



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Estudo de revisão dos elementos-traço nos sedimentos dos corpos hídricos da região Amazônica, Brasil.

Adriano Joaquim Neves de Souza¹, Murylo Augusto Ribeiro Macedo², Tatiane Priscila Bastos Bandeira³, Thais Deise Tocantins Souza de Oliveira⁴, Talissa Gertrudes Namias Tocantins de Souza⁵, Débora Monteiro Mendes⁶, Maria de Lourdes Souza Santos⁷

¹Graduado em Engenharia de Pesca pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais da UFRA e-mail: ad.aga13@gmail.com (correspondente)

²Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Pará (UEPA), Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais da UFRA. E-mail: macedomurylo@hotmail.com

³ Graduada em Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e-mail: tatiabastosbandeira@gmail.com

⁴Graduada em Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e-mail: thaisdeise25@gmail.com

⁵Graduada em Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e-mail: tnamias@gmail.com

⁶ Graduada em Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e-mail: deby.mendes111@gmail.com

⁷Professora Titular da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e-mail: mdelssantos@yahoo.com.br

Artigo recebido em 18/04/2023 e aceito em 06/07/2023

RESUMO

A poluição pelos elementos-traço nos sedimentos das bacias hidrográficas tem sido cada vez mais estudada em termos de gestão de risco ecológico. Desta forma, a partir de um levantamento bibliográfico no período de 2012 a 2022, buscou-se analisar e comparar os efeitos advindo dos elementos-traço ocorridos nos sedimentos dos corpos hídricos localizados na região Amazônica. Neste trabalho foram utilizados livros e artigos publicados, como ferramenta de pesquisa, utilizou-se o "Google acadêmico", "Periódicos CAPES", "SciELO", "Science Direct" e "Web of Science Core Collection". Com esta pesquisa foi possível observar que os elementos-traço essenciais participam em reações químicas do metabolismo celular humano, como por exemplo o ferro, manganês e entre outros são importantes nos processos biológicos para as atividades humanas, além disso os elementos-traço interagem nos sedimentos e nos corpos hídricos, podendo possibilitar caracterizar os elementos no ambiente. Os artigos mostraram valores acentuados para o ferro, o que foi relacionado à formação geológica de determinadas região Amazônica. Enquanto, o chumbo não ultrapassou o valor máximo recomendado pela Resolução CONAMA 454/2012, indicando que as concentrações descritas nos artigos estão em conformidade com a referida Resolução. O monitoramento dos elementos-traço nos sedimentos é relevante para se ter um retrato das condições ambientais dos corpos hídricos da região Amazônica. O Estado pode desenvolver políticas públicas sustentáveis para contornar os efeitos dos elementos-traço no ambiente, com base em conhecimento das concentrações nos sedimentos, biota e água.

Palavras-chave: Bacias hidrográficas, chumbo, zinco, cobre, ferro.

Review study of trace elements in sediments of water bodies in the Amazon region, Brazil.

ABSTRACT

Pollution by trace elements in watershed sediments has been increasingly studied in terms of ecological risk management. In this way, from a bibliographic survey in the period from 2012 to 2022, we sought to analyze and compare the effects arising from the trace elements that occurred in the sediments of water bodies located in the Amazon region. In this work, books and published articles were used, as a research tool, the "Academic Google", "Periódicos CAPES", "SciELO", "Science Direct" and "Web of Science Core Collection" was used. that essential trace elements participate in chemical reactions of human cellular metabolism, such as iron, manganese and among others are important in biological processes for human activities, in addition, trace elements interact in sediments and water bodies, and may make it possible to characterize the elements in the environment. The articles showed accentuated values for iron, which was related to the geological formation of certain Amazon region. Meanwhile, lead did not exceed the maximum value recommended by CONAMA Resolution 454/2012, indicating that the concentrations described in the articles are in accordance with that Resolution. The monitoring of trace elements in sediments is relevant to have a picture of the environmental conditions

Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S.

of water bodies in the Amazon region. The State can develop sustainable public policies to circumvent the effects of trace elements in the environment, based on knowledge of concentrations in sediments, biota and water.

Keywords Watersheds; lead; zinc; iron; copper

Introdução

O território brasileiro, assim como qualquer parte do globo terrestre, está todo subdividido naturalmente em diversas bacias hidrográficas. É destas bacias hidrográficas que a sociedade obtém grande parte da água utilizada para as atividades humanas no Brasil. Isso envolve o abastecimento humano, a irrigação, a dessedentação de animais e todas as atividades industriais e de serviços desenvolvidas em território brasileiro (IBGE, 2021).

A bacia hidrográfica é uma região hidrológica natural onde o escoamento da água é influenciado pelas suas feições topográficas, ou seja, a drenagem hídrica é escoada até recarregar o rio principal. A delimitação da área de uma bacia hidrográfica considera questões políticas e socioeconômicas com a finalidade de uma melhor gestão dos recursos da região (Narendra et al., 2021).

O estado do Pará possui em seu território três das doze regiões hidrográficas do Brasil (SEMAS, 2022): i) Amazônica: a maior parte do estado está inserida nessa região (73% do território paraense), constituída por uma extensa rede de rios com grande volume de água como Amazonas, Tapajós e Xingu; ii) Tocantins-Araguaia: compreendem as bacias dos rios homônimos em território paraense (24%); iii) Atlântico Nordeste Ocidental: compreende a totalidade do conjunto de bacias litorâneas que drena para o Oceano Atlântico (3%).

Contudo, o desenvolvimento de regiões por meio da industrialização e urbanização têm causado impactos diretos e indiretos nos ecossistemas aquáticos (Cunha et al., 2022). E consequentemente são responsáveis pelo lançamento de inúmeras substâncias tóxicas nos afluentes que deságuam nos corpos hídricos da região Amazônica (Veiga et al., 2022). Entre os vários poluentes, os elementos-traço ocupam um local de destaque em termos de preocupações aos ecossistemas da Terra. Como exemplo, a contaminação de elementos-traço no solo e nas águas subterrâneas, devido ao seu alto potencial de toxicidade (Shen et al., 2022).

A contaminação por elementos-traço é causada principalmente por fontes antropogênicas e naturais. Os efluentes industriais, atividades

domésticas e agrícolas são fontes antropogênicas, enquanto erosão eólica, erupções vulcânicas e combustão de combustíveis fósseis são fontes naturais (Shikha e Singh, 2021). Contudo, esses elementos também são encontrados de forma natural no ambiente a partir de processos de intemperismo da matriz geológica (Salomons e Förstner, 1984; Salomão et al., 2021).

Os elementos-traço em sua maioria não são biodegradáveis e se depositam nos grânulos intracelulares dos organismos. Quando inalados ou ingeridos, acumulam-se no organismo, resultando assim na sua entrada na cadeia alimentar. Desta forma, a toxicidade aumenta na cadeia alimentar levando a efeitos adversos no ecossistema (Sharma et al., 2022), podendo também ficar depositados nos sedimentos ou se acumular na biota (Rizk et al., 2022).

A mobilidade dos elementos-traço no sedimento é um fator influenciado pela geologia, mineralogia, hidrologia e fatores biológicos do ambiente de estudo, além de estar relacionada com a forma física, toxicidade e biodisponibilidade do elemento-traço (Cavalcante e Santos, 2021).

Dessa forma, a análise do sedimento irá constatar todos os processos que ocorrem no ecossistema aquático por ter a capacidade de acumular compostos que o torna mais importante na avaliação do nível de contaminação do meio aquático, devido desempenhar um papel de destaque na dinâmica funcional do meio, por participar de processos internos que incluem a sedimentação, ciclagem de nutrientes e decomposição da matéria orgânica, podendo ainda armazenar informações das formas e uso da bacia de drenagem (Fairbridge, 1989; Cavalcante e Santos, 2021).

A partir da análise das concentrações de elementos-traço (Et's) nos sedimentos dos cursos d'água, é possível verificar o histórico da acumulação dos elementos ao longo do tempo no ambiente de modo local, regional e comparar globalmente. Pois, são nos sedimentos que se depositam todos os compostos químicos, o que permite representar e interpretar a quantidade disponível, o desenvolvimento histórico das alterações no meio aquático, por intermédio da avaliação das concentrações dos Et's nos sedimentos (Esteves, 2011, Braga et al. 2018).

Na região Amazônia, a população local, urbana e ribeirinha, utiliza os corpos hídricos para diferentes usos múltiplos, incluindo a alimentação oriunda desse recurso natural. E a presença dos Et's afeta a biota e consequentemente a saúde da população local.

Os elementos-traço (Et's) não absorvidos pela biota, tendem a depositar nos sedimentos superficiais na sua maioria das vezes estão presentes em concentrações ou formas que oferecem risco para o meio ambiente. E com o desenvolvimento econômico e com as novas tecnologias, o aumento de forma gradativa da quantidade do Et's nos ecossistemas tem sido descrito (Cogo et al., 2020; Santos, et al., 2021). Portanto, o presente trabalho tem por objetivo fazer um levantamento bibliográfico das concentrações dos elementos-traço (Cu, Fe, Mn, Zn, Pb) em sedimentos dos corpos hídricos da região Amazônica, para descrever suas características e formas de contaminação, e quais mudanças ocorreram nos ecossistemas aquáticos amazônicos ao longo do tempo.

Material e métodos

Para confecção deste estudo foi utilizado uma revisão bibliográfica, também denominada revisão de literatura, que consiste na análise sistemática de uma vasta gama de publicações a cerca de um tema específico, buscando explicar ou debater um tema baseado em referências teóricas publicadas em livros, revistas, periódicos (Santos et al., 2023).

Neste caso específico foram realizadas buscas de artigos científicos nas bases de dados: Scielo, Web of Science, Scopus, Science Direct e Google acadêmico, utilizando para isso termos de busca como: elementos-traço em sedimentos na região Amazônica, as concentrações dos elementos-traço nos corpos hídricos da região Amazônica. Além disso, foram utilizados conectivos como “e” e “ou” para combinar os termos de busca descritos acima.

No presente estudo inclui-se apenas artigos científicos (incluindo notas científicas e artigos de revisões) e livros (incluindo capítulos), divulgados entre os anos de 2012 e 2022. Além disso, foi utilizado artigos em qualquer idioma (português, inglês, espanhol etc.). Os artigos foram selecionados quando apresentaram alguma palavras-chave utilizadas no título ou no resumo.

Desenvolvimento

Sedimentos

Os sedimentos dos recursos hídricos contêm informações completas sobre a contaminação e formam halos secundários geoquímicos ao longo dos sistemas fluviais. Consequentemente, as anomalias geoquímicas identificadas nestes sedimentos são consideradas importantes indicadores geoquímicos e ambientais (Wang, et al., 2022a).

Os sedimentos podem ser transportados por lixiviação e erosão, são considerados como registrador da poluição ocorrida no ambiente, e assim ser uma fonte de observação de risco para a saúde humana e qualidade ambiental (Cavalcante e Santos., 2021), sua importância também é descrita por servir como substrato e fonte de alimento para inúmeras espécies.

