



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA CIÊNCIAS DA TERRA
BACHARELADO EM GEOLOGIA**

EVA ROCHA COLARES

**METAIS NA AMAZÔNIA
UM PANORAMA DA LITERATURA CIENTÍFICA ENTRE 1984 E 2023**

**SANTARÉM-PA
2025**

EVA ROCHA COLARES

**METAIS NA AMAZÔNIA
UM PANORAMA DA LITERATURA CIENTÍFICA ENTRE 1984 E 2023**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Engenharia e Geociências na Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa) para obtenção do grau de graduação em Bacharelado em Geologia.

Orientador: Dra. Fernanda Souza do Nascimento.
Coorientador: Me. Matheus Cavalcante Silva.

**SANTARÉM-PA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

C683m Colares, Eva Rocha

Metais na Amazônia: um panorama da literatura científica entre 1984 e 2023. / Eva Rocha Colares. - Santarém, 2025.

69 p. : il.

Inclui bibliografias.

Orientadora: Fernanda Souza do Nascimento.

Coorientador: Matheus Cavalcante Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Bacharelado em Geologia.

1. Solo. 2. Água. 3. Contaminação Ambiental. 4. Bibliometria. 5. Revisão Sistemática. I. Nascimento, Fernanda Souza do, *orient.* II. Silva, Matheus Cavalcante, *coorient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 363.73909811

EVA ROCHA COLARES

**METAIS NA AMAZÔNIA
UM PANORAMA DA LITERATURA CIENTÍFICA ENTRE 1984 E 2023**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Engenharia e Geociências na Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa) para obtenção do grau de graduação em Bacharelado em Geologia.

Orientador: Dra. Fernanda Souza do Nascimento.
Coorientador: Me. Matheus Cavalcante Silva.

Conceito: 9,7

Data de Aprovação 30/07/2025.

Dr. Rer. Nat. Fernanda Souza do Nascimento – Orientadora

Docente

Curso de Geologia/Instituto de Engenharia e Geociências – Ufopa.

Dr. Rer. Nat. Bernhard Gregor Peregovich

Docente

Curso de Geologia/Instituto de Engenharia e Geociências – Ufopa.

Dr. Rer. Nat. Norbert Fenzl

Docente



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO BACHARELADO EM GEOLOGIA**

ATA DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ata de aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Geologia, da discente **EVA ROCHA COLARES**.

Aos trinta dias do mês de julho de dois mil e vinte e cinco, às 9h30min, de modo presencial e através de videoconferência, Plataforma Google Meet, Sala <https://meet.google.com/gdw-vobh-mhp>, realizou-se a defesa e avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Geologia, intitulado **METAIS NA AMAZÔNIA: UM PANORAMA DA LITERATURA CIENTÍFICA ENTRE 1984 e 2023**, elaborado pela discente **EVA ROCHA COLARES**.

Compuseram a banca examinadora os professores Fernanda Souza do Nascimento (orientadora, Curso de Geologia/Instituto de Engenharia e Geociências), Bernhard Gregor Peregovich (avaliador interno, Curso de Geologia/Instituto de Engenharia e Geociências) e Norbert Fenzl (avaliador externo, NUMA/Ufpa), e o Me. Geólogo Mateus Matheus Cavalcante Silva (co-orientador, doutorando da UFF). Após a leitura e ciência dos Pareceres, anexos a esta ATA, decidiram aprovar com nota 9,7 o referido TCC. Para constar, redigi a presente Ata, assinada por mim, orientador, e pelos demais membros da reunião.

Documento assinado digitalmente
gov.br FERNANDA SOUZA DO NASCIMENTO
Data: 30/07/2025 11:59:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Rer. Nat. Fernanda Souza do Nascimento
Universidade Federal do Oeste do Pará - IEG

Documento assinado digitalmente
gov.br BERNHARD GREGOR PEREGOVICH
Data: 30/07/2025 19:27:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Rer. Nat. Bernhard Gregor Peregovich
Universidade Federal do Oeste do Pará - IEG

Documento assinado digitalmente
gov.br NORBERT FENZL
Data: 30/07/2025 12:40:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Rer. Nat. Norbert Fenzl
NUMA/ Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
gov.br MATEUS CAVALCANTE SILVA
Data: 30/07/2025 15:00:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Mateus Matheus Cavalcante Silva
Universidade Federal Fluminense

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de conclusão de curso não teria sido possível sem o apoio, incentivo e contribuição de muitas pessoas às quais sou imensamente grata.

