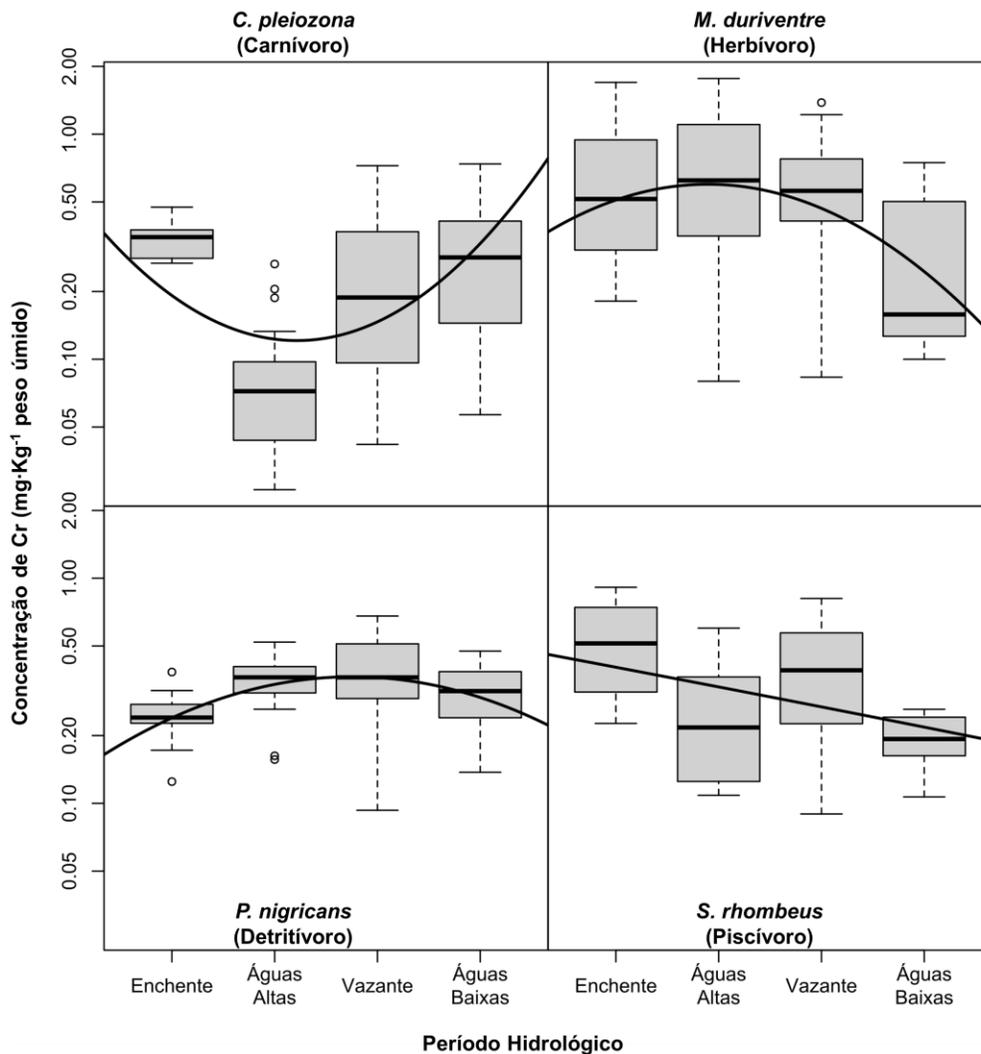


Figura 3 – Concentrações de Cr ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ peso úmido) em *Cichla pleiozona* (carnívoro), *Mylossoma duriventre* (herbívoro), *Prochilodus nigricans* (detritívoro) e *Serrasalmus rhombeus* (piscívoro) por períodos hidrológicos. As linhas contínuas representam a tendência das medianas ao longo dos períodos hidrológicos, extraídas de regressões quadráticas.

As concentrações de Cr em *C. pleiozona* se comportaram de maneira oposta ao observado em *M. duriventre* e *P. nigricans*, pois na estação seca a concentração do Cr aumentou, enquanto na estação cheia a concentração desse elemento diminuiu. Apesar da tendência de redução na concentração de Cr com o aumento no nível das águas, o maior teor de Cr observado em *C. pleiozona* foi observado no período de enchente.

As concentrações de Cr em *S. rhombeus*, uma espécie piscívora, seguiram um padrão distinto a todas as outras espécies analisadas, com as maiores medianas registradas nos períodos enchente e vazante, e as menores foram observadas nas águas altas e águas baixas.

A dinâmica de Cr se mostrou fortemente associada à dinâmica de Fe no tecido muscular dos peixes analisados ($R^2 = 0,49$, $p < 0,0001$) (Figura 4).

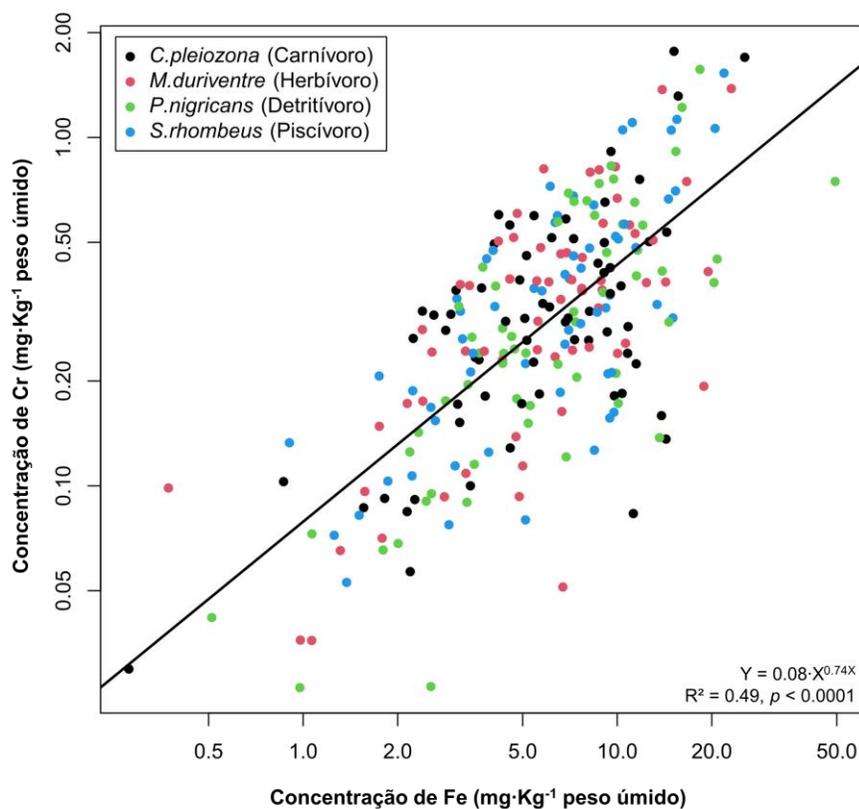


Figura 4 – Regressão linear entre as concentrações de Cr e as concentrações de Fe nos peixes analisados.

3.2 Relação entre as concentrações de Cr e as razões isotópicas de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$)

As concentrações de Cr foram relacionadas com o nível trófico dos peixes ($\delta^{15}\text{N}$) e com as fontes de matéria orgânica para os mesmos ($\delta^{13}\text{C}$) (Figura 5).

A razão isotópica de nitrogênio aumentou gradualmente entre as espécies de peixes analisadas (*M. duriventre* > *P. nigricans* > *C. pleiozona* > *S. rhombeus*). Foi observada uma tendência de redução nas concentrações de Cr como aumento do nível trófico ($\delta^{15}\text{N}$) nos peixes analisados, indicando que o Cr é biodiluído ao longo da cadeia trófica.

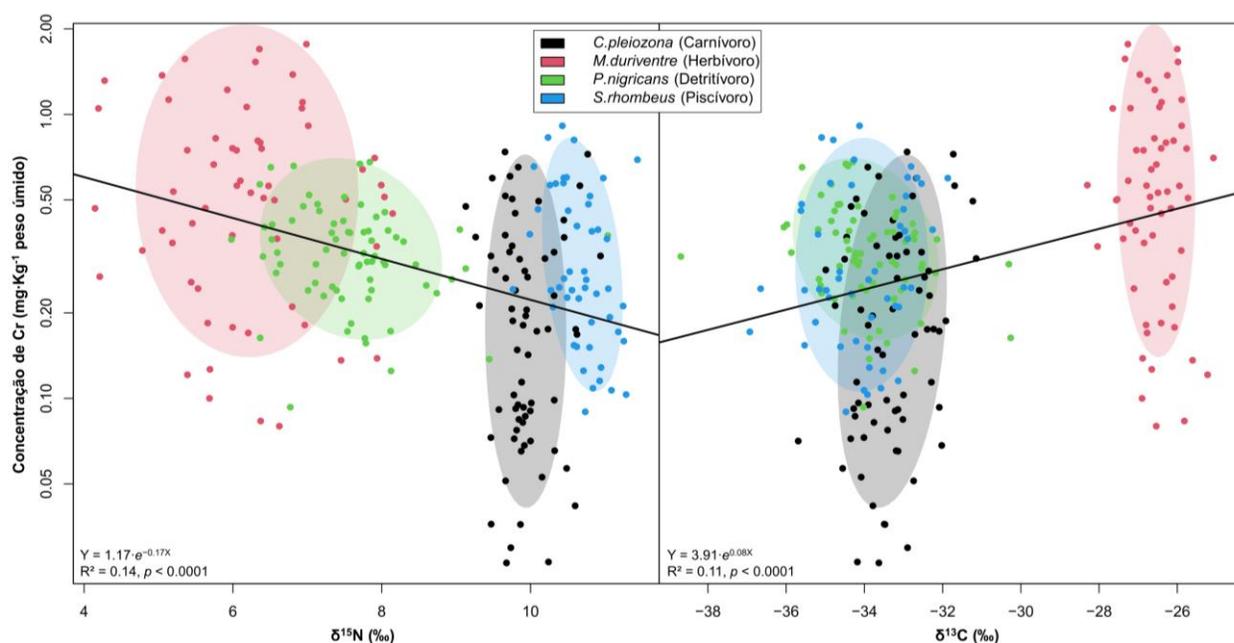


Figura 5 – Associações entre as concentrações de Cr com as assinaturas isotópicas de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$) nos peixes do lago Puruzinho analisados nesse estudo. As elipses foram construídas à 1 desvio-padrão do seu centroide, representando um intervalo de confiança de 68%. As estatísticas das regressões (equação, R^2 e valor de p) estão dentro de cada gráfico.

Em relação às fontes de matéria orgânica ($\delta^{13}\text{C}$), foi observada uma sobreposição entre as espécies *P. nigricans*, *C. pleiozona* e *S. rhombeus*, enquanto a espécie *M. duriventre* apresentou uma razão isotópica de carbono bem distinta de todas as outras

espécies analisadas, indicando uma fonte diferente de matéria orgânica para *M. duriventre*.

3.3 Ingestão diária de Cr pela população local

Utilizando os valores de concentração de Cr em peixes (Figura 3) e combinando esses valores com o consumo *per capita* das espécies analisadas pela população que vive ao entorno do lago Puruzinho (Figura 2; Oliveira et al., 2010), foi possível determinar os valores de ingestão diária de Cr decorrente do consumo dos peixes analisados (Figura 6).