A saúde dos ecossistemas aquáticos deve ser monitorada para garantir o equilíbrio ecológico para o habitat aquático (Mohtar et al. 2019), para comunidade local, e para dar suporte aos órgãos responsáveis nas tomadas de decisões.

Uma medida comum de monitoramento dos ecossistemas aquáticos é baseada em parâmetros de qualidade física, química, biológica, e bacteriológica da água (Reginato et al., 2023) e pelas concentrações dos elementos-traço nos sedimentos, pois esses elementos são adsorvidos nos sedimentos (Albuquerque et al. 2022), desses ambientes.

Definição dos Elementos-traço

O termo elementos-traço na geoquímica são aqueles que possuem concentrações $< 1000 \text{ mg. Kg}^{-1}$ ou 0,1% de uma rocha, muito embora estejam inclusos para sistemas aquáticos, o Al, Fe, Ti e Mn que ocorrem em maiores concentrações na litosfera (Baird, 2002).

O termo “elementos traço” geralmente se refere aos elementos que são encontrados no ambiente em concentrações mínimas, mas sua presença em concentrações mais altas podem ser perigosas (Hossain, et al., 2021).

Os elementos potencialmente tóxicos (PTEs) é uma nomenclatura recentemente originada, o que significa que alguns desses elementos são tóxicos e possuem ameaças aos seres humanos e organismos vivos (Hossain, et al., 2021).

Os elementos-traço entram nos ecossistemas aquáticos por meio de uma variedade de fontes de poluição pontuais e não pontuais como resultado de processos antropogênicos e naturais (El Zokm et al., 2023).

Os elementos-traço são poluentes não degradáveis e podem existir no solo como cátions livres (por exemplo, Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+}), complexos solúveis com ligantes orgânicos e inorgânicos (por exemplo, ZnCl^+ , CdCl_3^- , citratos metálicos) ou associados a material coloidal (Muñoz-García, et al., 2022).

Apesar de não haver consenso sobre a definição deste termo, podemos descrever metais pesados como um grupo de elementos químicos com alta densidade e toxicidade, mesmo em baixas doses. Segundo Costa Filho e colaboradores (2022) descrevem que os elementos-traço têm como valor de referência uma densidade maior ou igual à 3,5 e 7,0 g/cm³, uma massa atômica acima de 23 (massa atômica do sódio) e um número atômico maior do que 20 (número atômico do cálcio). Esses compostos podem ser introduzidos de diferentes formas na natureza, porém, destacam-se entre as atividades antrópicas que mais descartam esses compostos, as atividades agrícolas e industriais (Costa filho et al., 2022). Ademais, seu descarte no ambiente pode impactar a saúde dos seres vivos, afetando diretamente os órgãos relacionados ao sistema nervoso e ao sistema circulatório, ingeridos na maioria das vezes devido ao acúmulo desses compostos entre os níveis tróficos da cadeia alimentar (Costa filho, et al., 2022).

Segundo Esteves (2011) os elementos-traço são os elementos químicos que ocorrem na natureza, de um modo geral em pequenas concentrações, não apresentando quantidades superiores a 0,1%, este termo também inclui elementos de diferentes propriedades químicas. Alguns elementos traços como Mg, Fe, Zn, Mn, Cu, Co, Mo, e B são essenciais aos seres vivos ainda que em pequenas concentrações e tem um importante papel no metabolismo dos organismos aquáticos pois participam de muitos processos fisiológicos, como o Mg na fotossíntese, o Fe e Cu na cadeia respiratória, o Mo na fixação do nitrogênio, muitos outros servem de cofatores de enzimas e participam na estrutura de determinas proteínas.

Os elementos-traços (ETs), estão presentes naturalmente nos solos, mesmo que não seja haja perturbação antrópica do ambiente. Entretanto o acúmulo excessivo pode acarretar não somente a contaminação do solo, como também de plantas, podendo alcançar a cadeia alimentar de animais e, especialmente, a humana, trazendo consequências para a qualidade e a segurança alimentar (Ferreira, et al., 2021).

Os elementos-traço são encontrados naturalmente nos sedimentos devido aos processos

de intemperismo e lixiviação, porém as atividades antropogênicas (lançamento de efluentes e dejetos de animais, deposição atmosférica, mineração, agrotóxicos e fertilizantes) vêm provocando alterações no perfil da biota (Roos, et al., 2021).

Alguns elementos-traço (Al, As, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, V, Zn) também são conhecidos como elementos potencialmente tóxicos (PTEs), que são descritos como poluentes inorgânicos, de natureza não biodegradável, com persistência, toxicidade e acúmulo na cadeia alimentar. Os PTEs são as formas mais tóxicas dos elementos-traço, e mais nocivos ao meio ambiente e a população (Shakeri et al., 2020).

Os elementos potencialmente tóxicos (PTEs) são poluentes inorgânicos que têm despertado grande preocupação em todo o mundo devido à sua natureza não biodegradável, persistência, toxicidade e acúmulo na cadeia alimentar (Shakeri et al., 2020).

Esses elementos podem entrar em ambientes aquáticos por meio de fontes geogênicas, incluindo rochas de intemperismo e erupções vulcânicas, e fontes antrópicas, como descargas industriais, atividades agrícolas, emissões de veículos, esgoto doméstico e mineração (Dang et al., 2021; El-Sorogy et al., 2020).

Embora alguns elementos-traço como Cu, Fe, Mn, Ni e Zn sejam elementos essenciais para organismos vivos e desempenhem um papel crucial em suas atividades de vida, um excesso desses metais pode ter efeitos adversos nas atividades da vida. Além disso, metais biologicamente não essenciais, como As, Cd e Pb, exibem toxicidade considerável mesmo em baixas concentrações. Os efeitos contrastantes de traços de metais em organismos variam de espécie para espécie (Li, et al., 2023).

Características dos Elementos-traço

Os elementos-traço são componentes naturais encontrados na crosta terrestre e incorporadas aos organismos vivos através dos alimentos, da água e do ar. Os principais elementos-traço presentes em fontes naturais são Ag, Cd, Cu, Mn, Mo, Pb e Zn, que são encontrados em fontes litogênicas, como por exemplo, a crosta superior, granito, basalto, pedras calcárias, xistos betuminosos, rochas, arenito. A tabela 1 mostra a faixa das concentrações desses elementos em fontes litogênicas (Iyyappan et al., 2023).

Tabela 1. Concentrações de elementos-traço em fontes litogênicas. Fonte: Adaptado de Iyyappan et al., 2023.

Elementos-traço	Faixa de concentração (mg.kg ⁻¹)
Ag	0,04 – 1,9
Cd	0,1 – 240
Cu	2 – 300
Mn	15 – 1500
Mo	0,3 – 570
Ni	2 – 2000
Pb	0,05 – 100
Zn	20 - 2000

Embora alguns elementos sejam prejudiciais como Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg), Cadmio (Cd), outros são essenciais para o desenvolvimento das funções vitais dos organismos, a exemplo do Ferro (Fe), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Manganês (Mn), no entanto, quando em excesso são prejudiciais ou mesmo letais, sendo muito tênue a margem entre a essencialidade e a toxicidade (Lešková, et al., 2022).

Enquanto em níveis tóxicos, eles prontamente aumentam a peroxidação lipídica, inibem a síntese de proteínas e interrompem o metabolismo do RNA (Gui et al., 2022).

A maioria dos poluentes, tanto orgânicos quanto inorgânicos, interrompe direta ou indiretamente o equilíbrio ecológico dos ambientes aquáticos (Ahmadi et al., 2022). Desde as últimas décadas, testemunhamos preocupações crescentes com poluentes, como a exposição a elementos-traço (Et's) e suas implicações para a saúde humana por meio do consumo de frutos do mar com níveis elevados de Et's (Ahmadi et al., 2022).

Entre os vários tipos de poluentes, os elementos-traço são de grande preocupação, dada não apenas a ampla gama de compostos com efeitos multifacetados nos ecossistemas lacustres, mas também suas várias vias de entrada, como o intemperismo do leito rochoso, processos hidrodinâmicos e deposição atmosférica (Rizk, et al., 2022).

A poluição por elementos-traço é ainda preocupante pelo fato destes elementos não serem biodegradáveis no ambiente (poluentes persistentes) e de alguns mostrarem capacidade de bioacumular e aumentarem na cadeia trófica (Ghreif et al., 2011; Förstner e Wittmann, 1981).

De acordo com Araújo et al. (2021) os metais presentes nos ambientes aquáticos, tanto na coluna d'água quanto nos sedimentos, podem estar

em formas químicas biodisponíveis. Os referidos autores descreveram os processos como:

Biomagnificação: Processo no qual compostos ou elementos químicos são transferidos do alimento para um organismo, resultando em concentrações mais altas quando comparadas aquelas da fonte alimentar. Ocorre quando compostos químicos e/ou elementos (agentes químicos) passam a apresentar maiores concentrações nos tecidos conforme o nível trófico aumenta. Irreversível.

Bioacumulação: Acúmulo de contaminantes ou poluentes (e/ou seus metabólitos) em tecidos de animais e plantas ao longo de um período de tempo típico, que representa um evento de exposição daquele indivíduo ao agente químico presente no ambiente onde vive. Pode ser reversível.

Biodisponibilidade: Propriedade ecológica de agentes químicos no meio ambiente aquático (água, biomassa ou sedimentos) que determina se o mesmo será mais, ou menos, assimilado pela biota com a qual interagir. Pode ser reversível ou modificado.

A poluição por elementos-traço tem sido considerada um dos mais sérios problemas ambientais, principalmente em áreas influenciadas pelas atividades humanas. As principais fontes antrópicas de contaminação ambiental por metais pesados são os fertilizantes, pesticidas, água de irrigação contaminada, combustão de carvão mineral e óleo, gases emitidos por veículos a combustão, incineração de resíduos urbanos e industriais, e indústrias de mineração, fundição e refinamento (Kabata-Pendias, 2011, Ferreira, et al., 2021).

Os elementos-traço geralmente se referem a metais e metalóides com densidades superiores a 4,5 g/cm³ (como Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, As, Hg e Cd), e o acúmulo de metais pesados em lagos representa sérios riscos aos organismos aquáticos e à saúde humana. Portanto, muita atenção deve ser dada à poluição por metais pesados em lagos; no entanto, os metais pesados em lagos têm atraído cada vez mais atenção apenas nas últimas décadas e se tornaram uma área de grande interesse no controle da poluição de lagos (Li, et al., 2022).

Elementos-traço essenciais, como zinco e cobre, cumprem importantes funções fisiológicas; no entanto, sua bioacumulação além de certos limites torna-se altamente tóxica para os seres humanos. Metais não essenciais, como chumbo, cádmio e mercúrio, são extremamente perigosos tanto para os seres humanos quanto para o meio ambiente. Esses elementos não essenciais se

bioacumulam em qualquer organismo, levando a danos nos tecidos, seguidos por uma ampla série de distúrbios e efeitos tóxicos significativos ao longo das cadeias alimentares.

Elementos-traço

Chumbo (Pb)

O chumbo é o elemento-traço mais conhecido desde a antiguidade, sendo sua presença mais antiga datada no ano de 3800 a.C. (Pilon, et al., 2022).