Primeiramente gostaria de agradecer à Universidade Federal do Oeste do Pará – Ufopa, por ter sido o espaço onde construí não apenas minha formação acadêmica, mas também muitas das experiências e relações que levarei comigo para a vida toda.

À minha orientadora, Prof^a Dra. Fernanda Souza do Nascimento, pela orientação, pelas sugestões construtivas e por toda a dedicação ao longo deste processo. Sua paciência e comprometimento foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Ao meu coorientador, Me. Matheus Cavalcante Silva, pelo apoio técnico, pelas contribuições essenciais e pelo incentivo constante ao meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos professores da banca, por aceitarem fazer parte desse momento tão importante da minha trajetória. Aos professores do curso de Geologia da Ufopa, que contribuíram com seus ensinamentos e com os desafios que me impulsionaram a crescer academicamente.

Agradeço de forma especial à minha família, base fundamental de todo o meu percurso. À minha mãe, Maria Regina Colares, e à minha vó, Eloina Colares, por todo o amor, apoio e exemplo de força. À minha prima e melhor amiga, Milena Sarmiento, por estar presente em cada etapa da minha caminhada. Aos meus tios e tias, que sempre estiveram ao meu lado com palavras de incentivo.

Aos colegas e amigos que tornaram essa jornada mais leve e possível: ao Caio, amigo desde o ensino médio e parceiro de curso, pela amizade constante. À Naylena ao Cláudio e à Brenda, pelas trocas e companheirismo ao longo dos anos de faculdade e à Sandy, minha melhor amiga e uma engenheira de computação incrível, que foi essencial na parte de programação em *Python* deste trabalho.

A todos vocês, o meu mais sincero e profundo obrigada.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas.”

Carl Sagan

RESUMO

A Amazônia é uma região de enorme riqueza natural, e isso inclui uma vasta quantidade de minerais e metais, tanto de ocorrência natural, concentrados nos diferentes depósitos minerais e distribuídos no meio ambiente pelos processos naturais, como mobilizados pela exploração desses recursos e introduzidos por atividades socioeconômicas diversas. Dada a sua importância mineral, cultural e biodiversidade, sendo um dos principais reguladores do clima global, a Amazônia tem atraído crescente interesse de várias áreas de pesquisa científica dentre as quais se destaca no presente trabalho a área de contaminação por metais, devido à intensificação e diversificação nos últimos trinta anos das atividades socioeconômicas potencialmente fontes dessas substâncias. Os metais são substâncias naturalmente presentes na crosta terrestre, mas sua concentração e distribuição podem ser significativamente alteradas por atividades antrópicas, gerando impactos para a saúde humana e dos ecossistemas. A literatura científica sobre metais nos solos, água, sedimentos da Amazônia, entre 1984 e 2023, foi compilada mediante aplicação de uma análise bibliométrica e uma revisão sistemática do acervo *online* da *Scopus*. Os resultados indicaram que a produção científica sobre o tema segue um padrão de crescimento exponencial, conforme a Lei de Price ($R^2 = 0,8525$). O Índice de Price apontou alta relevância da literatura recente, enquanto o modelo polinomial de terceira ordem previu mais de 150 publicações anuais até 2034 e mais de 200 até 2044. A revisão sistemática, baseada em 61 estudos publicados entre 2014 e 2023, identificou o Brasil como o país com maior número de artigos (45), seguido por Equador (9), Peru (5) e Colômbia (2). Entre as instituições amazônicas com maior número de publicações, a UFPA se destacou como a que mais publica trabalhos sobre metais, com 71 artigos, seguida pela USP com 63 e UFRJ e UNESP com 37 artigos cada. Entre as áreas mais afetadas pela contaminação por metais destacam-se a região do Carajás e a bacia do rio Parauapebas (Brasil), a Bacia do Rio Zamora (Equador), a Província de San Martín (Peru) e a Região de Taraira (Colômbia). Os metais mais estudados, por número de citações, foram Cu (41) > Pb (40) > Zn (38) > Fe (33) > Mn (32) > Cd (30) > Cr (30) > Ni (28) > Hg (24) > Al (21), com predominância de fontes antrópicas, sobretudo a mineração. Quando comparados com os padrões de qualidade estabelecidos para a proteção do ecossistema, enriquecimento significativo foi mostrado (i) em solo: Cu (726 µg/g), Pb (523 µg/g), Zn (589 µg/g), Cr (141 µg/g) e Hg (19,4 µg/g); (ii) em sedimento: Cu (141 µg/g), Pb (902 µg/g), Zn (3.067 µg/g), Cd (5,9 µg/g), Cr (549 µg/g) e Hg (18,6 µg/g); (iii) em água superficial: Cu (103 µg/L), Zn (4.800 µg/L), Fe (408 µg/L), Mn (980 µg/L), Ni (183 µg/L), Hg (100 µg/L), Al (5,74 µg/L); e em água subterrânea: Pb (2.002 µg/L). O solo foi a matriz ambiental mais investigada, seguido por sedimentos e água, evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo e políticas públicas voltadas à prevenção da contaminação por metais na região.