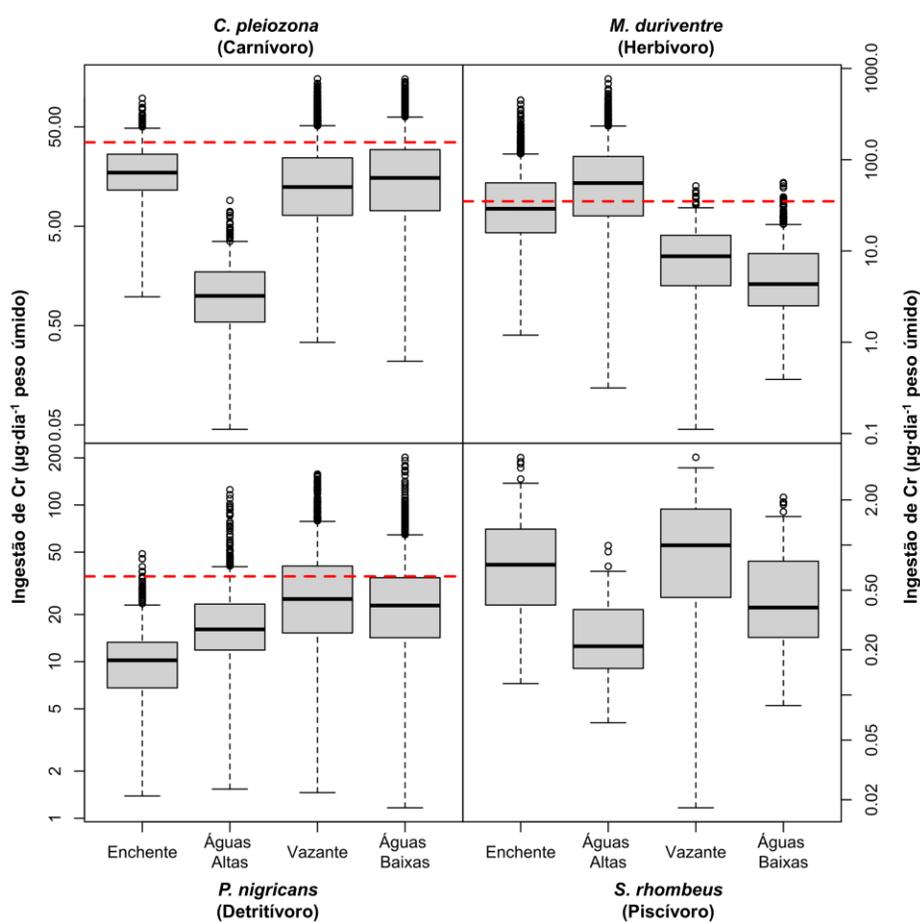


Figura 6 – Ingestão diária de Cr ($\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ peso úmido) pela população que vive ao entorno do lago Puruzinho. Os valores de Cr determinados nos peixes (Figura 3) foram combinados com os valores de ingestão de cada uma das espécies pela população do lago Puruzinho (Figura 2; Oliveira et al., 2010) através de análises combinatórias empíricas (Método de Monte Carlo). Esses valores foram comparados com a Ingestão Diária Recomendada para Adultos, $35 \mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ (linha vermelha tracejada), determinado pela ANVISA (2005).

As medianas de ingestão de Cr decorrente do consumo dos peixes analisados variaram entre $0,21 \mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ na espécie *S. rhombeus* no período das águas altas, e $55,5 \mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ na espécie *M. duriventre*, também no período de águas altas.

As espécies *M. duriventre* e *P. nigricans* foram as maiores responsáveis pela ingestão de Cr pela população. No período das águas altas, o consumo de *M. duriventre* acarreta em uma ingestão de Cr acima da ingestão diária recomendada pela ANVISA (2005).

As menores medianas de ingestão de Cr foram associadas ao consumo da espécie *S. rhombeus*, cujos valores de ingestão de Cr decorrentes do consumo estão 98% abaixo, em média, da ingestão diária recomendada.

3.4 Análise Espacial das Concentrações de Cr em peixes de diferentes hábitos alimentares

As concentrações de Cr dos peixes analisados foram comparadas as concentrações de Cr em peixes com os mesmos hábitos alimentares determinadas por Sousa et al. (2015), com o objetivo de observar a dinâmica espacial do Cr em peixes na bacia do rio Madeira (Figura 7).

Sousa et al. (2015) analisou as concentrações de Cr em peixes à montante e à jusante de Porto Velho e reportou um aumento na concentração de Cr nos peixes coletados à jusante da cidade. Observando os dados de peixes pescados no lago Puruzinho é possível observar que a tendência de aumento nas concentrações de Cr ao longo do rio Madeira se manteve para os peixes herbívoros, carnívoros e detritívoros. O comportamento das concentrações de Cr não variou em função da distância nas espécies piscívoras.

4. Discussão

4.1 O efeito do pulso de inundação e hábitos alimentares na dinâmica de Cr

Os peixes podem absorver contaminantes de diferentes formas, contudo, já é bem estabelecido que a dieta se destaca como uma das principais fontes de contaminantes para esses organismos (Wang, 2013). Portanto, é esperado que as concentrações de Cr

em peixes com diferentes hábitos alimentares respondam de formas distintas as mudanças provocadas pelo pulso de inundação em seu habitat.

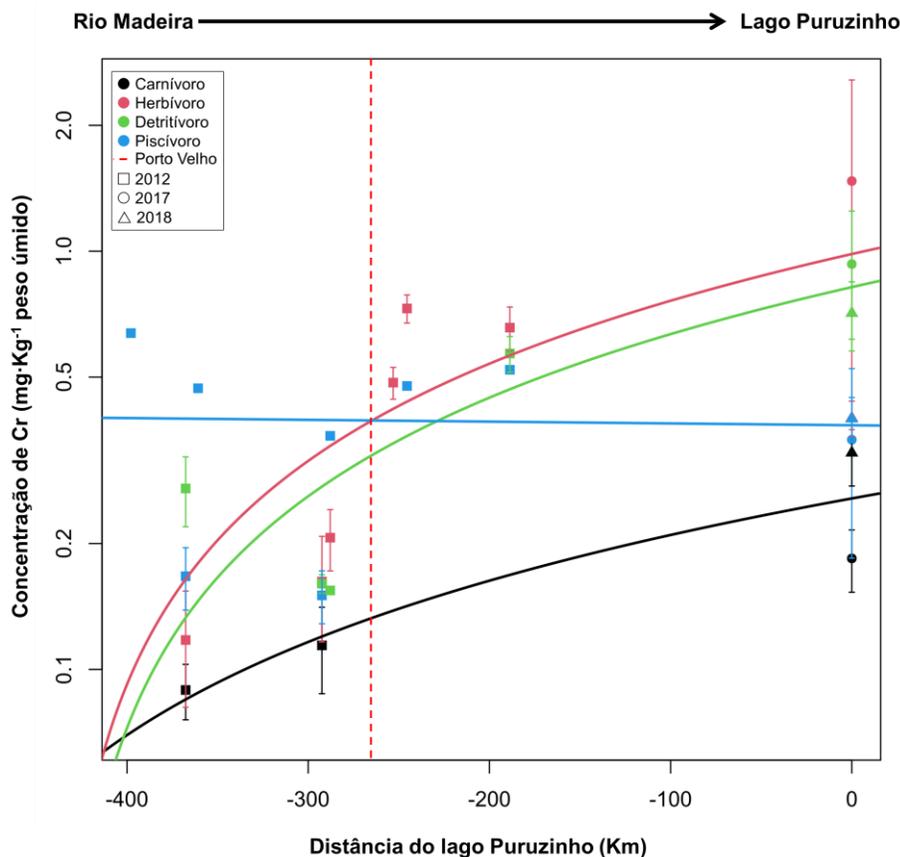


Figura 7 – Concentração de Cr ($\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ peso úmido) em peixes carnívoros, herbívoros, detritívoros e piscívoros em função da distância do lago Puruzinho. Os dados utilizados são oriundos do período de vazante. A linha vermelha pontilhada representa a localização da cidade Porto Velho, RO. Os dados dos peixes pescados à montante do lago Puruzinho foram extraídos de Sousa et al., 2015. As barras representam o erro padrão quando $n > 1$.

Para as espécies herbívoras, a enchente e as águas altas representam um período de abundância de recursos, pois ocorre uma expansão dos habitats e uma grande quantidade de recursos vegetais, como plantas, frutos e sementes ficam disponíveis (Junk, 1997). As enchentes também causam um influxo de nutrientes nos corpos hídricos que leva a formação dos bancos de macrófitas e a floração de algas, que servem de recursos para os herbívoros (Junk, 1970; Junk, 1997; Affonso et al., 2011). O período de cheia também beneficia os peixes detritívoros, devido à grande quantidade

de detritos que entram nos corpos d'água nessa estação (Almeida et al., 1993; Gomes & Agostinho, 1997, Azevedo et al., 2020). Contudo, para os peixes carnívoros e piscívoros, o aumento no nível das águas acarreta em uma menor eficiência de predação, pois suas presas ficam dispersas em grandes áreas (Junk, 1997).

No período de seca, o oposto é observado: com a redução no nível das águas, os habitat ficam reduzidos, as presas ficam confinadas em pequenos espaços e as espécies carnívoras e piscívoras se alimentam com maior facilidade, enquanto as espécies herbívoras, ao ficarem retidas em habitats menores, competem pelos poucos recursos disponíveis (Junk, 1997).

A dificuldade de se alimentar na estação cheia é refletida nos teores de Cr encontrados em *C. pleiozona*, um peixe carnívoro, nesse período: é possível observar uma queda de 72% na concentração de Cr entre os períodos de enchente e águas altas. O oposto é observado no período da seca, quando é observado um aumento acentuado nos valores de Cr (vazante e águas baixas), sugerindo uma maior eficiência de captura de recursos alimentares para essa espécie nessa estação.

As tendências de queda nas concentrações de Cr no período de cheia e um aumento na concentração desse elemento na seca em *C. pleiozona* corroboram a alimentação como fonte principal de Cr para esta espécie. Apesar disso, as maiores concentrações de Cr em *C. pleiozona* foram identificadas no período da enchente, sendo que era esperado que o valor mais alto fosse identificado nas águas baixas, fase de pico alimentar para esses peixes. As altas concentrações de Cr identificadas na enchente podem estar relacionadas a um efeito *lag* na absorção do Cr. Ou seja, as concentrações desse elemento referentes ao consumo de alimentos nas águas baixas são incorporadas no musculo dos peixes de forma mais lenta, e nesse caso, os altos teores de Cr identificados na enchente seriam representantes da alta ingestão de Cr na estação anterior.

No período das águas altas *C. pleiozona* registrou o menor valor de mediana de concentração de Cr entre todas as espécies e períodos hidrológicos. De fato, era esperado que os menores valores de teor de Cr fossem registrados nos peixes carnívoros e piscívoros, pois quando a concentração de Cr é relacionada os níveis

tróficos das espécies ($\delta^{15}\text{N}$), foi observada uma tendência de redução no teor de Cr ao longo da cadeia trófica (Figura 5).

Em *S. rhombeus* esperava-se que as concentrações de Cr se comportassem de forma similar a *C. pleiozona*, diminuindo no período de cheia e aumentando no período de seca, uma vez que ambas espécies são predadoras e com a diminuição do nível das águas elas tem uma maior eficiência de predação. Contudo, os teores de Cr nessa espécie seguiram um padrão distinto a todas as outras espécies analisadas.

Entre o período de águas altas e vazante houve um aumento nas concentrações de Cr nesses peixes, que pode estar refletindo a maior eficiência de predação para a espécie nesse período. Contudo, no período de águas baixas houve uma queda nas concentrações de Cr para a espécie, de forma oposta ao observado em *C. pleiozona*. A queda nas concentrações de Cr em *S. rhombeus* pode estar relacionada a um esgotamento de suas presas preferenciais. Winemiller (2004) observou que se os peixes piscívoros esgotam suas presas no período de vazante, de forma que o período de águas baixas passa a ser de restrição de recursos para esses organismos, o que é compatível com a redução nos valores de Cr para a espécie nesse período.