Após a Revolução Industrial, ocorreu um aumento drástico no uso do chumbo, momento em que passou a ser um dos mais importantes metais por apresentar características como boa maleabilidade, baixo ponto de fusão, resistência à corrosão, alta densidade entre outras. Seu uso generalizado levou a uma grande contaminação não só ambiental, como também resultou em exposição humana, o que gerou significativos problemas de saúde pública em muitos países. (OMS, 2021; Pilon, et al., 2022).

O chumbo (Pb) ocorre em concentração média na crosta terrestre de 15 mg kg⁻¹. Sua concentração em rochas ígneas e matrizes argilosas, varia de 10 a 25 mg kg⁻¹ e 14 a 40 mg.kg⁻¹ (Kabata-Pendias, 2011). Na natureza este elemento ocorre principalmente na forma Pb²⁺, embora seja conhecido também o Pb⁴⁺. Tyler e Olsson (2001) citam que o chumbo é o elemento-traço mais estável no solo, e que o tempo necessário para uma redução de 10% da sua concentração total por lixiviação em solos foi calculado em aproximadamente 200 anos. Kitagishi e Yamane (1981) calcularam que o período para que a quantidade total de Pb no solo diminua pela metade varia de 740 a 5.900 anos.

Zinco (Zn)

O zinco é um nutriente essencial para o corpo humano e funciona na manutenção da estrutura das proteínas, catálise enzimática e transmissão de informações. No sistema reprodutor masculino, desempenha um papel importante no desenvolvimento gonadal, espermatogênese e motilidade, síntese de hormônios etc. (Te, et al., 2023).

Förstner et al., (1989) relataram que elementos-traço como Cu, Pb, Cd e zinco (Zn) representam sérios riscos à saúde dos ecossistemas aquáticos devido à sua toxicidade de curto e longo prazo. Foi discutido que depois que as microalgas foram invadidas por elementos-traço (Et's), o mecanismo de defesa das microalgas reduziu o

dano do elemento às células, alterando o transporte dos Et's dentro e fora das células (Kong et al., 2021).

Manganês (Mn)

O manganês (Mn) está naturalmente presente nas águas superficiais e na biota e está disponível em várias formas, incluindo sais de Mn e quelatos. É um elemento abundante encontrado em ecossistemas terrestres e costeiros e ajuda nos processos metabólicos de plantas e animais e é encontrado em todas as pequenas quantidades do corpo (Dey, et al., 2023).

Atua como um micronutriente essencial para os processos fisiológicos do meio ambiente. Anualmente, estima-se que 300 a 400 milhões de toneladas de elementos-traço, lama tóxica e outros materiais nocivos são descartados nos corpos d'água causando um impacto imensurável ao ecossistema (Dey, et al., 2023).

A presença de Mn na rocha e no solo produzirá uma fonte onde o Mn pode se dissolver no solo ou nas águas superficiais ou pode ser deixado como sedimentos, o que ajuda ainda mais na dissolução (Napper, et al., 2022).

No ambiente, o manganês é originário principalmente de diferentes fontes e atividades, ou seja, geogênicas e antropogênicas, e em diferentes concentrações (Nkele, et al., 2022).

O manganês é um elemento-traço precioso e único que possui diversas aplicações industriais e metalúrgicas (Nkele, et al., 2022). Isto é atribuído à sua notável versatilidade e propriedades indispensáveis que inspiram grosseiramente a necessidade cada vez maior deste elemento para inúmeras aplicações industriais (Nkele, et al., 2022).

Desde então, o manganês ganhou recentemente imensa atenção e interesse, e isso contribuiu significativamente para o crescimento de qualquer esfera da economia que produz manganês (Nkele, et al., 2022).

No ano de 2020, a produção mundial de minério de manganês teve redução de cerca de 7% quando comparada ao ano de 2019, chegando a 20,3 milhões de toneladas (IMnI, 2020). Os principais países produtores de manganês são África do Sul, Austrália, Gabão, Brasil, China e Índia (Figura 1), somando juntos, cerca de 76% de todo o manganês produzido mundialmente. No entanto, a importação do minério de manganês é liderada pela China, Índia, Rússia, Coreia do Sul e Malásia (IMnI, 2020).

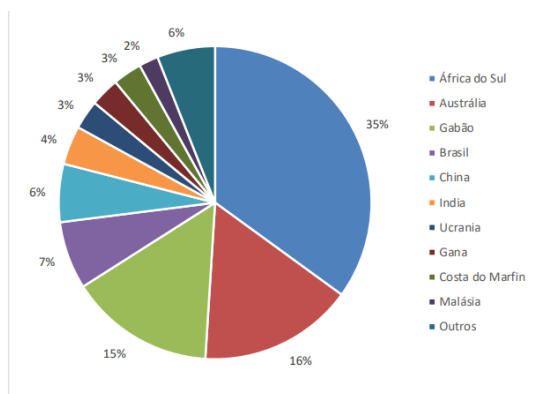


Figura 1: Produção global de minério de manganês no ano de 2020. Fonte: IMnI, 2020.

Cobre (Cu)

O cobre é um metal de transição de primeira linha e um mineral essencial que desempenha papéis-chave em funções fisiológicas, como servir como cofator para muitas enzimas envolvidas na produção de energia e metabolismo (Trevino, et al., 2022).

No entanto, como acontece com muitos minerais essenciais, quantidades excessivas podem resultar em toxicidade. O cobre é comum no meio ambiente e a contaminação do solo e dos cursos de água pode ocorrer a partir de fontes agrícolas, onde o cobre é encontrado em pesticidas e fertilizantes, e de fontes industriais, como mineração e operações de manufatura (Trevino, et al., 2022).

O cobre é essencial para o desenvolvimento normal e função do corpo humano. Como fator auxiliar crítico, o cobre catalisa a respiração celular, a oxidação do ferro, a formação de pigmentos, a biossíntese de neurotransmissores, a defesa antioxidante, a amidação de peptídeos e as reações de transferência de elétrons exigidas pelo tecido conjuntivo (Shi, et al., 2023).

Ferro (Fe)

Dentre os oito elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre, o ferro figura em quarto lugar com cerca de 5% em massa (Figura 2). Os outros elementos são oxigênio (46,6%), silício (26,72%), alumínio (8,13%), cálcio (3,63%), sódio (2,83%), potássio (2,59%) e magnésio (2,09%). Esses elementos correspondem aproximadamente a 97,59% da massa da crosta terrestre. É possível, pois, inferir que a crosta terrestre é formada principalmente por compostos de oxigênio na forma de óxidos, hidróxidos e aluminosilicatos (Duarte, 2019).

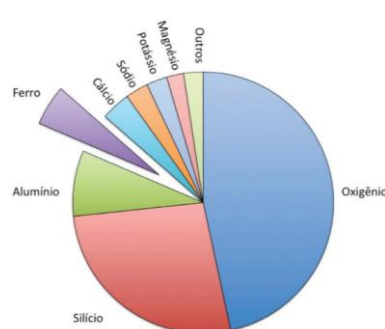


Figura 2: Distribuição dos elementos químicos na crosta terrestre. Fonte: Duarte, 2019.

O ferro é um elemento ubíquo na crosta terrestre. Pode ser encontrado em grandes jazidas, na forma de minerais com teores extremamente variáveis mesmo como elemento traço. O ferro apresenta propriedades químicas e físicas que o faz importante em processos químicos e físicos, no ambiente mineral e nos sistemas biológicos (Duarte, 2019).

O ferro é um elemento-traço essencial para a vida humana, devido ao seu papel no transporte de oxigênio e à sua participação em diversas reações redox (Miranda et al., 2023).

As proteínas contendo ferro desempenham um papel importante em muitos processos biológicos, incluindo respiração celular, detecção de oxigênio, transporte e metabolismo de oxigênio, metabolismo energético, síntese e reparo de DNA e sinalização. No entanto, a sobrecarga de ferro pode ser prejudicial, causando estresse oxidativo, dano ao DNA e carcinogênese (Wang et al., 2022b).

O rejeito de ferro, como recurso secundário valioso, é uma parte com baixo teor de elementos valiosos produzidos durante o processamento e aproveitamento do minério de ferro. O processamento e utilização eficientes de rejeitos de ferro serão positivos para economizar energia, proteger o meio ambiente, produzir uma produção mais limpa e melhorar os benefícios econômicos (Xu et al., 2022).

Índices ecológicos em sedimentos

Nos últimos anos, a avaliação de risco a saúde humana tornou-se uma metodologia amplamente aplicada para avaliar os riscos potenciais derivada da exposição a poluentes ambientais como os elementos-traços que podem contaminar a água (Alves, et al., 2014).

A contaminação do ecossistema aquático pelos elementos-traço ameaça a saúde assim como ocasiona a degradação da qualidade da atmosfera, das águas superficiais, águas subterrâneas,

sedimentos e níveis tróficos. Os elementos-traço em níveis alto são considerados cancerígenos a qual podem levar a doenças relacionadas a problemas renais, sanguíneos, cardiovasculares e ósseas (Diami, et al. 2016). A ingestão excessiva dos elementos-traço como por exemplo o chumbo (Pb) tem a capacidade de danificar o sistema nervoso, enzimático e imunológico de quem está exposto ao mesmo. O risco ambiental devido a esses elementos causa efeito irreparáveis a biota considerando os impactos toxicológicos que os elementos causam no meio ambiente (Diami, et al. 2016).

Os índices de risco ambiental consistem em abordagens quantitativas e integradoras de dados ambientais, capazes de subsidiar, de forma mais efetiva, a tomada de decisão em medidas de saúde pública e de controle da poluição ambiental, incluindo a hierarquização de áreas críticas para remediação, gestão de custos ambientais e a indicação de receptores ecológicos a serem prioritariamente protegidos (Cesar, et al. 2015).

Índice de Geoacumulação (Igeo)

Segundo Kasilingam et al. (2016), o índice de geoacumulação (Igeo) foi originalmente definido por Müller (1969) para determinar a concentração de metais nos sedimentos, comparando as concentrações atuais com os níveis pré-industriais.

O índice de geoacumulação é calculado com a seguinte equação:

$$Igeo = \log_2 (C_n/1,5 B_n)$$

onde C_n é a concentração medida do metal examinado n nos sedimentos e B_n é a concentração de fundo geoquímico do metal n da média crustal (Taylor e McLennan, 1995).

A qualidade do sedimento é classificada com base nos valores de Igeo: a) 0 - não poluído, b) > 0 a 1 - não poluído a moderadamente poluído, c) > 1 a 2 - moderadamente poluído, d) > 2 a 3 - moderadamente poluído a fortemente poluído, e) > 3 a 4 - fortemente poluído, f) > 4 a 5 - fortemente a extremamente poluído g) > 5 - extremamente poluído (Silva et al., 2017).

Para caracterizar a contaminação e os riscos potenciais à biota local, são aplicados dois índices para avaliar a qualidade dos sedimentos dessas áreas. Primeiramente, um fator de enriquecimento, denominado por Hakanson (1980) como (FC) (fator de contaminação (Nascimento Monte, et al. 2021).