Palavras-chave: Solo. Água. Contaminação Ambiental. Bibliometria. Revisão Sistemática.

ABSTRACT

The Amazon is a region of enormous natural wealth, including a vast quantity of minerals and metals, both naturally occurring, concentrated in different mineral deposits and distributed in the environment by natural processes, and mobilized by the exploitation of these resources and introduced by various socioeconomic activities. Given its mineral, cultural, and biodiversity importance, and as one of the main regulators of the global climate, the Amazon has attracted growing interest from various areas of scientific research, among which the area of metal contamination stands out in this study, due to the intensification and diversification over the last thirty years of socioeconomic activities that are potential sources of these substances. Metals are substances naturally present in the Earth's crust, but their concentration and distribution can be significantly altered by anthropogenic activities, generating impacts on human health and ecosystems. The scientific literature on metals in soils, water, and sediments in the Amazon between 1984 and 2023 was compiled using bibliometric analysis and a systematic review of the Scopus online collection. The results indicated that scientific production on the topic follows an exponential growth pattern, according to Price's Law ($R^2 = 0.8525$). The Price Index pointed to the high relevance of recent literature, while the third-order polynomial model predicted more than 150 annual publications by 2034 and more than 200 by 2044. The systematic review, based on 61 studies published between 2014 and 2023, identified Brazil as the country with the highest number of articles (45), followed by Ecuador (9), Peru (5), and Colombia (2). Among the Amazonian institutions with the highest number of publications, UFPA stood out as the one that publishes the most works on metals, with 71 articles, followed by USP with 63 and UFRJ and UNESP with 37 articles each. Among the areas most affected by metal contamination are the Carajás region and the Parauapebas River basin (Brazil), the Zamora River Basin (Ecuador), the Province of San Martín (Peru), and the Taraira Region (Colombia). The most studied metals, by number of citations, were Cu (41) > Pb (40) > Zn (38) > Fe (33) > Mn (32) > Cd (30) > Cr (30) > Ni (28) > Hg (24) > Al (21), with a predominance of anthropogenic sources, especially mining. When compared with the quality standards established for ecosystem protection, significant enrichment was shown (i) in soil: Cu (726 µg/g), Pb (523 µg/g), Zn (589 µg/g), Cr (141 µg/g), and Hg (19.4 µg/g); (ii) in sediment: Cu (141 µg/g), Pb (902 µg/g), Zn (3,067 µg/g), Cd (5.9 µg/g), Cr (549 µg/g) and (Hg 18.6 µg/g); (iii) in surface water: Cu (103 µg/L), Zn (4,800 µg/L), Fe (408 µg/L), Mn (980 µg/L), Ni (183 µg/L), Hg (100 µg/L), Al (5.74 µg/L); and in groundwater: Pb (2,002 µg/L). Soil was the most investigated environmental matrix, followed by sediments and water, highlighting the need for continuous monitoring and public policies aimed at preventing metal contamination in the region.