Com o aumento do nível das águas, *S. rhombeus* tem um aumento nos níveis de Cr na enchente e uma queda nessas concentrações nas águas altas. Apesar de ser um peixe piscívoro, Sá-Oliveira et al. (2017) observaram que *S. rhombeus*, no período de cheia, pode consumir também outros recursos, como insetos e crustáceos. A maior variedade de recursos consumidos por *S. rhombeus* no período de cheia pode ter relação com o aumento do teor de Cr para essa espécie na enchente. Contudo, esse peixe não apresenta uma variação na assinatura de $\delta^{13}\text{C}$ significativa ao longo dos períodos hidrológicos (Azevedo et al., 2021), o que pode indicar uma variação das concentrações de Cr em fontes de assinatura isotópica semelhante. Não obstante, o comportamento atípico dos teores de Cr em *S. rhombeus* pode indicar outras fontes de Cr além da alimentação ou características da espécie que podem influenciar os teores de Cr nesses organismos.

As concentrações de Cr em *M. duriventre*, espécie herbívora, mostraram um comportamento oposto ao observado em *C. pleiozona*, observando-se maiores teores

de Cr na cheia e redução desses valores na estação seca, sendo compatíveis com a oferta de recursos disponíveis para esses organismos entre as estações. Os teores de Cr identificados nas águas altas em *M. duriventre* são os maiores entre todos os peixes analisados nesse trabalho. Os elevados valores de Cr identificados nessa espécie estão relacionados ao seu nível trófico e aos itens que constituem sua dieta.

Os principais itens alimentares de *M. duriventre* são os frutos, sementes, raízes e folhas (Goulding, 1980; Soares et al., 2007). A vegetação flutuante que surge nos lagos de várzea durante o período de cheia tem íntima relação com a composição química da coluna d'água. Com a subida no nível das águas, o rio Madeira traz consigo uma grande quantidade de materiais em suspensão, entre eles nutrientes e Cr, que nos períodos de cheia é suspenso do sedimento para a coluna d'água e transportado ao longo dos rios (Sousa et al., 2016). A grande quantidade de nutrientes carregados para os lagos leva a formação da vegetação flutuante, que ao se desenvolver acumula grande quantidade dos elementos disponíveis na água e sedimentos dos lagos (Viers et al., 2004). Ao absorver o Cr disponível na coluna d'água durante o período de cheia, a vegetação pode se tornar uma fonte de Cr para as espécies herbívoras. Considerando que o Cr é biodiluído na cadeia trófica, ou seja, as menores concentrações desse elemento foram encontradas em espécies com níveis tróficos mais altos, é esperado que as concentrações desse elemento na vegetação do lago Puruzinho seja maior do que nos peixes analisados nesse estudo, visto que as plantas constituem a base da cadeia alimentar, o que pode justificar os altos teores de Cr encontrados na espécie herbívora.

Apesar de utilizarem as macrófitas como fonte de alimentos (Claro-Jr et al., 2004), os principais alimentos de *M. duriventre* são os frutos (Cella-Ribeiro et al., 2016). *M. duriventre* tem uma fonte de matéria orgânica distinta dos outros peixes analisados, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ variando entre -25 ‰ e -28 ‰. Esses valores são inferiores aos observados por Azevedo-Silva et al. (2016), que determinou a assinatura isotópica de carbono em peixes detritívoros, onívoros, planctívoros e piscívoros do lago Puruzinho, registrando uma variação no $\delta^{13}\text{C}$ entre -30,4 ‰ em uma espécie onívora e -38,1 ‰ em uma espécie detritívora. Os valores observados em *M. duriventre* também foram

inferiores aos registrados para fontes de energia por Azevedo-Silva et al. (2016), que analisou o $\delta^{13}\text{C}$ do sedimento superficial, séston e detritos.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ observados em *M. duriventre* neste trabalho são similares aos registrados para solo e plantas C_3 por outros trabalhos realizados na região amazônica (Hedges et al., 1986; Meyers, 1994; Martinelli et al., 2003; Kim et al., 2012; Pestana et al., 2019). Considerando o ambiente de floresta que circunda o lago Puruzinho, e, portanto, a predominância de plantas C_3 , além da importância dos frutos para essa espécie, esse resultado era esperado.

Houve uma queda de 74,6% nas concentrações de Cr identificadas em *M. duriventre* entre o período de águas altas e águas baixas, refletindo o impacto do pulso de inundação sobre a abundância de recursos para a espécie. Goulding (1980) reportou que *Mylossoma duriventre* tem uma dieta extremamente restrita durante as águas baixas, chegando a 20% de indivíduos capturados nessa estação com estômagos vazios, enquanto nas águas altas, nenhum indivíduo capturado se encontrava nessa situação.

As concentrações de Cr em *P. nigricans* variam de forma similar a *M. duriventre*, pois assim como a espécie herbívora, os peixes detritívoros tem o seu pico alimentar no período de cheia (Almeida et al., 1993; Gomes & Agostinho, 1997, Azevedo et al., 2020). Contudo, apesar de se comportarem de forma parecida a *M. duriventre*, com uma tendência de aumento das concentrações na cheia e uma redução na seca, a queda nas concentrações de Cr na seca é menor em *P. nigricans* do que o observado em *M. duriventre*.

A pouca variação nas concentrações de Cr ao longo dos períodos hidrológicos na espécie detritívora pode estar relacionada a diferentes fontes de Cr. Nas águas altas a grande quantidade de detritos oriundos das florestas recém inundadas podem servir de fontes de Cr para esse organismo através da alimentação. Com a descida no nível das águas ocorre a decomposição da vegetação flutuante formada no período de cheia, liberando os metais que foram absorvidos durante o seu crescimento (Viers et al., 2004). Essas plantas em decomposição podem ser fontes de alimento e, conseqüentemente, de contaminantes para as espécies detritívoras no período de seca.

Outro fator que pode estar relacionado as concentrações de Cr em *P. nigricans* nas águas baixas é o teor de Cr nos sedimentos de fundo. Sousa et al. (2016) analisaram os teores de Cr no sedimento de fundo em diversos pontos do rio Candeias, na bacia do rio Madeira, e não achou diferença significativa entre estações. Contudo, esse mesmo trabalho analisou um ponto em um rio de águas pretas, Rio Preto, que registrou um aumento nas concentrações de Cr entre a cheia e a seca no sedimento de fundo. Esse aumento de Cr nos sedimentos na seca em corpos hídricos de águas pretas pode se repetir no lago Puruzinho, que tem características físicas e químicas similares a este rio, uma vez que também é um ecossistema de águas pretas (Almeida et al., 2014).

O rio Madeira, como um rio de águas brancas, tem uma grande quantidade de material particulado em suspensão (Junk, 1997) e traz em suas águas uma grande quantidade de metais aderidos nesses materiais. Carvalho et al. (2018) analisou a concentração de metais nos sedimentos do lago Puruzinho em duas regiões do lago, uma sob direta influência das águas do rio Madeira e outra que não era influenciada pelo rio, e encontrou concentrações significativamente maiores de metais como Cr, Fe e Mn na área sob influência do rio Madeira, indicando que o rio é fonte desses metais para o lago.

Nos ambientes naturais, Cr tem uma forte associação com compostos de Fe (Sass & Rai, 1987), podendo ser adsorvido e coprecipitado por moléculas de óxidos de Fe (Rai et al., 1987; Richard & Bourg, 1991; Charlet & Manceau, 1992). Devido a afinidade desses elementos nos ambientes naturais é esperado que eles respondam ao pulso de inundação de forma similar, e as concentrações desses elementos nos peixes analisados confirma esse padrão, uma vez que foi encontrada uma associação entre os teores de Cr e Fe nos peixes analisados. Esta associação é importante, pois a dinâmica de Cr em ambientes amazônicos é pouco elucidada, enquanto a dinâmica de Fe nesse ecossistema já foi alvo de mais estudos (Aucour et al., 2003; Bergquist et al., 2006; Fritsch et al., 2007; Pinheiro et al., 2014; Mulholland et al., 2015). Dessa forma, essa relação pode ajudar a explicar o comportamento do Cr na região amazônica.

Além do Fe, a presença de Mn nos ambientes aquáticos também afeta a dinâmica de Cr, pois o Cr trivalente pode ser oxidado a Cr hexavalente na presença de óxidos de

Mn (Szalinska et al., 2010; Chebeir & Liu, 2018). Segundo Richard & Bourg (1991), a oxidação de Cr III a Cr VI por óxidos de Mn é eficiente em ambientes com pouco oxigênio dissolvido, enquanto ambientes ricos em matéria orgânica favorecem a redução de Cr VI a Cr III. No período de cheia, com a maior entrada de Mn no lago Puruzinho e a redução dos teores de O₂ dissolvido (Almeida et al., 2014), o Cr presente no lago pode se oxidar a Cr hexavalente, ficando na fase dissolvida, sendo mais biodisponível, tóxico e móvel. Com a redução no nível das águas na seca, e conseqüentemente, do teor de Mn no lago e o aumento do teor de matéria orgânica (Almeida et al., 2014), o Cr seria reduzido a Cr trivalente e se depositaria nos sedimentos, podendo afetar as concentrações desse elemento nas espécies que vivem e se alimentam próximas ao fundo do lago, como *P. nigricans*.

Analisando a assinatura isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) em *P. nigricans* foi observada uma sobreposição entre esses peixes, *C. pleiozona* *S. rhombeus*, o que indica que a fonte de matéria orgânica dessas espécies é comum às três. Os valores da assinatura isotópica de carbono das três espécies variaram entre -32‰ e -36‰, que são similares aos valores de $\delta^{13}\text{C}$ identificados para peixes piscívoros e planctívoros analisados por Azevedo-Silva et al. (2016) no lago Puruzinho. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ identificados neste trabalho para *P. nigricans* são inferiores aos observados em peixes detritívoros por Azevedo-Silva et al. (2016), que registrou uma variação de $\delta^{13}\text{C}$ entre -37,8‰ e -38,1‰ nesses peixes.

A variação entre -32‰ e -36‰ que foi identificada para *P. nigricans*, *C. pleiozona* e *S. rhombeus* são similares aos valores de $\delta^{13}\text{C}$ que foram identificados para séston no lago Puruzinho (Azevedo-Silva et al., 2016) e plantas C3, macrófitas, fitoplâncton, material dissolvido e material particulado em suspensão identificados na região amazônica (Hedges et al., 1986; Meyers, 1994; Martinelli et al., 2003; Kim et al., 2012; Pestana et al., 2019).

A dieta de *P. nigricans* é compatível com as fontes de matéria orgânica identificadas para a espécie, pois esses peixes consomem detritos, algas e material vegetal em decomposição (Winemiller, 2004; Soares et al., 2007; Isaac et al., 2012; Cella-Ribeiro et al., 2016). Espécies detritívoras são importantes constituintes da dieta

de piscívoros e carnívoros (Winemiller, 2004), portanto a sobreposição do $\delta^{13}\text{C}$ de *S. rhombeus* e *C. pleiozona* com *P. nigricans* pode estar relacionada com a predação da espécie detritívora pelas espécies carnívoras e piscívoras.

4.2 A variação espacial nas concentrações de Cr ao longo do rio Madeira

Sousa et al. (2015) analisaram o teor de Cr em peixes de diferentes hábitos alimentares do Rio Madeira, à jusante e à montante de Porto Velho (RO), no período hidrológico vazante, encontrando valores de Cr que variaram entre $0,09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ em *Plagioscion squamosissimus*, um peixe carnívoro, e $0,62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ em *Potamorhina latior*, uma espécie detritívora. Os resultados de Sousa et al. (2015) concatenados com os dados obtidos nesse trabalho indicam que existe uma tendência de aumento na concentração de Cr ao longo do rio Madeira para os peixes carnívoros, detritívoros e herbívoros, enquanto para peixes piscívoros esse padrão não se repetiu, corroborando a dinâmica de Cr singular dos peixes piscívoros analisados nesse trabalho.

A tendência de aumento dos valores de Cr registrados nas espécies com diferentes hábitos alimentares nesse trabalho em comparação ao que foi registrado por Sousa et al. (2015) à montante de Porto Velho pode indicar que os contaminantes presentes nos efluentes urbanos e industriais despejados no Rio Madeira estão sendo carregados por longas distâncias através do rio e atingindo áreas preservadas, como o lago Puruzinho, que se localiza há mais de 260 km de distância de Porto Velho, seguindo o percurso do rio.