Fator de enriquecimento (FE)

Este índice é calculado com base em um elemento de normalização (Fe ou Al) que modera a variação produzida por sedimentação heterogênea. Nesse índice, o Fe é usado como um elemento normalizador devido à sua enorme disponibilidade (Loring, 1991).

O FE foi calculado com a seguinte equação 1:

$$EF = (\text{metal/Fe})_{\text{amostra}} / (\text{metal/Fe})_{\text{background}}$$

Em termos comparativos para os valores de background foram utilizados os dados médios das concentrações dos metais pesados presentes na crosta terrestre, de acordo com Taylor e McLennan (1985), com concentrações médias para Fe, Mn, Cu, Pb e Zn de $44.900 \mu\text{g.g}^{-1}$, $700 \mu\text{g.g}^{-1}$, $55 \mu\text{g.g}^{-1}$, $12,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ e $70 \mu\text{g.g}^{-1}$, respectivamente.

Índice de risco ecológico potencial (IREP)

O Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP), proposto por Hakanson (1980) e amplamente utilizado por outros autores (Zhang et al., 2012; Fiori et al., 2013), permite calcular a modelagem e a estimativa numérica do risco ecotoxicológico dos elementos-traços à biota aquática, levando em consideração os valores de background da área a ser investigada, o comportamento biogeoquímico dos elementos-traço e sua toxicologia.

O IREP não avalia somente o grau de contaminação nos sedimentos, além disso associa a toxicidade com os efeitos ecológicos e ambientais e permite a classificação de cada nível de risco potencial. O IREP foi calculado de acordo com Hakanson (1980) e adaptado por Fiori et al. (2013) para regiões tropicais, e consiste na estimativa numérica do Fator de Contaminação (FC); Fator de Resposta Tóxica (FRT); e Fator de Risco Ecológico Potencial (FR) para cada contaminante. As equações que descrevem esses fatores são:

Fator de contaminação

Os valores do FC são classificados em: FC < 1 - baixa contaminação; FC entre 1 e 3 - contaminação moderada; FC entre 3 e 6 - contaminação considerável; FC < 6 - alta contaminação (Hakanson, 1980).

O fator é calculado pela razão entre a concentração do elemento-traço e sua concentração de fundo no local de amostragem.

Equação 2: Cálculo do fator de contaminação

$$FC = \frac{C}{C_0}$$

Fator de Resposta Tóxica (FRT)

O Fator de Resposta Tóxica (FRT) considera os atributos comparativos de cada sistema ou contaminantes e avalia os processos de forma geral, consistindo na segunda vertente da elaboração do IREP (Fiori, et al. 2013). O Fator de Resposta Tóxica (FRT) é o quociente do Fator de Toxicidade relacionada ao Sedimento (FTS) com o Fator de Sensibilidade do Sistema (FS), conforme observado na equação 3:

Equação 3: O cálculo do Fator de resposta tóxica (FRT)

$$FRT = \frac{FTS}{FS}$$

Fator de Toxicidade do Sedimento (FTS)

O Fator de Toxicidade relacionada ao Sedimento (FTS) consiste em atribuição numérica dada para cada um dos metais considerados mais importantes em estudo de contaminação aquática (Hg, Cd, As, Pb, Cu, Cr e Zn) onde se considera com propriedade que cada substância tem seu efeito toxicológico diferenciado (Fiori, et al. 2013).

A partir dos princípios citados acima, classificou-se os seguintes elementos-traços em ordem decrescente de toxidez:

Hg = 40 > Cd = 30 > As = 10 > Cu = Pb = 5 > Cr = 2 > Zn = 1.

Fator de sensibilidade (FS)

No ambiente existem diversos fatores que influenciam a toxicidade dos contaminantes no ecossistema aquático, a qual alguns desses são denominados fatores de sensibilidade são: pH, salinidade, tempo de residência da água e estado trófico do meio (Fiori, et al. 2013).

O estado trófico do sistema influencia a biodisponibilidade do metal uma vez que, em sistemas aquáticos eutróficos, os metais estão menos disponíveis devido aos efeitos de complexação e de diluição biológica (Håkanson, et al., 2003).

O somatório dos Fatores de Risco para cada contaminante é o Índice de Risco Ecológico Potencial do sedimento (Equação IV).

Equação 4: O cálculo do Índice de Risco Ecológico Potencial do sedimento.

$$\sum_{i=1}^n FRi$$

Resultados e Discussão

Os artigos mostraram valores acentuados para o ferro, o que foi relacionado a formação geológica de determinadas região Amazônia. Enquanto, o chumbo não ultrapassou o valor máximo recomendado pela Resolução CONAMA 454/2012, indicando que as concentrações descritas nos artigos estão em conformidade com a referida Resolução.

A avaliação dos níveis dos elementos-traço tem acontecido tanto em águas (Meng et al., 2008), materiais particulados, sedimentos (Freret-Meurer et al., 2010; Bai et al., 2011) e em organismos aquáticos (Chakraborty et al., 2014).

Guarda e colabores (2021) descreveram valores de ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn) e chumbo (Pb), nos sedimentos superficiais e na água do rio Formosa em Tocantins (Tabela 2), e observaram que as concentrações elevadas dos Et's foram em pontos próximos a locais onde existem atividades agrícolas, o que denota fontes difusas desses elementos para os ecossistemas aquáticos.

Cavalcante e Santos (2021) analisaram os seguintes elementos-traço: Zinco (Zn), Cobre (Cu), Chumbo (Pb) e Manganês (Mn) nos sedimentos do Furo da Laura, em áreas de manguezal, localizada no município de Vigia de Nazaré – PA. Os autores concluíram que as concentrações de Cu (Tabela 2) retrataram uma condição natural do elemento no local, e que a baixa concentração de Cu pode ser associada a alta concentração de matéria orgânica no sedimento do Furo da Laura, Zhang et al. (2018) sugeriram que altas concentrações de matéria orgânica aumentam a mobilidade de Cu no sedimento.

Em relação ao Pb (Tabela 2), Cavalcante e Santos (2021) descreveram valores em conformidade com a pela Resolução CONAMA nº 454/2012, no entanto um valor se encontrou acima do valor limiar de probabilidade de efeitos adversos à biota pela legislação CONAMA nº 454/2012, Nível 1 (46,7 mg kg⁻¹). Esse valor foi associado a localização do ponto ter próximo uma indústria, o que sinalizou um princípio de contaminação por este elemento na área de estudo.

O Zn é um elemento-traço necessário para atividade do ecossistema e para o seu funcionamento dos processos fisiológicos e metabólicos, porém, como todo elemento-traço em grandes concentrações, podem tornar-se tóxicos (Borah et al., 2018). As concentrações de Zn (Tabela 1) descritas por Cavalcante e Santos (2021)

não se encontravam acima da Resolução CONAMA nº 457/2012. Contudo os valores máximos detectados pelos referidos autores foram relacionados as atividades industriais desenvolvidas no município de Vigia- PA. Esse fato foi retratado por Milesi et al. (2008) que verificaram que as atividades industriais e a proximidade com os perímetros urbanos são os principais contribuintes para a contaminação da água e do sedimento por Zn. Além disso, existe a contribuição do elemento-traço por processos sedimentares provenientes da geologia local (Krauskopf, 1972; Cavalcante e Santos, 2021).

Por outro lado, elementos-traço, como o Ferro, pode ocorrer naturalmente em altas concentrações em sedimentos. Ao estudarem os rios Mocajuba e Pará nos municípios de Curuçá (PA) e Barcarena (PA), respectivamente, Vilhena et al. (2021) verificaram que o principal elemento traço presente nos sedimentos desses rios foi o ferro. Os autores relacionam essas altas concentrações ao intenso intemperismo tropical que afeta as rochas e sedimentos da região (Tabela 2).

O mesmo foi verificado por Salomão et al. (2021) em relação às concentrações de ferro e manganês nos sedimentos do rio Parauapebas, em Parauapebas (PA). As concentrações destes elementos foram explicadas pela geologia local e intemperismo de rochas metamáficas. Entretanto, os autores não descartam a contribuição antropogênica, sugerindo estudos adicionais (Tabela 2).

Melo e colaboradores (2020), ao avaliarem os sedimentos dos três principais rios de Manaus (Mindu, Quarenta e Tarumã-Açu), observaram que o zinco foi abundante nos três rios estudados, seguido do cobre. O padrão de distribuição dos Et's foi relacionado à contribuição de fontes de poluição, como efluentes domésticos e atividades industriais. Contudo, os autores afirmaram que nenhum dos rios estudados teve valores acima do limite de alta probabilidade de efeitos adversos sobre a biota, de acordo com Resolução CONAMA nº 454/12 (Tabela 2).

Na região estuarina do Amapá, o zinco foi um dos elementos predominantes nos sedimentos do rio Cunãni estudados por Xavier et al. (2020). Porém, nem o zinco, o cobre e o chumbo apresentaram risco ecológico (Tabela 2).

Constantino et al. (2019) constataram altas concentrações de zinco, cobre e chumbo nos sedimentos em rios da região de Itacoatiara, no estado do Amazonas. Os autores verificaram as concentrações dos elementos, tanto em água

quanto nos sedimentos, foram aceitáveis em relação aos níveis recomendados para proteção da vida aquática (Tabela 2).

Na Região Metropolitana de Belém, capital do Estado Pará, os mananciais de abastecimento de água, Lagos Bolonha e Água Preta, sofrem com a urbanização desordenada em seu entorno. Os sedimentos superficiais do lago Água Preta foram estudados por Oliveira e colaboradores (2018), os quais descreveram níveis de cobre (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb). Para o Cu e o Zn os valores obtidos ficaram abaixo do TEL (*Threshold Effect Level*) e PEL (*Probable Effect Level*), somente o Pb teve em algumas amostras valores acima do TEL (Tabela 2). De acordo com Oliveira et al. (2018) os valores de TEL e PEL servem para estabelecer critérios para avaliação da qualidade dos sedimentos e do significado toxicológico das substâncias associadas a eles.

Além da origem natural, a liberação de Pb ocorre principalmente pelas atividades de mineração, através/ por intermédio da combustão de carvão e gasolina, produção de ferro, aço e cimento, fundição de elementos-traço não ferrosos, poeiras, minério de chumbo doméstico, exaustão de veículos e pó metalúrgico, e junto com o intemperismo, contribui com a contaminação para o meio ambiente (Wang et al., 2017).

Oliveira et al. (2018) observaram forte correlação entre o Cu e o Pb ($r=0,9997$), o que indicou a mesma fonte desses elementos-traço para o lago Água Preta. Esses dois elementos-traços também apresentaram forte correlação com o nitrogênio inorgânico (NI), o que foi relacionado à natureza do efluente lançado no lago, bem como à associação geoquímica entre essa forma de N e os elementos-traço Cu e Pb.

O Cu detectadas por Santos et al. (2018) ficaram abaixo dos valores descritos pela Resolução do CONAMA nº 457/2012, do TEL e do PEL conforme observado na tabela 1, o que segundo os autores indicou que não havia efeito prejudicial a comunidade biológica.