A contribuição dos rios Jamari e Machado, tributários do rio Madeira, também pode ser um fator importante para o aumento de Cr registrado nos peixes pescados no lago Puruzinho em comparação com os peixes capturados à montante de Porto Velho, no rio Madeira. A bacia do rio Machado é considerada uma das mais impactadas do estado de Rondônia (Vieira et al., 2018) e, em consequência, o rio Machado pode ser uma fonte de contaminantes para o rio Madeira. Em Candeias do Jamari, região metropolitana de Porto Velho, existem duas empresas de curtumes licenciadas em operação que se localizam próximas ao rio Candeias do Jamari, principal afluente do rio Jamari, que são fontes antropogênicas de Cr na região (Sousa et al., 2015). Sousa et al. (2016) reportou um enriquecimento de Cr nos sedimentos próximos a áreas de descarga

de efluentes dessas empresas de curtume no rio Candeias, observando também que a variação sazonal influenciou a acumulação do Cr nos sedimentos, havendo uma redução nos teores de Cr na estação seca. Os autores indicaram que no período de cheia o Cr depositado no sedimento era suspenso e transportado ao longo do rio.

Os resultados encontrados por Sousa et al. (2016) são compatíveis com o observado nesse trabalho, pois o Cr pode estar sendo transportado pelo rio Madeira nos períodos de cheia e acumulado no lago Puruzinho, uma vez que os lagos são corpos hídricos propícios para a deposição de sedimentos e, conseqüentemente, dos metais aderidos a eles. Esse acúmulo contribui para o aumento das concentrações de Cr nos peixes do lago em comparação aos peixes analisados à montante, no rio Madeira. Com a expansão da atividade agropecuária na Amazônia, é esperado que o número de empresas de curtumes, e conseqüentemente, os teores de Cr em peixes e a ingestão de Cr através da alimentação aumente consideravelmente nos próximos anos na região.

É importante observar que os peixes analisados por Sousa et al. (2015) foram capturados em 2012, enquanto que os peixes analisados no presente estudo foram capturados em 2017 e 2018. A lacuna de cerca de 6 anos entre a captura dos peixes por Sousa et al. (2015) e os peixes analisados no presente trabalho também pode ter influenciado a tendência de aumento nos valores de Cr observados, uma vez que os peixes do lago Puruzinho estão expostos ao Cr que se acumulou durante esse período.

No censo realizado em 2010 a população de Porto Velho era de 428.527 (IBGE, 2010), enquanto que atualmente a população da cidade é estimada em 539.354 habitantes (IBGE, 2020), o que mostra um aumento de mais de 100.000 habitantes em 10 anos. O aumento populacional acelerado e, conseqüentemente, a maior demanda por recursos e maior produção de efluentes urbanos e industriais que vem atrelados aos processos de urbanização pode também ter influenciado os teores elevados de Cr encontrados no lago Puruzinho.

4.3 Avaliação do risco de ingestão de Cr pela população do lago Puruzinho

Entre os peixes analisados, *C. pleiozona*, *M. duriventre* e *P. nigricans* são itens importantes na alimentação da população que vive ao entorno do lago Puruzinho, sendo

o último a espécie de peixe mais consumida nesta comunidade. Como os peixes podem ser fontes de contaminantes para a população é importante determinar quanto de Cr é ingerido através do consumo dos peixes analisados. O consumo de peixes no Brasil é superior entre as populações ribeirinhas, chegando aos $406 \text{ g}\cdot\text{pessoa}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$ (Oliveira et al., 2010), enquanto o restante da população tem um consumo de $24 \text{ g}\cdot\text{pessoa}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$ (Sonoda & Shirota, 2012), portanto, as comunidades ribeirinhas estão mais vulneráveis a contaminação dos recursos hídricos.

A toxicidade do Cr depende da espécie química que ele se encontra (Velma et al., 2009), contudo, a especiação desse elemento ainda é muito difícil de ser realizada em peixes (Hamilton et al., 2018). Todavia, é esperado que o ambiente ácido do estômago reduza o Cr presente nos alimentos a Cr III (Milačič & Štupar, 1994; Vacchina et al., 2015; Hamilton et al., 2018), forma menos tóxica desse elemento.

Os menores valores de ingestão diária de Cr foram decorrentes do consumo de *S. rhombeus*, isso se deve ao baixo consumo dessa espécie pela população que vive ao entorno do lago Puruzinho. As espécies mais consumidas, *P. nigricans*, *C. pleiozona* e *M. duriventre* contribuíram com valores de ingestão de Cr próximos ao limite de ingestão diária recomendado pela ANVISA (2005). Entre os valores de ingestão de Cr registrados, a espécie *M. duriventre* no período das águas altas ultrapassou o valor de ingestão diária recomendada pela ANVISA (2005), logo, o consumo dessa espécie nesse período já ultrapassa toda a dose recomendada de Cr para um dia. Não são esperados efeitos deletérios decorrentes do consumo desses peixes, uma vez que o Cr III tem toxicidade baixa, contudo, considerando que as populações ribeirinhas frequentemente consomem peixes em mais de uma refeição por dia, e por vezes até mais de uma espécie na mesma refeição, as estimativas de ingestão diária de Cr realizadas nesse trabalho podem estar representando um cenário conservativo (ingestão de Cr derivado de apenas uma espécie) comparativamente ao cenário real (ingestão de Cr derivada do consumo frequente de duas ou mais espécies simultaneamente).

5. Conclusão

Os hábitos alimentares e a sazonalidade influenciaram as concentrações de Cr nos peixes analisados de formas distintas. As maiores concentrações de Cr nos peixes herbívoros e detritívoros foram identificadas no período de cheia. Para os peixes carnívoros a maior concentração de Cr foi identificada no período de enchente, contudo, foi possível observar um aumento das concentrações de Cr no período de cheia e uma queda no período seco. A concentração de Cr em *S. rhombeus*, espécie piscívora, seguiu um padrão distinto às outras espécies analisadas ao longo dos períodos hidrológicos. As maiores concentrações de Cr foram identificadas na espécie herbívora, *M. duriventre*. Foi encontrada uma relação entre as concentrações de Cr e de Fe nos peixes analisados. A relação entre esses dois elementos pode ser crucial para a elucidação da dinâmica de Cr nos ecossistemas amazônicos. Foi possível observar uma tendência de aumento nas concentrações de Cr nos peixes ao longo do rio Madeira, indicando que o Cr de fontes antropogênicas, como efluentes urbanos e industriais, pode estar sendo carregado pelo rio e impactando áreas preservadas da Amazônia. Apesar disso, os teores de Cr nos peixes ficaram abaixo do valor de ingestão diária recomendada pela ANVISA em todas as espécies e períodos hidrológicos, exceto por *M. duriventre* no período de águas altas. Devido aos teores de Cr estarem dentro dos valores de ingestão diária recomendada e a baixa toxicidade do Cr III, não são esperados prejuízos para a saúde decorrentes do consumo desses peixes.

6. Referências Bibliográficas

- Affonso, A. G., Barbosa, C., & Novo, E. M. L. M. (2011). Water quality changes in floodplain lakes due to the Amazon River flood pulse: Lago Grande de Curuaí (Pará). *Brazilian Journal of Biology*, 71(3), 601-610.
- Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (Brasil). (2005). Resolução 269/05 Regulamento técnico sobre a ingestão diária recomendada (IDR) de proteínas, vitaminas e minerais. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/1884970047457811857dd53fbc4c6735/RDC_269_2005.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em: Março/2021.
- Almeida, R. D., Bernardi, J. V. E., Oliveira, R. C., Carvalho, D. P. D., Manzatto, A. G., Lacerda, L. D. D., & Bastos, W. R. (2014). Flood pulse and spatial dynamics of mercury in sediments in Puruzinho lake, Brazilian Amazon. *Acta Amazonica*, 44(1), 99-105.
- Almeida, V. D., Resende, E. D., LIMA, M. D. S., & Ferreira, C. J. A. (1993). Dieta e atividade alimentar de *Prochilodus lineatus* (Characiformes, Prochilodontidae) no Pantanal do Miranda-Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil. *Revista Unimar*, 15.
- Altman, N., Krzywinski, M. (2016) Regression diagnostics. *Nature Methods* 13, 385–386. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3854>
- ATSDR (2013). Chromium Toxicity. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=10&po=0> (Acesso: Dez: 04, 2020).
- Aucour, A. M., Tao, F. X., Moreira-Turcq, P., Seyler, P., Sheppard, S., & Benedetti, M. F. (2003). The Amazon River: behaviour of metals (Fe, Al, Mn) and dissolved organic matter in the initial mixing at the Rio Negro/Solimões confluence. *Chemical geology*, 197(1-4), 271-285.
- Azevedo, L. S., Almeida, M. G., Bastos, W. R., Suzuki, M. S., Recktenvald, M. C. N. N., Bastos, M. T. S., ... & de Souza, C. M. M. (2017). Organotropism of methylmercury in fish of the southeastern of Brazil. *Chemosphere*, 185, 746-753.
- Azevedo, L. S., Pestana, I. A., Almeida, M. G., da Costa Nery, A. F., Bastos, W. R., & Souza, C. M. M. (2021). Mercury biomagnification in an ichthyic food chain of an amazon floodplain lake (Puruzinho Lake): Influence of seasonality and food chain modeling. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111249.
- Azevedo, L. S., Pestana, I. A., da Costa Nery, A. F., Bastos, W. R., & Souza, C. M. M. (2019). Influence of the flood pulse on mercury accumulation in detritivorous, herbivorous and omnivorous fish in Brazilian Amazonia. *Ecotoxicology*, 28(4), 478-485.

- Azevedo, L. S., Pestana, I. A., da Costa Nery, A. F., Bastos, W. R., & Souza, C. M. M. (2020). Mercury concentration in six fish guilds from a floodplain lake in western Amazonia: Interaction between seasonality and feeding habits. *Ecological Indicators*, 111, 106056.
- Azevedo-Silva, C. E., Almeida, R., Carvalho, D. P., Ometto, J. P., de Camargo, P. B., Dorneles, P. R., ... & Torres, J. P. (2016). Mercury biomagnification and the trophic structure of the ichthyofauna from a remote lake in the Brazilian Amazon. *Environmental research*, 151, 286-296.
- Barnhart, J. (1997). Occurrences, uses, and properties of chromium. *Regulatory toxicology and pharmacology*, 26(1), S3-S7.
- Belay, A. A. (2010). Impacts of chromium from tannery effluent and evaluation of alternative treatment options. *Journal of Environmental Protection*, 1(01), 53.
- Bergquist, B. A., & Boyle, E. A. (2006). Iron isotopes in the Amazon River system: Weathering and transport signatures. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2), 54-68.
- Brasil. (2019). DECRETO Nº 9.917, DE 18 DE JULHO DE 2019. Câmara dos Deputados. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2019/decreto-9917-18-julho-2019-788844-publicacaooriginal-158751-pe.html>. Acesso em: 26/04/2021.
- Carvalho, D. P. D., Almeida, R. D., Manzatto, Â. G., Freitas, O. B. D., & Bastos, W. R. (2018). Dynamics of metals in lacustrine sediments: case study of the Madeira River, Amazon region. *RBRH*, 23.
- Cella-Ribeiro, A., Torrente-Vilara, G., Lima-Filho, J. A., & Doria, C. R. C. (2016). *Ecologia e biologia de peixes do Rio Madeira*. Porto Velho: EDUFRO.
- Charlet, L., & Manceau, A. A. (1992). X-ray absorption spectroscopic study of the sorption of Cr (III) at the oxide-water interface: II. Adsorption, coprecipitation, and surface precipitation on hydrous ferric oxide. *Journal of colloid and interface science*, 148(2), 443-458.
- Chebeir, M., & Liu, H. (2018). Oxidation of Cr (III)–Fe (III) Mixed-Phase Hydroxides by Chlorine: Implications on the Control of Hexavalent Chromium in Drinking Water. *Environmental science & technology*, 52(14), 7663-7670.
- Choppala, G., Bolan, N., & Park, J. H. (2013). Chromium contamination and its risk management in complex environmental settings. In *Advances in Agronomy* (Vol. 120, pp. 129-172). Academic Press.