De acordo com Maldonado et al. (2009) e Santos et al. (2018), a entrada de elementos-traço é facilitada pela dispersão de materiais particulados no ambiente, pois tais elementos entram em contato com o solo ou o ar e são espontaneamente carregados para os corpos hídricos, no qual eles podem ficar disponíveis ou armazenados no sedimento.

Santos et al. (2018) e Oliveira et al. (2015) calcularam o Fator de Contaminação (FC) nos sedimentos superficiais da baía do Guajará, para os elementos (Cr, Cd, Fe e Cu), e avaliaram que a

Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S.

concentração dos elementos-traço no sedimento desse corpo hídrico, não afetava a biota aquática.

No trabalho de Carvalho e colaboradores (2018) no lago Puruzinho em Amazonas, os mesmos discorreram sobre os elementos-traço em destaque para o cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn) e chumbo (Pb) em duas zonas: A é sem influência direta do rio Madeira e enquanto a B tem diretamente influência deste corpo hídrico no lago (Tabela 2).

Nos ambientes aquáticos de águas negras como o Lago Puruzinho são ricas em matéria orgânica (Almeida et al., 2014). Os elementos-traço presentes nesses ambientes originam-se principalmente da lixiviação do solo de florestas adjacentes, onde elementos mais móveis como Zn e Cu pode adsorver em substratos orgânicos e posteriormente entrar no rio (Lacerda et al., 1990). A matéria orgânica dissolvida desempenha um papel essencial nos ecossistemas aquáticos naturais, especialmente porque elementos-traço como Cu e Pb interagem com ele por adsorção, troca iônica, ou complexação (Bezerra et al., 2009). No ambiente natural, o Zn é normalmente encontrado como sulfeto, e pode associar com elementos-traço como Pb, Cd e Cu (Siqueira et al., 2006).

Coringa et al. (2016) realizaram no rio Bentos Gomes em Mato grosso, análises do Fe, Cu, Zn, Cr, Ni e Mn. E observaram que o Fe e o Mn tiveram maior ocorrência nas amostras de sedimentos (Tabela 2). Também foi determinado o Fator de Mobilidade Individual (Fmi) com a média dos elementos-traço, segundo os autores os elementos-traço mais móveis foram o Mn seguido do Zn (no período seco da região) e do Ni (no período chuvoso da região), com Fmi variando de 55,1 a 96,8 (Mn), 22,8 a 63,2 (Zn) e 18,3 a 37,5 (Ni), enquanto o elemento-traço menos móvel foi o Fe (3,4 a 10,5). A maioria dos elementos-traço apresentaram maior Fmi na época chuvosa no Pantanal, com exceção do cobre.

Foi observada uma forte correlação com o teor de Fe e Cu, Zn e Mn, o que sugeriu a adsorção na forma de precipitado de óxidos/hidróxidos de Ferro. A precipitação de óxidos hidratados de Fe está associada com o transporte e a disponibilidade de elementos-traço, que influenciam as trocas na interface água-sedimento (Coringa et al., 2016).

A granulometria e o teor da matéria orgânica também são fatores que afetam a distribuição dos elementos-traço no ambiente (Farkas et al. 2009; Bartoli et al. 2012).

Santos et al. (2013) e Kalina et al. (2013) demonstraram que a matéria orgânica é muito

importante na distribuição e dispersão dos elementos-traço, principalmente para o Cu e Zn, que têm forte ligação com os compostos orgânicos no meio, uma vez que há formação de complexos estáveis e solúveis de íons metálicos com as substâncias húmicas, podendo servir como transportadores dos elementos-traço tóxicos, incrementando o transporte no meio aquático (Meurer, 2006).

Lima et al. (2015) analisou os sedimentos superficiais do Furo da Laura, Vigia – PA. E descreveram que o Mn na natureza se encontra combinado com outros elementos, formando minerais, na sua maioria, óxidos. Seus depósitos nos sedimentos são resultantes de alterações de outros pré-existentes ou da concentração de minerais de manganês, quando outros minerais foram removidos por algum tipo de intemperismo e/ou processo químico (Junior et al., 2005; Lima, et al., 2015). Os níveis de Mn (Tabela 2) detectados foram relacionados à proximidade com o município de Vigia, indicando haver uma contribuição antrópica.

Os teores mais elevados da maioria dos elementos (Fe) durante o período de menos chuvoso foram encontrados no solo de uma das casas da Vila Princesa no ponto 9, o que pode estar associado ao fato do local já ter sido utilizado para deposição de lixo no passado. Neste período, as concentrações de Cu, Pb e Zn excederam os valores de intervenção em solos utilizados para áreas agrícolas segundo a CETESB (2005).

Siqueira e Aprile (2013) na bacia do rio Aurá, Região Metropolitana de Belém-PA, análises dos elementos-traço em destaque para Mn e Cu. Com relação aos gradientes de distribuição dos íons dos elementos-traço avaliados (Tabela 2), conclui-se que, à exceção do Mn, ocorreu um decréscimo nos teores desses em direção a foz do Rio Aurá, sugerindo a não formação de estoques metálicos nos sedimentos ao longo da bacia. Os sedimentos superficiais coletados na bacia revelaram um padrão granulométrico dominado pela classe textural areno-lamoso, contendo argilominerais como caulinita, illita e esmectita, que favoreceram a adsorção metálica no sedimento de fundo. Além disso, os sedimentos podem estar sendo adsorvidos aos óxidos hidratados e hidróxidos dos elementos-traço mais abundantes na região como o Al e Fe. Em decorrência dessa adsorção, acredita-se estar havendo uma baixa biodisponibilidade de ETs para a cadeia trófica local (Siqueira e Aprile, 2013).

Santos e colaboradores (2012) no Igarapé dos Tanques (IG) e na Lixeira Urbana do

Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S.

Município de Porto Velho, ambos em Rondônia, analisaram os Zn, Mn, Fe, Cu e Pb (Tabela 2) durante os períodos sazonais da região.

A maior contribuição para as concentrações de Fe no igarapé dos Tanques pode ter sido de origem natural, devido ao carreamento de partículas através dos processos de lixiviação. Cerca de 58% dos solos do estado de Rondônia são classificados como latossolos, que possuem como característica a presença de altos teores de óxidos de ferro (SEDAM, 2002). As concentrações de Mn também se destacaram e, segundo Fadigas et al. (2006), os latossolos são caracterizados por também apresentarem teores consideráveis deste elemento. Os demais elementos avaliados (Zn, Cu e Pb) provavelmente foram provenientes da

atividade antrópica, tais como os efluentes domésticos e comerciais, e do deflúvio superficial urbano lixiviado para o sistema aquático (Santos et al., 2012).

Os elevados valores de Fe indicaram que além da presença de materiais que são potenciais fontes de ferro no lixão há também uma grande contribuição do tipo de solo da região para o incremento desses teores nas amostras. Quanto aos altos valores de Zn em alguns foram relacionados com os materiais observados em campo, como a borracha. Segundo Rousseaux (1992), esse tipo de material é responsável por 32 a 37% do Zn no composto de lixo urbano (Santos et al., 2012).

Tabela 2. Concentrações dos elementos-traço nos sedimentos superficiais dos corpos hídricos da região Amazônica. Fonte: Os Autores.

	Concentrações (mg.Kg ⁻¹)		
Elemento-traço	Min. – Máx.	Autor	Ano/Local
Fe	10 -300	Guarda et al.	2021/ Rio Formosa, TO
Zn	-		
Cu	0,001 – 29,93		
Mn	36 – 2.765		
Pb	<0,006		
Fe	0,42-35,4	Salomão et al.	2021/rio Parauapebas, PA
Zn	3-304		
Cu	1,4-556		
Mn	69-6.420		
Pb	-		
Fe	30.959- 139.979	Cavalcante e Santos	2021/Furo da Laura, Vigia- PA
Zn	57,2-133		
Cu	12,4 -21,7		
Mn	244,1- 681		
Pb	16,9-49,5		
Fe	-	Melo et al.	2020/rio Mindu, Manaus- AM
Zn	17,42- 113,09		
Cu	2,68 - 41,64		
Mn	1,49- 23,76		
Pb	1,15-10,32		
Fe	-	Melo et al.	2020/rio Quarenta, Manaus- AM
Zn	20,60-174,86		
Cu	4,27-44,86		
Mn	1,11-20,64		
Pb	1,09-17,85		
Fe	-	Melo et al.	2020/rio Tarumã-Açu, Manaus
Zn	1,05-7,16		
Cu	0,22-1,40		
Mn	0,66-3,14		
Pb	0,48-3,00		

Fe	-	Xavier et al.	2020/rio Cunãní, AP
Zn	46,00-93,00		
Cu	6,00-26,50		
Mn	-		
Pb	8,60-27,10		
Fe	-	Oliveira et al.	2018/Lago água Preta, Belém-PA
Zn	16,2-45,69		
Cu	13,48-30,47		
Mn	-		
Pb	50,1-114,8		
Fe	950,6- 7357,9	Santos et al.	2018/ Baia do Guajará, Belém-PA
Cu	1,2- 14,7		
Zn	-		
Mn	-		
Pb	-		
Fe	15.949,9- 42626,4	Carvalho et al.	2018/Lago Puruzinho, Amazonas
Zn	17,9-113,9		
Cu	4,1-22,4		
Mn	33,8-568,3		
Pb	5,4-16,5		
Fe	830-15.170	Coringa et al.	2016/Rio Bento Gomes, MT
Zn	4,51-46,05		
Cu	0,48-22,11		
Mn	135,83-652,5		
Pb	-		
Fe	-	Lima et al.	2015/ Furo da Laura, Vigia- PA
Zn	-		
Cu	-		
Mn	421-747		
Pb	-		
Fe	-	Siqueira e Aprile	2013/ Rio Aurá, Belém-PA
Zn	-		
Cu	10,5-28,8		
Mn	204,9-979,6		
Pb	-		
Fe	24.817-472.653	Santos et al.	2012/ Igarapé dos Tanques e lixão, Porto Velho, Rondônia
Zn	0,35-1.606		
Cu	0,76-892		
Mn	5,83-869		
Pb	0,32-305		

Conclusão

O monitoramento dos elementos-traço nos sedimentos é relevante para se ter um retrato das condições ambientais dos corpos hídricos da região Amazônica. O Estado, pode desenvolver políticas públicas sustentáveis para contornar os efeitos dos elementos-traço no ambiente, com base em conhecimento das concentrações nos sedimentos, biota e água.

A presença dos elementos-traço em determinadas concentrações pode causar impactos

imensuráveis para a biota do ambiente, e consequentemente ao ser humano. No entanto é importante destacar que é além das fontes antropogênicas, as fontes naturais também devem ser observadas, como por exemplo, a geologia local.

As concentrações do ferro e do manganês tiveram valores altos descritos entre os de 2012 a 2021, e que foram relacionados a geologia local.

Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S.

Agradecimentos

Agradeço, a CAPES pela concessão da bolsa e imensamente, a orientadora Dra. Maria de Lourdes Souza Santos e à equipe do LQA pela troca de conhecimento no dia a dia do laboratório e apoio dado para o desenvolvimento da pesquisa bibliográfica sobre os elementos-traço no ecossistema aquático da região Amazônica e em especial a Mary (Tatiane Bandeira) pelo companheirismo.

Referências

- Ahmadi, A., Moore, F., Behnam Keshavarzi, B., Shahimi, H., Hooda, P. S. Bioaccumulation of selected trace elements in some aquatic organisms from the proximity of Qeshm Island ecosystems: Human health perspective, Marine Pollution Bulletin, Volume 182, 2022, 113966, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113966>.
- Albuquerque, M. G., Sousa, S. S. O. D., Arruda, V. C. M. D., El-deir, S. G. 2022. Uso de bioindicadores como auxílio no monitoramento de rios com presença de dejetos de animais: revisão de literatura. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica, p. 245–257, 6 abr. 2022. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.1.77686>.
- Almeida, R., Bernardi, J. V. E., Oliveira, R. C.; Carvalho, D. P., Manzatto, A. G.; Lacerda, L. D.; Bastos, W. R., 2014. Flood pulse and spatial dynamics of mercury in sediments in Puruzinho lake, Brazilian Amazon. *Acta Amazonica* [online], 44 (1), 99-105. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672014000100010>. Acesso: 12 jun. 2022.
- Araújo, M.C.B., Costa, M.F., Silva-cavalcant, J.S., Santana, N., Jr. (2021). Poluição Aquática, Ciências do mar: dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil: oceano, clima, ambientes e conservação/[editores] Danielle de Lima Viana ... [et al.]. -- 1. ed. -- Olinda, PE: Via Design Publicações, 2021.
- Alves, R.I., Sampaio, C.F., Nadal, M., Schuhmacher, M., Domingo, J.L., Segura-Muñoz, S.I. (2014). Concentrações de metais em águas superficiais e sedimentos do rio Pardo, Brasil: riscos à saúde humana. *Pesquisa ambiental*, 133, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.012>.
- Bai, J., Cui, B., Chen, B., Zhang, K., Deng, W., Gao, H., Xiao, R. 2011. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China. *Ecological Modelling* [online], 222(2), 301-306. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.12.002>. Acesso: 17 ago. 2022.
- Baird, C. 2012. *Química ambiental* (2a ed.). Porto Alegre: Bookman.
- Bartoli, G., Papa, S., Sagnella, E., Fioretto, A. 2012. Heavy metal content in sediments along the Calore River: Relationships with physicochemical characteristics. *Journal of Environmental Management* [Online], 95, 9-14. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.02.013>. Acesso: 7 jul. 2022.
- Becker, B. Dinâmica Urbana na Amazônia. 2005. In: Diniz, C. C., Lemos, M. B. (Org.). *Economia e território* (pp. 401-428). Belo Horizonte: UFMG.
- Bezerra, P. S. S., Takiyama, L. R., Bezerra, C.W.B. 2009. Complexação de íons de metais por matéria orgânica dissolvida: modelagem e aplicação em sistemas reais. *Acta Amazonica* [online], 39 (3), 639-648. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672009000300019>. Acesso: 3 mar. 2022.
- Borah, R., Taki, K., Gogoi, A., Das, P., Kumar, M. 2018. Contemporary distribution and impending mobility of arsenic, copper and zinc in a tropical (Brahmaputra) river sediment, Assam, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [Online], 161, 769–776. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.038>. Acesso: 7 jul. 2022.
- de Carvalho Braga, C., Cabral, J. B. P., Lopes, S. M. F., Oliveira, S. F., & Rocha, I. R. (2018). Qualidade dos sedimentos em relação à presença de metais pesados no reservatório da usina hidrelétrica de Caçu–GO. *Rev. Bras. Geogr. Física*. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.3.p959-972>.
- BRASIL. Resolução nº 454, de 01 de novembro de 2012 - Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Brasília, DF: Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA [Online]. Disponível: <http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=128537>. 2 ago. 2022.

- Carvalho, D. P., Almeida, R., Manzatto, A. G., Freitas, O. B., Bastos, W.R. 2018. Dinâmica de metais em sedimentos lacustres: estudo de caso no Rio Madeira, região Amazônica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [online], 23, e21. Disponível: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170026>. Acesso: 10 jul. 2022.
- Cavalcante, A.M.S., Santos, R.N.E.S. 2021. Determinação de metais pesados (Fe, Mn, Cd, Cu, CO, CR, NI, ZN E PB), matéria orgânica e carbono orgânico no sedimento de áreas de manguezal no município de Vigia de Nazaré, NE –PA. *Holos Environment* [online], 21 (1), 105-123. Disponível: <https://doi.org/10.14295/holos.v21i1.12416>. Acesso: 16 mar. 2022.
- Cesar, R., Rodrigues, A. P., Bidone, E., Castilhos, Z., Polivanov, H., de CAMPOS, T. (2015). Proposta de um índice de risco ecológico para disposição sustentável de sedimentos de dragagem em Latossolos e Chernossolos. *Geosciences= Geociências*, 34(2), 275-285.
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 2005. Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo [online]. Disponível: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wpcontent/uploads/sites/18/2015/03/tabela_valores_2005.pdf. Acesso: 5 out. 2022.
- Chakraborty, S., Bhattacharya, T., Singh, G., Maity, J. P. 2014. Benthic macroalgae as biological indicators of heavy metal pollution in the marine environments: A biomonitoring approach for pollution assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [Online], 100, 61–68. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.12.003>. Acesso: 27 set. 2022.
- Chu D. 2018. Effects of heavy metals on soil microbial community. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 113, 012009. doi :10.1088/1755-1315/113/1/012009.
- Coelho., A., S., Toledo., P., M., Lopes., L.O.C. Ordenamento do território e a dinâmica do desmatamento na Amazônia Brasi-leira. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.16, n.01(2023) 145-154.
- Cogo, M. R. M, Lopes, A. M., Viêlmo, P. G. (2020). Capacidade de absorção, distribuição e efeitos morfológicos causados por cádmio em plantas. *Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente*, 1(1), 56-56.
- Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S. <https://editoraime.com.br/revistas/index.php/rema/article/view/77>.
- Constantino, I. C., Teodoro, G. C., Moreira, A. B., Paschoal, F. M., Trindade, W. G., & Bisinoti, M. C. (2019). Distribution of metals in the waters and sediments of rivers in central amazon region, brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 30, 1906-1915.DOI: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190100>.
- Coringa, J. E. S., Pezza, L., Coringa, E. A. O. 2016. Distribuição geoquímica e biodisponibilidade de metais traço em sedimentos no Rio Bento Gomes, Poconé - MT, Brasil. *Acta Amazonica* [online], 46(2), 161–174. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/18094392201502215>. Acesso: 14 out. 2022.
- da Costa Filho, M. C., Neto, A. M. D. A. P., Martelli, M. C. (2022). O uso de compostos zeolíticos como adsorventes para remoção de metais pesados (Pb, Cu, Cr e Mn): uma revisão. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, 11 (16), e250111638159-e250111638159. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38159>
- Creswell, J. W., Creswell, J. D. 2021. Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto (5a Ed.). Porto Alegre: Penso.
- Cunha, E. J., Cruz, G. M., Faria, A. P.J., De Oliveira, J.N., Juen, L. (2022). Impactos do desenvolvimento urbano e da industrialização na diversidade de insetos semiaquáticos: um estudo de caso em riachos da Amazônia oriental. *Water Biology and Security*, 1 (4), 100061. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2022.100061>.
- Dang, P., Gu, X., Lin, C., Xin, M., Zhang, H., Ouyang, W., Liu, X., He, M., Wang, B. 2021. Distribution, sources, and ecological risks of potentially toxic elements in the Laizhou Bay, Bohai Sea: under the long-term impact of the Yellow River input. *J. Hazard Mater.* 413, 125429. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125429>.
- Dey, S., Tripathy, B., Kumar, M.S., Das, A.P. Ecotoxicological consequences of manganese mining pollutants and their biological remediation, *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, Volume 5, 2023, Pages 55-61, ISSN 2590-1826, <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.01.001>.
- Diami, S.M., Kusin, F.M., Madzin, Z. Potential ecological and human health risks of heavy metals in surface soils associated with iron ore mining in Pahang, Malaysia. *Environ Sci Pollut Res.* 23:21086–21097 DOI 10.1007/s11356-016-7314-9, 2016.

- Duarte, H.A. 2019. Ferro – Um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. *Química Nova* [online]. 42 (10), 1146-1153. Disponível: <http://dx.doi.org/10.21577/01004042.20170443>. Acesso: 10 ago. 2022.
- El-Sorogy, A.S., Youssef, M., Al-Kahtany, K., Saleh, M.M. 2020. Distribution, source, contamination, and ecological risk status of heavy metals in the Red Sea-Gulf of Aqaba coastal sediments, Saudi Arabia. *Marine Pollution Bulletin* [Online], 158. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111411>. Acesso: 16 set. 2022.
- El Zokm, G.M., Masoud, M.S., El-Shorbagi, E.K., Elsamra, R.M., e Okbah, M.A. (2023). Modelos dinâmicos de sulfetos reativos para prever metais perigosos em sedimentos de dois lagos do norte do Egito. *Boletim de Poluição Marinha*, 188, 114694. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114694>.
- Esteves, F. 2011. Fundamentos de limnologia (3 ed.). Rio de Janeiro: Interciência, p. 826.
- Fadigas, F. S., Amaral Sobrinho, N. M. B., Mazur, N., Anjos, L. H. C., Freixo, A. A. 2006. Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [online], 10, 699–705. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000300024>. Acesso: 30 abr. 2022.
- Fairbridge, R. W. 1989. The enciclopédia of geomorphology. *Encyclopedia of Earth Science Series* (vol. 3). Dowden, Hutchinson e Ross Inc. Stroudsburg, p. 325-330.
- Farkas, A., Erratico, C.; Vigano, L. 2009. Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po. *Chemosphere* [Online], 68, 761-768. Disponível:<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.099>. Acesso: 9 abr. 2022.
- Farkhondeh, T., Naseri, K., Esform, A., Aramjoo, H., Naghizadeh, A. (2021). Toxicidade de metais pesados na água potável e doenças renais crônicas: uma revisão sistemática. *Comentários sobre Saúde Ambiental*, 36 (3), 359-366. <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0110>.
- Ferreira, N. K. F., Lima, C. F., de Azevedo, É. B. M., Marinho, A. F., de Oliveira Araújo, F., de Azevedo, F. D. F. M. (2021). Disponibilidade de metais pesados e sua correlação com a matéria orgânica do solo em áreas produtoras de hortaliças na Região Metropolitana de Belém/Pa/Availability of heavy metals and their correlation with a soil organic material in vegetable producing areas in the Metropolitan Region of Belém/Pa. *Brazilian Journal of Development*, 7(11), 109022-109032. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-500>.
- Fiori, C. S., Rodrigues, A. P. C., Santelli, R. E., Cordeiro, R. C. M., Carvalheira, R. G., Araújo, P. C., Castilhos, Z. C., Bidone, E. D. 2013. Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Case Study of Coastal Water Bodies from the Rio de Janeiro State, Southeastern Brazil. *Geochimica Brasiliensis*, 27(1): 24-36. DOI: 10.5327/Z0102-9800201300010003.
- Förstner, U., Ahlf, W., Calmano, W. (1989). Estudos da transferência de metais pesados entre fases sedimentares com um dispositivo multicâmaras: efeitos combinados de salinidade e variação redox. *Marine Chemistry*, 28 (1-3), 145-158. [https://doi.org/10.1016/03044203\(89\)90192-8](https://doi.org/10.1016/03044203(89)90192-8).
- Förstner, F., Wittmann, G. T. W. 1981. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin, Springer, p. 488.
- Freret-Meurer, N. V., Andreatta, J. V., Meurer, B. C., Manzano, F. V., Baptista, M. G. S., Teixeira, D. E., Longo, M. M., (2010). Distribuição espacial de metais em sedimentos da Baía do Ribeira, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brasil. *Boletim de poluição marinha*, 60 (4), 627-629.
- Guarda, PM, Rambo, MKD, Jaconi, A., Guarda, EA, & Silva, JEC da. (2021). Concentrações de metais tóxicos na água, solo e sedimento do rio Formoso, TO. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, 10 (14), e177101421897. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21897>.
- Gui, J. Y., Rao, S., Huang, X., Liu, X., Cheng, S., Xu, F. (2022). Interação entre selênio e elementos micronutrientes essenciais em plantas: uma revisão sistemática. *Ciência do Meio Ambiente Total*, 158673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158673>.
- Ghrefat, H.; Abu-Rukah, Y., Rosen, M. 2011. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafra Dam, Jordan. *Environmental Monitoring and Assessment* [Online], 178(1), 95-109. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1675-1>. Acesso: 31 ago. 2022.
- Hakanson, L., Ostapenia, A., Parparov, A., Hambright, K. D., Boulion, V. V. 2003. Management Criteria for Lake Ecosystems Applied to Case Studies of Changes in Nutrient
- Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S.