- Claro-Jr, L., Ferreira, E., Zuanon, J., & Araujo-Lima, C. (2004). O efeito da floresta alagada na alimentação de três espécies de peixes onívoros em lagos de várzea da Amazônia Central, Brasil. *Acta Amazonica*, 34(1), 133-137.
- Costa Júnior, W. A., 2017. Dinâmica dos Elementos-Traço no rio Madeira e tributários, Rondônia. 2017. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Fundação Universidade Federal de Rondônia, Rondônia.
- Dominik, J., Vignati, D. A. L., Koukal, B., Pereira de Abreu, M. H., Kottelat, R., Szalinska, E., ... & Bobrowski, A. (2007). Speciation and environmental fate of chromium in rivers contaminated with tannery effluents. *Engineering in Life Sciences*, 7(2), 155-169.
- Dougherty, C. P., Holtz, S. H., Reinert, J. C., Panyacosit, L., Axelrad, D. A., & Woodruff, T. J. (2000). Dietary exposures to food contaminants across the United States. *Environmental Research*, 84(2), 170-185.
- Esteves, F. D. A. (1988). Fundamentos de limnologia. Interciência/Finep. Rio de Janeiro.
- Fonseca, M.F.O., 2007. Isolamento geográfico como interferente em avaliações neurológicas de possíveis efeitos tóxicos do metilmercúrio. 2007. Tese (Doutorado em Ciências)– Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fox, J., & Weisberg, S. (2018). *An R companion to applied regression*. Sage publications.
- Fritsch, E., Herbillon, A. J., Do Nascimento, N. R., Grimaldi, M., & Melfi, A. J. (2007). From Plinthic Acrisols to Plinthosols and Gleysols: iron and groundwater dynamics in the tertiary sediments of the upper Amazon basin. *European journal of soil science*, 58(5), 989-1006.
- García, A. A. (1999). Diagnóstico ambiental da Lagoa da Conceição e do canal da Barra através de indicadores físico-químicos dos sedimentos de fundo e dos indicadores sócio-ambientais: Florianópolis, Santa Catarina, Brasil (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.).
- Gomes, L. C., & Agostinho, A. A. (1997). Influence of the flooding regime on the nutritional state and juvenile recruitment of the curimba, *Prochilodus scrofa*, Steindachner, in upper Paraná River, Brazil. *Fisheries Management and Ecology*, 4(4), 263-274.
- Goulding, M. (1980). *The fishes and the forest: explorations in Amazonian natural history*. Univ of California Press.
- Guyot, J. L., Jouanneau, J. M., Soares, L., Boaventura, G. R., Maillet, N., & Lagane, C. (2007). Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin. *Catena*, 71(2), 340-356.

- Hamilton, E. M., Young, S. D., Bailey, E. H., & Watts, M. J. (2018). Chromium speciation in foodstuffs: A review. *Food chemistry*, 250, 105-112.
- Hedges, J. I., Ertel, J. R., Quay, P. D., Grootes, P. M., Richey, J. E., Devol, A. H., ... & Salati, E. (1986). Organic carbon-14 in the Amazon River system. *Science*, 231(4742), 1129-1131.
- Hiane, P.A., Filho, A.F.L., Filho, M.M.R., Ramos, M.I.L. (2002). Teores de colesterol e lipídios totais em seis espécies de peixes capturados na região pantaneira do estado de Mato Grosso do Sul. *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos* 20(1):65-74.
- IBGE. (2010). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=29&uf=11>>. Acesso em: Agosto/2021.
- IBGE. (2020). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2020. Disponível em: <https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2020/estimativa_dou_2020.pdf>. Acesso em: Agosto/2021.
- Inhamuns, A. J. 2000. Composição de ácidos graxos de peixes de água doce da região amazônica brasileira. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Alimentos. Universidade Estadual de Campinas. 130p.
- Inhamuns, A.J., Franco, M.R.B. (2008). EPA and DHA quantification in two species of freshwater fish from Central Amazonia. *Food Chemistry*, 107(2):587-591. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.032>
- Isaac, V. J., Fabr e, N. N., Silva, C. O., Ruffino, M. L., & Saint-Paul, U. (2012). Ecologia da fauna ict ica. Peixes e pesca no Solim es-Amazonas: uma avalia o integrada, 207-249.
- Javed, M. (2005). Heavy metal contamination of freshwater fish and bed sediments in the. *Pak J Biol Sci*, 8(10), 1337-1341.
- Junk, W. J. (1970). Investigations on the ecology and production-biology of the "floating meadows"(Paspalo-Echinochloetum) on the middle Amazon. Part 1: The floating vegetation and its ecology. *Amazoniana: Limnologia et Oecologia Regionalis Systematis Fluminis Amazonas*, 2(4), 449-495.
- Junk, W. J. (Ed.). (1997). *The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System* (Vol. 126). Springer Science & Business Media.

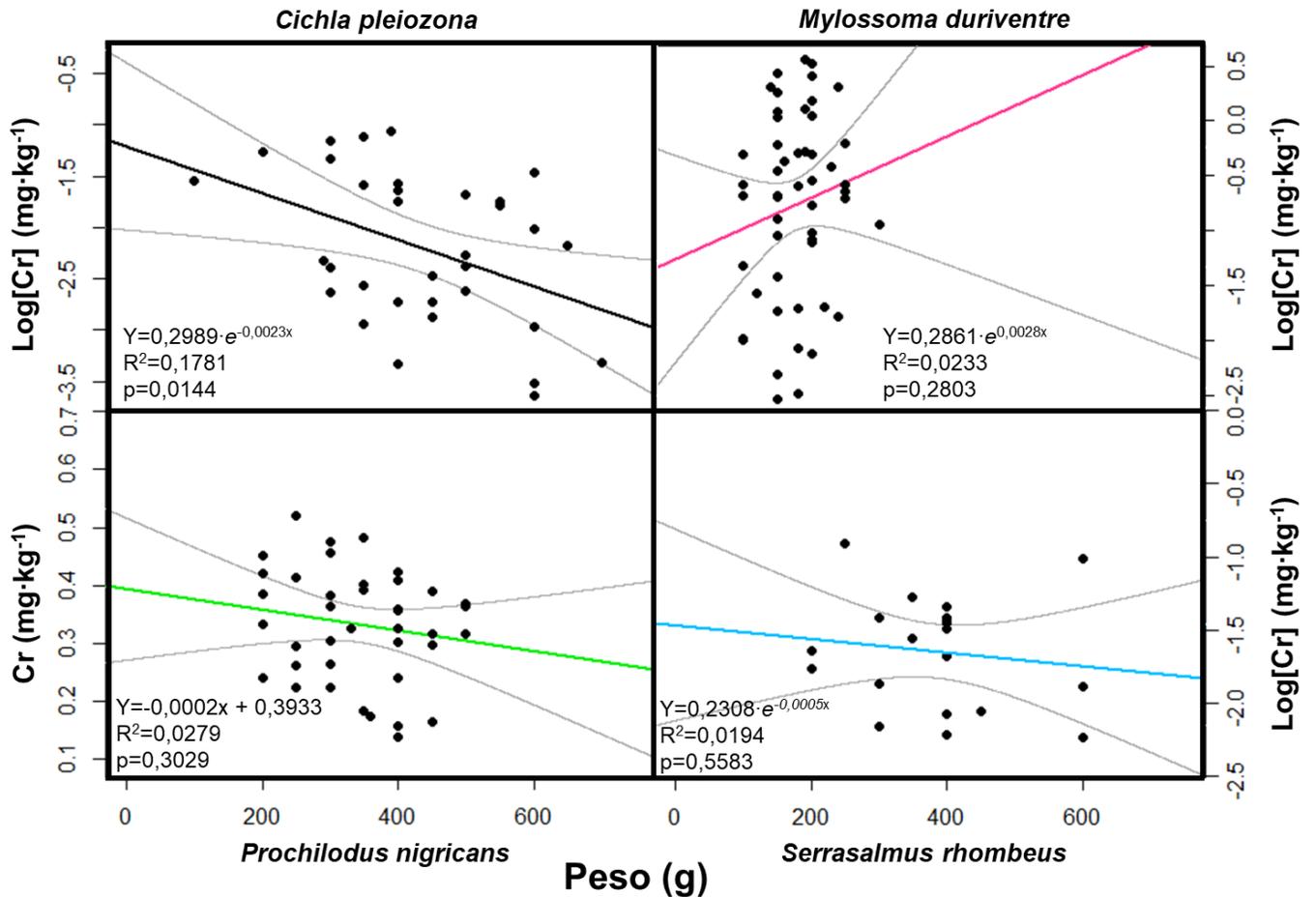
- Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences*, 106(1), 110-127.
- Khitalishvili, Koba. 2016. Monte Carlo Simulation in R: Basic Example. Disponível em: <<https://rpubs.com/Koba/Monte-Carlo-Basic-Example>>. Acesso em: 10/04/2021.
- Kim, J. H., Zell, C., Moreira-Turcq, P., Pérez, M. A., Abril, G., Mortillaro, J. M., ... & Damsté, J. S. S. (2012). Tracing soil organic carbon in the lower Amazon River and its tributaries using GDGT distributions and bulk organic matter properties. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 90, 163-180.
- Kotaś, J., & Stasicka, Z. (2000). Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. *Environmental pollution*, 107(3), 263-283.
- Laraque, A., Filizola, N.P., Guyot, J.L. (2005). Variations spatio-temporelles du bilan sédimentaire dans le bassin amazonien brésilien, à partir d'un échantillonnage décadaire. *Sediment Budgets* (Walling D.E., Horowitz A.J., Eds.), IAHS 291: 250-258.
- Malm, O., Castro, M. B., Bastos, W. R., Branches, F. J., Guimarães, J. R., Zuffo, C. E., & Pfeiffer, W. C. (1995). An assessment of Hg pollution in different goldmining areas, Amazon Brazil. *Science of the Total Environment*, 175(2), 127-140.
- Mamyrbayev, A. A., Dzharkenov, T. A., Imangazina, Z. A., & Satybaldieva, U. A. (2015). Mutagenic and carcinogenic actions of chromium and its compounds. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 20(3), 159-167.
- Martinelli, L. A., Victoria, R. L., De Camargo, P. B., Piccolo, M. D. C., Mertes, L., Richey, J. E., ... & Forsberg, B. R. (2003). Inland variability of carbon–nitrogen concentrations and $\delta^{13}\text{C}$ in Amazon floodplain (várzea) vegetation and sediment. *Hydrological Processes*, 17(7), 1419-1430.
- McConnaughey, T., & McRoy, C. P. (1979). Food-web structure and the fractionation of carbon isotopes in the Bering Sea. *Marine Biology*, 53(3), 257-262.
- Melo, D.M., Roseno, T.F., Barros, W.M., Faria, R.A.P.G., Paglarini, C.S., Faria, P.B., Mariotto, S., Souza, X.R. 2019. Fatty acid profiles and cholesterol content of Five species of pacu-pevas from the pantanal region of Mato Grosso, Brazil. *Journal of Food Composition and Analysis* 83:103283.
- Meyers, P. A. (1994). Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical geology*, 114(3-4), 289-302.
- Milačič, R., & Štupar, J. (1994). Simultaneous determination of chromium (III) complexes and chromium (VI) by fast protein anion-exchange liquid chromatography–atomic absorption spectrometry. *Analyst*, 119(4), 627-632.