- Loading and Climate Change. Lakes, Reservoirs: Research and Management, v. 8, n. 2, p. 141-155.
- Hakanson, L. 1980. An Ecological Risk Index Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach. Water Research, v. 14, p. 975-1001. [https://doi.org/10.1016/00431354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/00431354(80)90143-8).
- Hossain, M., Karmakar, D., Begum, S. N., Ali, S. Y., Patra, P. K. (2021). Tendências recentes na análise de oligoelementos no campo da pesquisa ambiental: uma revisão. Microchemical Journal, 165, 106086. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106086>.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia Física, Bacias e divisões hidrográficas do Brasil / IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. - Rio de Janeiro: IBGE, 2021. 160 p. - (Relatórios Metodológicos, ISSN 0101-2843; v. 48).
- International Manganese Institute (IMnI), 2021. Monthly Report April 2020. Disponível em <https://www.manganese.org/wp-content/uploads/2021/04/2020-04-IMnI-Executive-Summary.pdf>. Acesso em 22/03/2023.
- Iyyappan, J., Baskar, G., Deepanraj, B., Anand, A.V., Saravanan, R., Awasthi, M.K. (2022). Estratégias promissoras de bioeconomia circular usando plantas fitorremediadas com metais pesados – Uma revisão crítica. Chemosphere, 137097. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137097>.
- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants (4a ed.). Boca Raton: CRC, p. 534.
- Kalina, M., Klučáková, M., Sedláček, P. 2013. Utilization of fractional extraction for characterization of the interactions between humic acids and metals. Geoderma [online], 207, 92-98. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.031>. Acesso: 7 out. 2022.
- Kasilingam, K., Gandhi, M. S., Krishnakumar, S., Magesh, N. S. 2016. Trace element concentration in surface sediments of Palk Strait, southeast coast of Tamil Nadu, India. Marine Pollution Bulletin 111, 500-508. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.051>.
- Kitagishi, K., Yamane, I. 1981. Heavy metal pollution in *Soils of Japan*. Tokyo: Japan Science Society [online], p. 302. Disponível: <https://doi.org/10.2134/jeq1983.00472425001200030026x>. Acesso: 18 jul. 2022.
- Kong, W., Kong, J., Lyu, H., Ma, J., Yuan, P., Wang, Z., Feng, S. (2021). Integrando o tratamento de águas residuais municipais com fixação de CO₂ e produção de ácidos graxos por meio do cultivo de *Tetrademus obliquus*. Journal of Cleaner Production, 320, 128916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128916>.
- Krauskopf, K. B. 1972. Introdução à geoquímica II: tradução de Michal Landoe Paulo S. C. Bogus. São Paulo. Polígono, Editora USP.
- Lacerda, L. D., De Paula, F. C. F., Ovalle, A. R. C., Pfeiffer, W. C., Malm, O. 1990. Trace metals in fluvial sediments of the Madeira River watershed, Amazon, Brazil. *The Science of the Total Environment* [Online], 97-98, 525-530. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90261-R](http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697(90)90261-R). Acesso: 20 out. 2022.
- Lešková, A., Javot, H., Giehl, R.F. (2022). Encruzilhada de metais em plantas: modulação da aquisição de nutrientes e desenvolvimento radicular por metais traço essenciais. Journal of Experimental Botany, 73 (6), 1751-1765.
- Li, D., Pan, B., Han, X., Lu, Y., Wang, X. (2023). Os riscos de toxicidade associados aos metais residuais exigem a conservação de espécies de peixes ameaçadas no Rio Amarelo, fortemente carregado de sedimentos. Journal of Hazardous Materials, 130928. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130928>.
- Li, D., Yu, R., Chen, J., Leng, X., Zhao, D., Jia, H., An, S. (2022). Risco ecológico de metais pesados em sedimentos lacustres da China: uma análise integrada em escala nacional. Journal of Cleaner Production, 334, 130206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130206>.
- Lima, D. P. D., Santos, C., Silva, R. D. S., Yoshioka, E. T. O., Bezerra, R.M. (2015). Contaminação por metais pesados em peixes e água da bacia do rio Cassiporé, Estado do Amapá, Brasil. Acta Amazonica, 45, 405-414.
- de Lima, M.W., Santos, M.D.L.S., de Melo, N.F.A.C., Faial, K.D.C.F., de Oliveira Lima, M., Nunes, D.M. (2015). 1771 Distribuição espaço-temporal dos metais Ba, Ca, K, Mn e na nos sedimentos superficiais do Furo da Laura, Amazônia Oriental, Brasil. Tropical Journal of Fisheries and Aquatic Science, 15(1), 15-22.
- Li, X., Wai, O.W., Li, Y.S., Coles, B.J., Ramsey, M.H., Thornton, I. (2000). Distribuição de metais pesados em perfis de sedimentos do estuário do Rio das Pérolas, sul da China. Applied Geochemistry, 15 (5), 567-581. DOI: 10.1016/S0883-2927(99)00072-4.
- Loring, D.H. 1991. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments. ICES Journal of Marine Science 48, 101-115.
- Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S.

- <https://doi.org/10.1093/icesjms/48.1.101>.
- Maldonado, A.C.D., Wendling, B. 2009. Manejo de Ecossistemas Aquáticos Contaminados por Metais Pesados. *Agropecuária Técnica* [online], 30 (1), 21–32. Disponível: <https://doi.org/10.25066/agrotec.v30i1.3237>. Acesso: 23. jun. 2022.
- Melo, M. G., de Castro, L. G., Reis, L. A., Costa, G. D. S., Silva, F. M. D., Bolson, M. A., ... & Bataglioni, G. A. (2020). Metals, n-Alkanes, hopanes, and polycyclic aromatic hydrocarbon in sediments from three Amazonian streams crossing Manaus (Brazil). *Chemistry*, 2(2), 274-292. Doi: 10.3390/chemistry2020018
- Meurer, E.J. 2006. Potássio. In: Fernandes, M.S. (Ed). *Nutrição mineral de plantas*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, p.281-298.
- Miranda, J. L., Mesquita, R. B., Leite, A., Silva, A. M., Rangel, M., Rangel, A. O., (2023). Determinação de ferro não ligado à transferrina no soro sanguíneo usando espectrometria de fase sólida por injeção microsequencial – prova de conceito. *Talanta*, 124345.
- Milesi, S. V., Biasi, C., Restello, R. M., Hepp, L. U. 2008. Efeitos de Metais Cobre (Cu) e Zinco (Zn) sobre a comunidade de macroinvertebrados bentônicos em riachos do Sul do Brasil. *Acta Scientiarum Biological Sciences* [online], 30 (3), 283-289. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4025/actascibiolsci.v30i3.677>. Acesso: 5 out. 2022.
- Mohtar, W. H. M. W., Maulud, K. N. A., Muhammad, N. S., Sharil, S., Yaseen, Z. M. (2019). Avaliação de rios baseada em quociente de risco espacial e temporal para gestão de recursos hídricos. *Poluição Ambiental*, 248, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.011>.
- Muñoz-García, A., Arbeli, Z., Bouacá-Vasquez, V., Vanegas, J. Metagenomic and genomic characterization of heavy metal tolerance and resistance genes in the rhizosphere microbiome of *Avicennia germinans* in a semi-arid mangrove forest in the tropics, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 184, 2022, 114204, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114204>.
- do Nascimento Monte, C., de Castro Rodrigues, A.P., de Freitas, A.R., Braz, B. F., Freire, A. S., Cordeiro, R. C., Machado, W. T. V. (2021). Ecological risks associated to trace metals of contaminated sediments from a densely urbanized tropical eutrophic estuary. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-15. DOI: 10.1007/s10661-021-09552-7.
- Nkele, K., Mpenyana-Monyatsi, L., Masindi, V. Challenges, advances and sustainabilities on the removal and recovery of manganese from wastewater: A review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 377, 2022, 134152, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134152>.
- Narendra, B. H., Siregar, C. A., Dharmawan, W. S., Sukmana, A., Pratiwi, Pramono, I. B., Basuki, T. M., Nugroho, S. H., Supangat, A. B., Purwanto, Setiawan, O., Nandini, R., Ulya, N. A., Arifanti, V. B., Yuwati, T. W. 2021. A review on sustainability of watershed management in Indonesia. *Sustainability*, 13 (19), 1-29. <https://doi.org/10.3390/su131911125>.
- Napper, I. E., Wright, A. C., et al., Potencial liberação de microplástico da indústria marítima: abrasão da corda ciência Ambiente Total., 804 (2022), Artigo 150155, 10.1016/J.SCITOTENV.2021.150155. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150155
- Oliveira, E. C., Lafon, J. M., Corrêa, J. A. M., dos Santos Carvalho, J. H., Dias, F. F., Taddei, M. H. T. (2015). Distribuição dos metais traços em sedimentos de fundo do sistema hidrográfico da região de Belém, PA (margem oeste da baía do Guajará e rio Carnapijó). *Geochimica Brasiliensis*, 29(2), 139-139.
- Oliveira, G. M. T. S. D., Oliveira, E. S. D., Santos, M. D. L. S., Melo, N. F. A. C. D., & Krag, M. N. (2018). Concentrações de metais pesados nos sedimentos do lago Água Preta (Pará, Brasil). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23, 599-605. <https://doi.org/10.1590/S141341522018152875>.
- OMS- Organização Mundial da Saúde. (2021). Lead poisoning [Fact Sheet]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health#:~:text=Lead%20exposure%20can%20have%20serious,intellectual%20disability%20and%20behavioural%20disorders>.
- Pilon, G. D., Machado, L. M. F., Barros, P. M., Barioni, E. D., Rocha, G. H. O., Oliveira, R. T. D. 2022. Intoxicação por chumbo em crianças e sintomas neurológicos. *Research, Society and Development*, v. 11, n.14, e161111436031. Disponível: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36031>. Acesso: 23 jun. 2022.
- Reginato, B. C., Silveira, V. F., Schaidhauer, A. C. G., Madeira, A. R., Oliveira, A. A. D., Bernardi, M. L. S.