- Mishra, S., & Bharagava, R. N. (2016). Toxic and genotoxic effects of hexavalent chromium in environment and its bioremediation strategies. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 34(1), 1-32.
- Mulholland, D. S., Poitrasson, F., Boaventura, G. R., Allard, T., Vieira, L. C., Santos, R. V., ... & Seyler, P. (2015). Insights into iron sources and pathways in the Amazon River provided by isotopic and spectroscopic studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 150, 142-159.
- Nhiwatiwa, T., Barson, M., Harrison, A. P., Utete, B., & Cooper, R. G. (2011). Metal concentrations in water, sediment and sharptooth catfish *Clarias gariepinus* from three peri-urban rivers in the upper Manyame catchment, Zimbabwe. *African journal of aquatic science*, 36(3), 243-252.
- Nriagu, J. O., Pfeiffer, W. C., Malm, O., de Souza, C. M. M., & Mierle, G. (1992). Mercury pollution in Brazil. *Nature*, 356(6368), 389-389.
- Oliveira, H. (2012). Chromium as an environmental pollutant: insights on induced plant toxicity. *Journal of Botany*.
- Oliveira, R. C., Dórea, J. G., Bernardi, J. V., Bastos, W. R., Almeida, R., & Manzatto, Â. G. (2010). Fish consumption by traditional subsistence villagers of the Rio Madeira (Amazon): impact on hair mercury. *Annals of human biology*, 37(5), 629-642.
- Oliveira, R.C., 2006 Caracterização do consumo de peixe como via de exposição ao mercúrio na população do Lago Puruzinho - Amazônia. 2006. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Fundação Universidade Federal de Rondônia, Rondônia.
- Paez-Osuna, P., Frías-Espericueta, M. G., Osuna-López, J. I. (1995). Trace metal concentrations in relation to season and gonadal maturation in the oyster *Crassostrea iridescens*. *Marine Environmental Research*. Nova Iorque, 40(1), 19-31.
- Pawlikowski, M., Szalińska, E., Wardas, M., & Dominik, J. (2006). Chromium originating from tanneries in river sediments: a preliminary investigation from the upper Dunajec river (Poland). *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(6).
- Pedrosa, O. P. (2018). Estudo prospectivo do estado de saúde de uma população ribeirinha da Amazônia brasileira.
- Pestana, I. A., Almeida, M. G., Bastos, W. R., & Souza, C. M. (2019). Total Hg and methylmercury dynamics in a river-floodplain system in the Western Amazon: Influence of seasonality, organic matter and physical and chemical parameters. *Science of the Total Environment*, 656, 388-399.
- Pinheiro, G. M. D. S., Poitrasson, F., Sondag, F., Cochonneau, G., & Vieira, L. C. (2014). Contrasting iron isotopic compositions in river suspended particulate matter: the

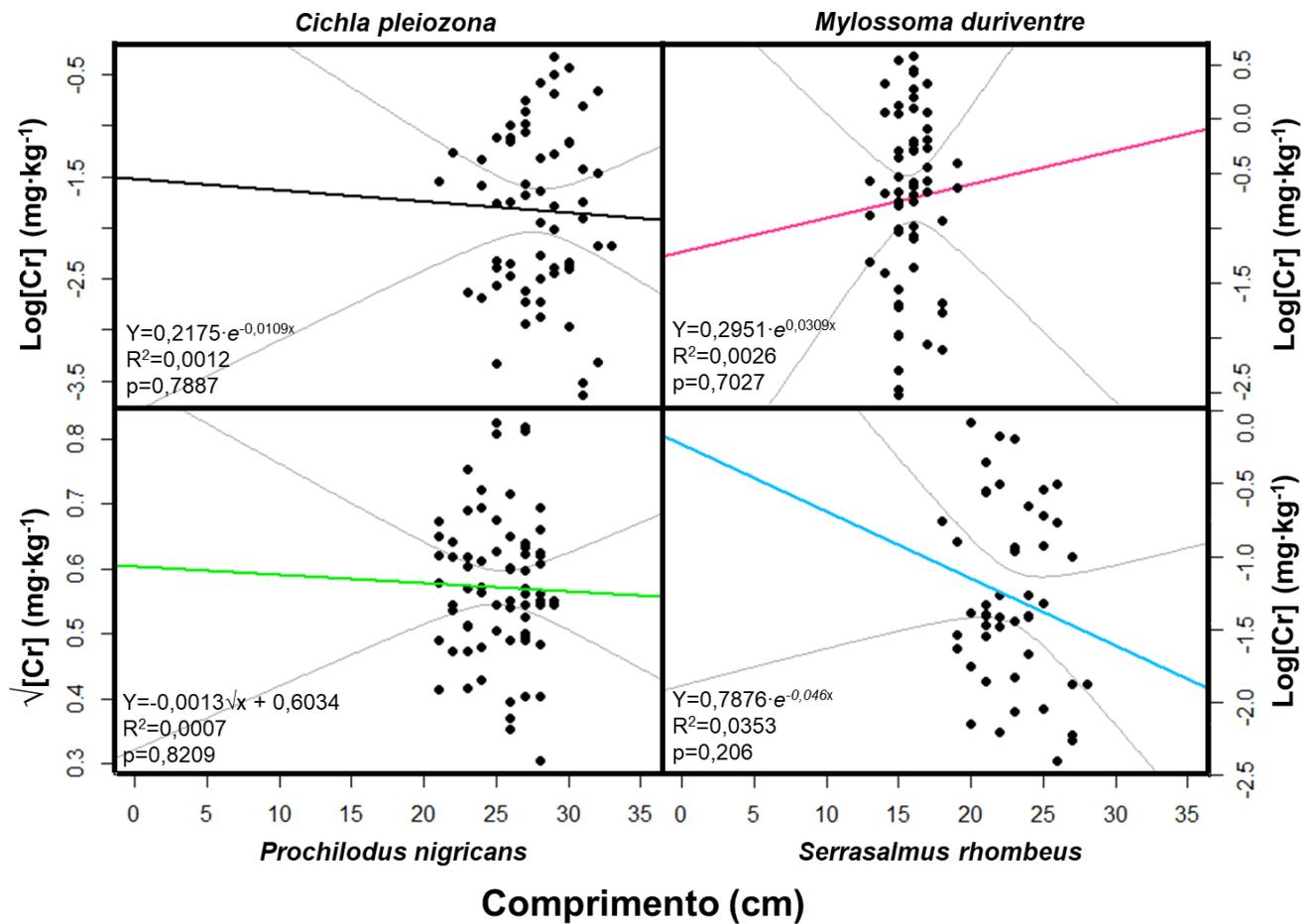
- Negro and the Amazon annual river cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 168-178.
- Pinheiro, M. C. N., Crespo-López, M. E., Vieira, J. L. F., Oikawa, T., Guimarães, G. A., Araújo, C. C., ... & Silveira, L. C. L. (2007). Mercury pollution and childhood in Amazon riverside villages. *Environment international*, 33(1), 56-61.
- R Core Team, 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Austria, Vienna. <http://www.R-project.org/>.
- Rai, D., Sass, B. M., & Moore, D. A. (1987). Chromium (III) hydrolysis constants and solubility of chromium (III) hydroxide. *Inorganic Chemistry*, 26(3), 345-349.
- Richard, F. C., & Bourg, A. C. (1991). Aqueous geochemistry of chromium: a review. *Water research*, 25(7), 807-816.
- Sá-Oliveira, J. C., Ferrari, S. F., Vasconcelos, H. C. G., Araujo, A. S., Costa Campos, C. E., Mattos-Dias, C. A. G., ... & Isaac, V. J. (2017). Resource Partitioning between Two Piranhas (*Serrasalmus gibbus* and *Serrasalmus rhombeus*) in an Amazonian Reservoir. *The Scientific World Journal*, 2017.
- Sass, B. M., & Rai, D. (1987). Solubility of amorphous chromium (III)-iron (III) hydroxide solid solutions. *Inorganic Chemistry*, 26(14), 2228-2232.
- Soares, M. G. M., Costa, E. L. D., Anjos, H. D. B. D., Yamamoto, K. C., & Freitas, C. A. A. D. (2007). Peixes de lagos do médio Rio Solimões.
- Sonoda, D. Y., & Shiota, R. (2012). Consumo de pescado no Brasil fica abaixo da média internacional. *Visão agrícola*, 8(11), 145-147.
- Sousa, E. A. D., Miranda, M. R., dos Santos, M. H., Costa Júnior, W. A., Lauthartte, L. C., Mussy, M. H., ... & Bastos, W. R. (2015). Assessment of trace metals in Amazonian fish exposed to untreated urban sewage: high chromium concentrations in fish tissues. *Revista Ambiente & Água*, 10(3), 499-509.
- Sousa, E. A., Luz, C. C., de Carvalho, D. P., Dorea, C. C., de Holanda, I. B. B., Manzatto, Â. G., & Bastos, W. R. (2016). Chromium distribution in an Amazonian river exposed to tannery effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(21), 22019-22026.
- Szalinska, E., Dominik, J., Vignati, D. A., Bobrowski, A., & Bas, B. (2010). Seasonal transport pattern of chromium (III and VI) in a stream receiving wastewater from tanneries. *Applied Geochemistry*, 25(1), 116-122.
- Thakur, R., Sharma, G. D., Dwivedi, B. S., & Khatik, S. K. (2016). CHROMIUM: AS A POLLUANT. I *Control Pollution*, 23(2), 209-215.

- Thomaz, S. M., Bini, L. M., Szalinska, E., Dominik, J., Vignati, D. A., Bobrowski, A., & Bas, B. (2010). Seasonal transport pattern of chromium (III and VI) in a stream receiving wastewater from tanneries. *Applied Geochemistry*, 25(1), 116-122.
- Vacchina, V., de la Calle, I., & Séby, F. (2015). Cr (VI) speciation in foods by HPLC-ICP-MS: investigation of Cr (VI)/food interactions by size exclusion and Cr (VI) determination and stability by ion-exchange on-line separations. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 407(13), 3831-3839.
- Vauchel, P., Santini, W., Guyot, J. L., Moquet, J. S., Martinez, J. M., Espinoza, J. C., ... & Ronchail, J. (2017). A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme. *Journal of Hydrology*, 553, 35-48.
- Velma, V., Vutukuru, S. S., & Tchounwou, P. B. (2009). Ecotoxicology of hexavalent chromium in freshwater fish: a critical review. *Reviews on environmental health*, 24(2), 129.
- Venables, W. N. & Ripley, B. D. (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0.
- Vieira, V. B., do Santos Reguelin, D., de Lima, F. C., & Rezende, D. R. (2018). Qualidade das águas subterrâneas no estado de Rondônia. *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente*, 9(2), 760-766.
- Viers, J., Barroux, G., Pinelli, M., Seyler, P., Oliva, P., Dupré, B., & Boaventura, G. R. (2004). The influence of the Amazonian floodplain ecosystems on the trace element dynamics of the Amazon River mainstem (Brazil). *Science of the total environment*, 339(1-3), 219-232.
- Wang, W. X. (2013). Dietary toxicity of metals in aquatic animals: Recent studies and perspectives. *Chinese Science Bulletin*, 58(2), 203-213.
- Winemiller, K. O. (2004). Floodplain river food webs: generalizations and implications for fisheries management. In *Proceedings of the second international symposium on the management of large rivers for fisheries* (Vol. 2, pp. 285-309). FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand.
- Zhitkovich, A. (2011). Chromium in drinking water: sources, metabolism, and cancer risks. *Chemical research in toxicology*, 24(10), 1617-1629.

7. Material Suplementar



Material Suplementar 1 – Regressões lineares entre as concentrações de Cr (mg·kg⁻¹ peso úmido) e o peso (g) para cada espécie. As estatísticas do modelo (Equação, R² e p) estão dentro de cada gráfico. A área contida entre as linhas cinzas representa os intervalos de confiança de 95%.



Material Suplementar 2 – Regressões lineares entre as concentrações de Cr (mg·kg⁻¹ peso úmido) e o comprimento (cm) para cada espécie. As estatísticas do modelo (Equação, R² e p) estão dentro de cada gráfico. A área contida entre as linhas cinzas representa os intervalos de confiança de 95%.