- F. F., Borgmann, G., Ferreira, H. C., Plautz, K., Britto, K. L. B., Nunes, L. V., Schroeder, M. W., Horner, M. B. W., Botelho, N. G. N. T., Korn, R., Sierth, R., Josino, T. F., Stangarlin, T. S., Grawe, V. H., Lorenzi, L., Oliveira, T. M. N., Junior, J. C. F.M. 2023. Análise de metais pesados pelo método de biomonitoramento no Rio Cachoeira, região Nordeste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.16 n.01 (2023) 310-324.
DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p310-324>.
- Rizk, R., Juzsakova, T., Ali, M. B., Rawash, M. A., Domokos, E., Hedfi, A., Rédey, Á. (2022). Avaliação ambiental abrangente da contaminação por metais pesados das águas superficiais, sedimentos e tilápia do Nilo no Lago Nasser, Egito. *Journal of King Saud University-Science*, 34 (1), 101748. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101748>.
- da Rocha, G. O., Guarieiro, A. L., de Andrade, J. B., Eça, G. F., Aragão, N. M., Aguiar, R. M., Hatje, V. (2012). Contaminação na Baía de Todos os Santos.
- Roos, A. A., Quináia, S. P., Pletsch, A. L., dos Santos, K. P. M. G. (2021). Especiação de metais em sedimentos de superfície de uma unidade de conservação: Refúgio Biológico de Santa Helena-Paraná. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(05), 2896-2915.
DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2896-2915>.
- Rousseaux, P., de Castilhos, A. B., Vermande, P., Veron, J. (1992). Determinação de malhas trommel para separação ótima da fração compostável de resíduos sólidos urbanos de Florianópolis, SC, Brasil. *Recursos, conservação e reciclagem*, 6 (3), 217-229.
- Salomão, G.N.; Farias, D.d.L.; Sahoo, P.K.; Dall'Agnol, R.; Sarkar, D. Integrated Geochemical Assessment of Soils and Stream Sediments to Evaluate Source-Sink Relationships and Background Variations in the Parauapebas River Basin, Eastern Amazon. *Soil Systems*. 2021, 5, 21. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010021>.
- Salomons, W., Förstner, U. (1984). Metais no Hidrociclo Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0>.
- dos Santos, J. P., de Souza, D. D. O., Miranda, M. R., Bastos, W. R. (2012). Estudos de elementos-traço na cidade de Porto Velho/Rondônia, Amazônia Ocidental. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 7(2).
doi:10.5132/jbse.2012.02.001.
- Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S.
- Santos, J. S., Souza, F. M., Santos, M. L. P. 2013. Distribuição de Zn, Pb, Ni, Cu, Mn e Fe nas frações do sedimento superficial do Rio Cachoeira na região sul da Bahia, Brasil. *Química Nova* [online], 36, 230-236. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000200005>. Acesso: 26 set. 2022.
- dos Santos, A. R. M., Bezerra, R. C. A., & Cordeiro, L. R. B. A. (2023). Valor nutritivo de plantas forrageiras cultivadas no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(03), 1466-1489.
- dos Santos Sousa, J., Santos, M. M., dos Santos, B. N., dos Santos, N. M. M., Pinto, L. C. (2021). Agricultura em Áreas Industriais e Contaminação por Metais Pesados: Estratégias para redução deste Impacto Ambiental. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(01), 322-331.
- dos Santos, L. F., de Sousa, A. M. L., Faial, K. D. C. F. (2018). Análise de metais no sedimento na baía do Guajará Belém/PA. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 9(4), 314-325.
DOI:10.6008/CBPC21796858.2018.004.0025
- SEDAM, Secretaria de Estado de Desenvolvimento Ambiental, 2002. Atlas Geoambiental de Rondônia. Porto Velho, RO, p. 141.
- SEMAS- Secretária de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade, Conjuntura dos Recursos Hídricos do Estado do Pará. Leal, R.E. et al. (Orgs.), 2022.
- Shakeri, A., Fard, M. S., Mehrabi, B., Mehr, M. R. (2020). Ocorrência, origem e risco para a saúde de arsênico e elementos potencialmente tóxicos (PTEs) em sedimentos e tecidos de peixes da área geotérmica do rio Khiav, província de Ardebil (NW do Irã). *Journal of Geochemical Exploration*, 208, 106347. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106347>.
- Sharma, P., Dutta, D., Udayan, A., Nadda, A. K., Lam, S. S., Kumar, S. 2022. Papel dos micróbios na bioacumulação de metais pesados em resíduos sólidos urbanos: impactos na planta e no ser humano. *Poluição Ambiental*, 119248.
DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119248.
- Shen, X., Dai, M., Yang, J., Sun, L., Tan, X., Peng, C., Naz, I. (2022). A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges. *Chemosphere*, 291, 132979. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132979>
- Shi, Y., Hu, H., Wu, Z., Wu, J., Chen, Z., Cheng, X., Li, P. 2023. Associações entre ingestão

- dietética de cobre e hipertrigliceridemia entre crianças e adolescentes nos EUA. *Nutrição, Metabolismo e Doenças Cardiovascular*.
<https://doi.org/10.1016/j.numecd.2023.01.020>.
- Shikha, D., Singh, P. K. 2021. Fitorremediação in situ de solos e águas subterrâneas contaminados por metais pesados: uma abordagem inventiva ecológica. *Ciência Ambiental e Pesquisa de Poluição*, 28, 4104-4124.
 DOI: [10.1007/s11356-020-11600-7](https://doi.org/10.1007/s11356-020-11600-7)
- Silva, P. P., Santos, S., Jesus, B. 2017. Assessment of heavy metal contamination in sub-tropical riverine sediments using geoaccumulation index. *Ecotoxicology and Environmental Contamination* 12, 1- 9. doi: 10.5132/eec.2017.01.01.
- Siqueira, G. W., Pereira, S. F. P., Aprile, F. M. 2006. Determinação dos elementos-traço (Zn, Co e Ni) em sedimentos da Plataforma Continental Amazônica sob influência da descarga do rio Amazonas. *Acta Amazonica* [Online], 36 (3), 321-326. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672006000300005>. Acesso: 21 abr. 2022.
- Siqueira, G. W., Aprile, F. 2013. Avaliação de risco ambiental por contaminação metálica e material orgânico em sedimentos da bacia do Rio Aurá, Região Metropolitana de Belém – PA. *Acta Amazonica* [Online], 43(1), 51– 62. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000100007>. Acesso: 25 jul. 2022.
- Souza, A. K., Morassuti, C.Y., Deus, W. B. (2018). Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. *Acta Biomedica Brasiliensia*, 9 (3). <http://dx.doi.org/10.18571/acbm.189>.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics* 33, 241-265.
- Te, L., Liu, J., Ma, J., Wang, S. (2022). Correlation between serum zinc and testosterone: A systematic review. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 127124.
<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2022.127124>.
- Trevino, K. M., Wagner, C. R., Tamura, E. K., Garcia, J., Louie, A. Y. Small molecule sensors for the colorimetric detection of Copper (II): A review of the literature from 2010 to 2022, *Dyes and Pigments*, 2022, 110881, ISSN 0143-7208, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110881>.
- Tyler, G., Olsson, T. 2001. Concentrations of 60 elements in the soil solution as related to the soil acidity. *Soil Science* [Online], 52 (1), 151-165. Disponível: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.t01-1-00360.x>. Acesso: 2 set. 2022.
- Souza, A. J. N., Macedo, M. A. R., Bandeira, T. P. B., Oliveira, T. D. T. T. S., Souza, T. G. N. T., Mendes, D. M., Santos, M. L. S.
- Veiga, T. R., de Souza, A. M., Cunha, B. A., Martins, M. V. A., Tavares Jr, A. D., Machado, A. F., Geraldês, M. C. (2022). Geoquímica dos sedimentos de Fundo da Enseada de Ribeira–Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(04), 1994-2024.
- Vilhena, M. P., Costa, M. L., Berrêdo, J. F., Paiva, R. S., & Moreira, M. Z. (2021). Trace elements and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopes in sediments, phytoplankton and oysters as indicators of anthropogenic activities in estuaries in the Brazilian Amazon. *Regional Studies in Marine Science*, 41, 101618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101618>
- Wang, H., Yuan, Z., Chen, Q., Zhan, S., Sadeghi, B. 2022a. Geochemical anomaly definition using stream sediments landscape modeling, *Ore Geology Reviews*, Volume 142, 2022, 104715, ISSN 0169-1368, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104715>. Acesso: 20 de fev 2023.
- Wang, Q., Cui, Q., Gao, J. P., Xing, R. 2022b. Papel dos biomarcadores de ferro e ingestão de ferro no risco de câncer de pulmão: uma revisão sistemática e meta-análise. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 127060.
<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2022.127060>.
- Wang, J., Liu, G., Liu, H., Lam, P. K. S. 2017. Tracking historical mobility behavior and sources of lead in the 59-year sediment core from the Huaihe River using lead isotopic compositions. *Chemosphere* [Online], 184, 584–593. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.022>. Acesso: 30 abr. 2022.
- Wei, M., Yanwen, Q., Zheng, B., Zhang, L. (2008). Poluição por metais pesados na baía de Tianjin Bohai, China. *Journal of Environmental Sciences*, 20 (7), 814-819.
[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62131-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62131-2).
- Xavier, D. A., Dos Santos, V. F., de Miranda, A. G. O., & Berrêdo, J. F. (2020). Determination of background geochemistry of an Amazon estuary: The Cuñaní Estuary–Amapá. *Marine Pollution Bulletin*, 155, 111144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111144>
- Xu, C., Feng, Y., Li, H., Wu, R., Ju, J., Liu, S., Yang, Y., Wang, B. Adsorption of heavy ions by iron tailings: Behavior, mechanism, evaluation and new perspectives, *Journal of Cleaner Production*, Volume 344, 2022, 131065, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131065>.

Zhang, Z., Wang, J., Ali, A., De Laune, R. D. 2018. Physico-chemical forms of copper in water and sediments of Lake Pontchartrain basin, USA Chemosphere [Online], 195, 448–454. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.115>. Acesso: 10 ago. 2022.

Zhang, H., Gao, M., Song, A.M., Zhao, J. Song, M. 2012. Ecological Risk of Heavy Metals Pollution in Sediments of Beijiang River. Advanced Materials Research, 518- 523: 1137-1140. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.1137.