2. Considerações Finais

A dinâmica de Cr na região amazônica, seja nos compartimentos bióticos ou abióticos, é pouco estudada. Devido ao histórico de contaminação por mercúrio, a maioria dos estudos realizados nessa região se dedicam a esse elemento. Contudo, outros elementos vêm sendo identificados com elevado potencial de contaminação na região amazônica e podem afetar negativamente o ecossistema e a saúde da população local. Esse estudo teve como objetivo avaliar o comportamento do Cr em peixes na região amazônica, observando como esse elemento é afetado pela progressão hidrológica na região, pelos diferentes hábitos alimentares dos peixes e pela variação espacial. A avaliação espacial indicou que o Cr de fontes antropogênicas, como efluentes urbanos e industriais, pode estar sendo carregado por longas distâncias pelo rio Madeira e atingindo locais preservados da região amazônica, o que é muito preocupante, pois a urbanização e as atividades agrícolas e industriais vêm se expandindo na Amazônia e isso pode afetar negativamente esse bioma que tem grande importância para o Brasil e para o mundo.

Os ribeirinhos, que usam os peixes da região como principal fonte de renda e de proteína animal, estão especialmente vulneráveis aos riscos decorrentes da contaminação de peixes por metais na Amazônia. Os teores de Cr identificados nesse trabalho foram comparados ao valor de ingestão diária recomendada de Cr III determinado pela ANVISA (2005). A toxicidade do Cr é diretamente relacionada a espécie em que esse elemento se encontra no ambiente (Velma et al., 2009), contudo, a especiação de Cr em matrizes bióticas é um processo difícil com os métodos disponíveis (Hamilton et al., 2018). A dificuldade em realizar a especiação do Cr em peixes atrapalha a compreensão da ciclagem desse metal no ecossistema amazônico e também limita a realização de avaliações de risco probabilísticas, que dependem das concentrações das espécies do Cr para estimar o risco para a população de forma precisa.

A maior mediana de concentração de Cr nesse trabalho foi identificada na espécie herbívora *M. duriventre*, e a análise isotópica realizada demonstrou que o Cr diminui de concentração ao longo da cadeia trófica. Diante disso, sugere-se a realização de um

estudo que avalie as concentrações de Cr em plantas e outros organismos produtores, avaliando também a influência da sazonalidade sobre essas concentrações, com o objetivo de determinar a influência dos períodos hidrológicos sobre as concentrações de Cr nesses organismos e o efeito dessa variação sobre o transporte do Cr ao longo da cadeia trófica.

A relação entre concentrações de Cr e Fe nos peixes identificada nesse trabalho pode ser uma importante ferramenta na elucidação da dinâmica de Cr nos ecossistemas amazônicos, auxiliando na compreensão do comportamento sazonal e do transporte desse elemento na região amazônica.

3. Referências Bibliográficas

- Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA (Brasil). (2005). Resolução 269/05 Regulamento técnico sobre a ingestão diária recomendada (IDR) de proteínas, vitaminas e minerais. Available in: <http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/1884970047457811857dd53fbc4c6735/RDC_269_2005.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em: Março/2021.
- Ali, H., & Khan, E. (2019). Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs—Concepts and implications for wildlife and human health. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(6), 1353-1376.
- Alipour, H., & Banagar, G. R. (2018). Health risk assessment of selected heavy metals in some edible fishes from Gorgan Bay, Iran. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 17(1), 21-34.
- Almeida, R. D., Bernardi, J. V. E., Oliveira, R. C., Carvalho, D. P. D., Manzatto, A. G., Lacerda, L. D. D., & Bastos, W. R. (2014). Flood pulse and spatial dynamics of mercury in sediments in Puruzinho lake, Brazilian Amazon. *Acta Amazonica*, 44(1), 99-105.
- Anderson, R. A. (1997). Chromium as an essential nutrient for humans. *Regulatory toxicology and pharmacology*, 26(1), S35-S41.
- Andres, S., Ribeyre, F., Tourencq, J. N., & Boudou, A. (2000). Interspecific comparison of cadmium and zinc contamination in the organs of four fish species along a polymetallic pollution gradient (Lot River, France). *Science of the Total Environment*, 248(1), 11-25.
- Aprile, F., & Darwich, A. J. (2013). Nutrients and water-forest interactions in an Amazon floodplain lake: an ecological approach. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 25(2), 169-182.
- Archer, A. W. (2005). Review of Amazonian depositional systems. *Fluvial sedimentology VII*, 17-39.
- Atobatele, O. E., & Olutona, G. O. (2015). Distribution of three non-essential trace metals (Cadmium, Mercury and Lead) in the organs of fish from Aiba Reservoir, Iwo, Nigeria. *Toxicology reports*, 2, 896-903.
- ATSDR (2011). Chromium. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=17> (Acesso: Dez: 04, 2020).
- ATSDR (2013). Chromium Toxicity. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=10&po=0> (Acesso: Dez: 04, 2020).

- Azevedo, L. S., Pestana, I. A., da Costa Nery, A. F., Bastos, W. R., & Souza, C. M. M. (2019). Influence of the flood pulse on mercury accumulation in detritivorous, herbivorous and omnivorous fish in Brazilian Amazonia. *Ecotoxicology*, 28(4), 478-485.
- Azevedo, L. S., Pestana, I. A., Meneguelli-Souza, A. C., Ramos, B., Pessanha, D. R., Caldas, D., ... & de Souza, C. M. M. (2018). Risk of exposure to total and inorganic arsenic by meat intake among different age groups from Brazil: a probabilistic assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(35), 35471-35478.
- Azevedo-Silva, C. E., Almeida, R., Carvalho, D. P., Ometto, J. P., de Camargo, P. B., Dorneles, P. R., ... & Torres, J. P. (2016). Mercury biomagnification and the trophic structure of the ichthyofauna from a remote lake in the Brazilian Amazon. *Environmental research*, 151, 286-296.
- Bakshi, A., & Panigrahi, A. K. (2018). A comprehensive review on chromium induced alterations in fresh water fishes. *Toxicology reports*, 5, 440-447.
- Basim, Y., & Khoshnood, Z. (2016). Target hazard quotient evaluation of cadmium and lead in fish from Caspian Sea. *Toxicology and industrial health*, 32(2), 215-220.
- Benzer, S. (2017). Concentrations of arsenic and boron in water, sediment and the tissues of fish in Emet stream (Turkey). *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 98(6), 805-810.
- Caldas, D., Pestana, I. A., Almeida, M. G., Henry, F. C., Salomão, M. S. M. B., & de Souza, C. M. M. (2016). Risk of ingesting As, Cd, and Pb in animal products in north Rio de Janeiro state, Brazil. *Chemosphere*, 164, 508-515.
- Carvalho, D. P. (2011). Quantificação de elementos-traço em diferentes solos na área de influência do futuro reservatório da usina hidrelétrica de Santo Antônio, Porto-Velho RO. (Dissertação de Mestrado).
- Carvalho, D. P. D., Almeida, R. D., Manzatto, Â. G., Freitas, O. B. D., & Bastos, W. R. (2018). Dynamics of metals in lacustrine sediments: case study of the Madeira River, Amazon region. *RBRH*, 23.
- Castello, L., Isaac, V. J., & Thapa, R. (2015). Flood pulse effects on multispecies fishery yields in the Lower Amazon. *Royal Society open science*, 2(11), 150299.
- Chovanec, A., Hofer, R., & Schiemer, F. (2003). Fish as bioindicators. In *Trace metals and other contaminants in the environment* (Vol. 6, pp. 639-676). Elsevier.
- Ciszewski, D., & Grygar, T. M. (2016). A review of flood-related storage and remobilization of heavy metal pollutants in river systems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(7), 239.

- da Silva, S. F., Oliveira, D. C., Pereira, J. P. G., Castro, S. P., Costa, B. N. S., & de Oliveira Lima, M. (2019). Seasonal variation of mercury in commercial fishes of the Amazon Triple Frontier, Western Amazon Basin. *Ecological Indicators*, 106, 105549.
- Di Bona, K. R., Love, S., Rhodes, N. R., McAdory, D., Sinha, S. H., Kern, N., ... & Ramage, J. (2011). Chromium is not an essential trace element for mammals: effects of a "low-chromium" diet. *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 16(3), 381-390.
- Dominik, J., Vignati, D. A. L., Koukal, B., Pereira de Abreu, M. H., Kottelat, R., Szalinska, E., ... & Bobrowski, A. (2007). Speciation and environmental fate of chromium in rivers contaminated with tannery effluents. *Engineering in Life Sciences*, 7(2), 155-169.
- Dougherty, C. P., Holtz, S. H., Reinert, J. C., Panyacosit, L., Axelrad, D. A., & Woodruff, T. J. (2000). Dietary exposures to food contaminants across the United States. *Environmental Research*, 84(2), 170-185.
- Dutton, J., & Fisher, N. S. (2011). Bioaccumulation of As, Cd, Cr, Hg (II), and MeHg in killifish (*Fundulus heteroclitus*) from amphipod and worm prey. *Science of the total environment*, 409(18), 3438-3447.
- FAO (2016). Fishery and aquaculture country profiles—The Republic of Maldives. <http://www.fao.org/fishery/facp/MDV/en> (Acesso: Nov: 10, 2020).
- FAO. (2017). World aquaculture 2015: A brief overview, by Rohana Subasinghe. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1140.
- Gambrell, R. P. (1994). Trace and toxic metals in wetlands—a review. *Journal of environmental Quality*, 23(5), 883-891.
- Golyshev, S. I., Verkhovskaya, N. A., Burkova, V. N., & Matis, E. Y. (1991). Stable carbon isotopes in source-bed organic matter of West and East Siberia. *Organic Geochemistry*, 17(3), 277-291.
- Guertin, J., Jacobs, J. A., & Avakian, C. P. (Eds.). (2004). Chromium (VI) handbook. CRC press.
- Gusso-Choueri, P. K., de Araújo, G. S., Cruz, A. C. F., de Oliveira Stremel, T. R., de Campos, S. X., de Souza Abessa, D. M., ... & Choueri, R. B. (2018). Metals and arsenic in fish from a Ramsar site under past and present human pressures: Consumption risk factors to the local population. *Science of the Total Environment*, 628, 621-630.
- Hamilton, E. M., Young, S. D., Bailey, E. H., & Watts, M. J. (2018). Chromium speciation in foodstuffs: A review. *Food chemistry*, 250, 105-112.

- IBGE. (2008). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa de Orçamentos Familiares. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2657>>. Acesso em: 7 Ago. 2019.
- Isaac, V. J., Almeida, M. C., Giarrizzo, T., Deus, C. P., Vale, R., Klein, G., & Begossi, A. (2015). Food consumption as an indicator of the conservation of natural resources in riverine communities of the Brazilian Amazon. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87(4), 2229-2242.
- Jardim-Lima, D., Piedade, M. T. F., Queiroz, H. D., Novo, E. M. L. M., & Rennó, C. D. (2005). A dinâmica do Pulso de inundação: aplicações de sensoriamento remoto na avaliação da área de águas abertas e morfologia dos lagos de várzea da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá-Amazônia Central. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12, 3069-3076.
- Javed, M. (2005). Heavy metal contamination of freshwater fish and bed sediments in the. *Pak J Biol Sci*, 8(10), 1337-1341.
- Jiang, Z., Xu, N., Liu, B., Zhou, L., Wang, J., Wang, C., ... & Xiong, W. (2018). Metal concentrations and risk assessment in water, sediment and economic fish species with various habitat preferences and trophic guilds from Lake Caizi, Southeast China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 157, 1-8.
- Jones, A. S., Marini, J., Solo-Gabriele, H. M., Robey, N. M., & Townsend, T. G. (2019). Arsenic, copper, and chromium from treated wood products in the US disposal sector. *Waste Management*, 87, 731-740.
- Jovičić, K., Nikolić, D. M., Višnjić-Jeftić, Ž., Đikanović, V., Skorić, S., Stefanović, S. M., ... & Jarić, I. (2015). Mapping differential elemental accumulation in fish tissues: assessment of metal and trace element concentrations in wels catfish (*Silurus glanis*) from the Danube River by ICP-MS. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(5), 3820-3827.
- Junk, W. J. (1970). Investigations on the ecology and production-biology of the "floating meadows"(Paspalo-Echinochloetum) on the middle Amazon. Part 1: The floating vegetation and its ecology. *Amazoniana: Limnologia et Oecologia Regionalis Systematis Fluminis Amazonas*, 2(4), 449-495.
- Junk, W. J. (1973). Investigations on the ecology and production-biology of the "floating meadows"(Paspalo-Echinochloetum) on the Middle Amazon. Part II. The aquatic fauna in the root zone of floating vegetation. *Amazoniana: Limnologia et Oecologia Regionalis Systematis Fluminis Amazonas*, 4(1), 9-102.
- Junk, W. J. (Ed.). (1997). *The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System* (Vol. 126). Springer Science & Business Media.
- Junk, W. J., & Howard-Williams, C. (1984). Ecology of aquatic macrophytes in Amazonia. In *The Amazon* (pp. 269-293). Springer, Dordrecht.

- Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences*, 106(1), 110-127.
- Kotaš, J., & Stasicka, Z. (2000). Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. *Environmental pollution*, 107(3), 263-283.
- Lima, D. (2013). Avaliação da contaminação por metais pesados na água e nos peixes da bacia do rio Cassiporé, estado do Amapá, Amazônia, Brasil (Dissertação de Mestrado).
- Liu, H., Liu, G., Wang, S., Zhou, C., Yuan, Z., & Da, C. (2018). Distribution of heavy metals, stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) and risk assessment of fish from the Yellow River Estuary, China. *Chemosphere*, 208, 731-739.
- Lopes, A., PAULA, J., Mardegan, S. F., Hamada, N., & Piedade, M. T. F. (2011). Influência do hábitat na estrutura da comunidade de macroinvertebrados aquáticos associados às raízes de *Eichhornia crassipes* na região do Lago Catalão, Amazonas, Brasil. *Acta Amazonica*, 41(4), 493-502.
- Magalhães, E. R. S., Yamamoto, K. C., Anjos, H. D. B., Loebens, S. C., & Soares, M. G. M. (2015). Bancos de macrófitas aquáticas em lago de várzea: alimentação de duas espécies de peixes na região de Manaus, Amazonas, Brasil. *Acta of Fisheries and Aquatic Resources*, 3(1), 25-40.
- Malm, O., Castro, M. B., Bastos, W. R., Branches, F. J., Guimarães, J. R., Zuffo, C. E., & Pfeiffer, W. C. (1995). An assessment of Hg pollution in different goldmining areas, Amazon Brazil. *Science of the Total Environment*, 175(2), 127-140.
- Mamyrbaev, A. A., Dzharckenov, T. A., Imangazina, Z. A., & Satybaldieva, U. A. (2015). Mutagenic and carcinogenic actions of chromium and its compounds. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 20(3), 159-167.
- Marín-Guirao, L., Lloret, J., & Marin, A. (2008). Carbon and nitrogen stable isotopes and metal concentration in food webs from a mining-impacted coastal lagoon. *Science of the Total Environment*, 393(1), 118-130.
- Mataba, G. R., Verhaert, V., Blust, R., & Bervoets, L. (2016). Distribution of trace elements in the aquatic ecosystem of the Thigithe river and the fish *Labeo victorinus* in Tanzania and possible risks for human consumption. *Science of The Total Environment*, 547, 48-59.
- Miller, B. G. (2005). *Coal energy systems*. Academic Press.
- Moreira, L. J., da Silva, E. B., Fontes, M. P., Liu, X., & Ma, L. Q. (2018). Speciation, bioaccessibility and potential risk of chromium in Amazon forest soils. *Environmental pollution*, 239, 384-391.

- Nagel, B., Gaye, B., Kodina, L. A., & Lahajnar, N. (2009). Stable carbon and nitrogen isotopes as indicators for organic matter sources in the Kara Sea. *Marine Geology*, 266(1-4), 42-51.
- Naigaga, I., Kaiser, H., Muller, W. J., Ojok, L., Mbabazi, D., Magezi, G., & Muhumuza, E. (2011). Fish as bioindicators in aquatic environmental pollution assessment: a case study in Lake Victoria wetlands, Uganda. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(14-15), 918-928.
- Nhiwatiwa, T., Barson, M., Harrison, A. P., Utete, B., & Cooper, R. G. (2011). Metal concentrations in water, sediment and sharptooth catfish *Clarias gariepinus* from three peri-urban rivers in the upper Manyame catchment, Zimbabwe. *African journal of aquatic science*, 36(3), 243-252.
- Oliveira, H. (2012). Chromium as an environmental pollutant: insights on induced plant toxicity. *Journal of Botany*.
- Oliveira, R. C., Dórea, J. G., Bernardi, J. V., Bastos, W. R., Almeida, R., & Manzatto, Â. G. (2010). Fish consumption by traditional subsistence villagers of the Rio Madeira (Amazon): impact on hair mercury. *Annals of human biology*, 37(5), 629-642.
- Pawlikowski, M., Szalińska, E., Wardas, M., & Dominik, J. (2006). Chromium originating from tanneries in river sediments: a preliminary investigation from the upper Dunajec river (Poland). *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(6).
- Pellerin, C., & Booker, S. M. (2000). Reflections on hexavalent chromium: health hazards of an industrial heavyweight. *Environmental health perspectives*, 108(9), A402-A407.
- Pereira, E. L. S. (2012). Influência das características naturais das bacias de drenagem sobre as propriedades físico-químicas do rio Solimões/Amazonas e seus principais tributários brasileiros.
- Pestana, I. A. (2015). Dinâmica espaço-temporal de Hg Total em um reservatório na Amazônia Ocidental, Brasil. (Dissertação de Mestrado).
- Pestana, I. A., Almeida, M. G., Bastos, W. R., & Souza, C. M. (2019). Total Hg and methylmercury dynamics in a river-floodplain system in the Western Amazon: Influence of seasonality, organic matter and physical and chemical parameters. *Science of the Total Environment*, 656, 388-399.
- Peterson, B. J., & Fry, B. (1987). Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual review of ecology and systematics*, 18(1), 293-320.
- Pinheiro, M. C. N., Crespo-López, M. E., Vieira, J. L. F., Oikawa, T., Guimarães, G. A., Araújo, C. C., ... & Silveira, L. C. L. (2007). Mercury pollution and childhood in Amazon riverside villages. *Environment international*, 33(1), 56-61.

- Plessl, C., Otachi, E. O., Körner, W., Avenant-Oldewage, A., & Jirsa, F. (2017). Fish as bioindicators for trace element pollution from two contrasting lakes in the Eastern Rift Valley, Kenya: spatial and temporal aspects. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(24), 19767-19776.
- Post, D. M. (2002). Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 83(3), 703-718.
- Pourang, N. (1995). Heavy metal bioaccumulation in different tissues of two fish species with regards to their feeding habits and trophic levels. *Environmental Monitoring and Assessment*, 35(3), 207-219.
- Ribeiro, D. R. G., Faccin, H., Dal Molin, T. R., de Carvalho, L. M., & Amado, L. L. (2017). Metal and metalloid distribution in different environmental compartments of the middle Xingu River in the Amazon, Brazil. *Science of the Total Environment*, 605, 66-74.
- Santos, G. M. D., & Santos, A. C. M. D. (2005). Sustentabilidade da pesca na Amazônia. *Estudos avançados*, 19(54), 165-182.
- Santos, S. N., & Alleoni, L. R. F. (2013). Reference values for heavy metals in soils of the Brazilian agricultural frontier in Southwestern Amazônia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(7), 5737-5748.
- Silva, E., Costa, F. N., Souza, T. L., Viana, Z. C., Souza, A. S., Korn, M. G., & Ferreira, S. L. (2016). Assessment of trace elements in tissues of fish species: multivariate study and safety evaluation. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 27(12), 2234-2245.
- Sioli, H. (Ed.). (2012). *The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin* (Vol. 56). Springer Science & Business Media.
- Siqueira, G. W., Aprile, F., Irion, G., & Braga, E. S. (2018). Mercury in the Amazon basin: Human influence or natural geological pattern?. *Journal of South American Earth Sciences*, 86, 193-199.
- Sonoda, D. Y., & Shiota, R. (2012). Consumo de pescado no Brasil fica abaixo da média internacional. *Visão agrícola*, 8(11), 145-147.
- Sousa, E. A. D., Miranda, M. R., dos Santos, M. H., Costa Júnior, W. A., Lauthartte, L. C., Mussy, M. H., ... & Bastos, W. R. (2015). Assessment of trace metals in Amazonian fish exposed to untreated urban sewage: high chromium concentrations in fish tissues. *Revista Ambiente & Água*, 10(3), 499-509.
- Sousa, E. A., Luz, C. C., de Carvalho, D. P., Dorea, C. C., de Holanda, I. B. B., Manzatto, Â. G., & Bastos, W. R. (2016). Chromium distribution in an Amazonian river exposed to tannery effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(21), 22019-22026.

- Szalinska, E., Dominik, J., Vignati, D. A., Bobrowski, A., & Bas, B. (2010). Seasonal transport pattern of chromium (III and VI) in a stream receiving wastewater from tanneries. *Applied Geochemistry*, 25(1), 116-122.
- Tacon, A. G., & Metian, M. (2013). Fish matters: importance of aquatic foods in human nutrition and global food supply. *Reviews in Fisheries Science*, 21(1), 22-38.
- Thomaz, S. M., Bini, L. M., & Bozelli, R. L. (2007). Floods increase similarity among aquatic habitats in river-floodplain systems. *Hydrobiologia*, 579(1), 1-13.
- Tumolo, M., Ancona, V., De Paola, D., Losacco, D., Campanale, C., Massarelli, C., & Uricchio, V. F. (2020). Chromium Pollution in European Water, Sources, Health Risk, and Remediation Strategies: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 5438.
- USEPA. (2016). United States Environmental Protection Agency. Human Health Risk Assessment. Disponível em: <<https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment#self>>. Acesso em: 28 Jul. 2019.
- USEPA. (2019). Risk Assessment. United States Environmental Protection Agency. Disponível em: <<https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-users-guide>> (Acesso em: 28 Jul. 2019).
- Van der Oost, R., Beyer, J., & Vermeulen, N. P. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental toxicology and pharmacology*, 13(2), 57-149.
- Velma, V., Vutukuru, S. S., & Tchounwou, P. B. (2009). Ecotoxicology of hexavalent chromium in freshwater fish: a critical review. *Reviews on environmental health*, 24(2), 129.
- 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.
- Viers, J., Barroux, G., Pinelli, M., Seyler, P., Oliva, P., Dupré, B., & Boaventura, G. R. (2004). The influence of the Amazonian floodplain ecosystems on the trace element dynamics of the Amazon River mainstem (Brazil). *Science of the total environment*, 339(1-3), 219-232.
- Vincent, J. B. (2017). New evidence against chromium as an essential trace element. *The Journal of nutrition*, 147(12), 2212-2219.
- Walsh, A. R., & O'Halloran, J. (1996). Chromium speciation in tannery effluent—I. An assessment of techniques and the role of organic Cr (III) complexes. *Water Research*, 30(10), 2393-2400.

- Xuan, Y., Tang, C., Liu, G., & Cao, Y. (2020). Carbon and nitrogen isotopic records of effects of urbanization and hydrology on particulate and sedimentary organic matter in the highly urbanized Pearl River Delta, China. *Journal of Hydrology*, 591, 125565.
- Yohannes, Y. B., Ikenaka, Y., Nakayama, S. M., Saengtienchai, A., Watanabe, K., & Ishizuka, M. (2013). Organochlorine pesticides and heavy metals in fish from Lake Awassa, Ethiopia: insights from stable isotope analysis. *Chemosphere*, 91(6), 857-863.