Keywords: Soil. Water. Environmental Contamination. Bibliometrics; Systematic Review.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Evolução anual das publicações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023, com ajuste linear e exponencial segundo a Lei de Price.	24
Figura 2: Tendência de crescimento anual das citações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023, segundo o Índice de Price.	25
Figura 3: Relação entre o número cumulativo e ano de publicações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.	26
Figura 4: Instituições de ensino superior com maior número de publicações sobre metais na Região Amazônica no período de 1984 a 2023.	28
Figura 5: Principais áreas do conhecimento com maior número de publicações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.	30
Figura 6: Autores com maior número de artigos publicados sobre metais na Região Amazônica no período de 1984 a 2023.	31
Figura 7: Distribuição anual de estudos sobre metais na Região Amazônica no período de 2014 a 2023.	32
Figura 8: Países que mais publicaram trabalhos sobre metais na Região Amazônica de 2014 a 2023.	33
Figura 9: Matrizes ambientais mais estudadas para a determinação de metais na Região Amazônica de 2014 a 2023.	34
Figura 10: Os 10 metais mais citados e analisados por estudos na Região Amazônica de 2014 a 2023.	35
Figura 11: Quantidade de estudos por metal em água, solo e sedimento da Região Amazônica de 2014 a 2023.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estudos mais citados sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.	26
Tabela 2: Países que mais publicaram artigos sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.	27
Tabela 3: As dez principais revistas científicas que mais publicaram estudos sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.	29
Tabela 4: Concentração de metais em solo da Região Amazônica publicada nos estudos do período de 2014 a 2023.	40
Tabela 5: Concentração de metais em sedimentos da Região Amazônica publicada nos estudos do período de 2014 a 2023.	42
Tabela 6: Concentração de metais em água superficial e subterrânea da Região Amazônica publicados nos estudos do período de 2014 a 2023.	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Bibliometria.....	16
3.2 Revisão sistemática da literatura.....	17
3.3 Metais: fontes, distribuição e riscos.....	17
3.3.1 Metais na Amazônia	19
4. METODOLOGIA	20
4.1. Análise bibliométrica: critérios de pesquisa e exportação de dados	21
4.2 Padrões de crescimento e modelagem matemática.....	22
4.3 Revisão sistemática: critérios, abordagens e tratamento de dados	22
5. RESULTADOS	23
5.1 Análise bibliométrica	23
5.1.1 Padrões e tendências de crescimento das publicações e citações	23
5.1.2 Análise da performance: países, instituições, áreas do conhecimento, revistas e autores.....	27
5.2 Revisão sistemática	31
5.2.1 Revisão da literatura e características dos artigos	31
6. DISCUSSÃO	46
7. CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia situa-se na porção norte da América do Sul, abrangendo o território de nove países, sendo eles Bolívia (8%), Brasil (62%), Colômbia (6%), Equador (2%), Guiana (2%), Guiana Francesa (1%), Peru (11%), Suriname (2%) e Venezuela (6%), totalizando 6.7 milhões de km² (MAPBIOMAS, 2021; MONTALVÁN-BURBANO *et al.*, 2021). Com uma população de cerca de 47 milhões de habitantes (NOBRE *et al.*, 2021), esta região se destaca por ser a maior floresta tropical do planeta, com uma vasta diversidade geológica, biológica e cultural (PITMAN *et al.*, 2001; HÄNGGLI *et al.*, 2023). O bioma amazônico oferece inúmeros serviços ecossistêmicos, dentre eles o fornecimento de matérias-primas e água doce, regulação do clima global, além da provisão cultural e paisagística (BONAN, 2008; STRAND *et al.*, 2018).

Na Amazônia encontram-se os maiores recursos minerais do planeta, objetos de importantes projetos de extração em diferentes países. No Brasil, a Serra dos Carajás, localizada no Estado do Pará, representa uma das maiores províncias minerais do mundo, com destaque para a produção de ferro (CASTRIOTA, 2022). Nas Guianas e no Suriname, o ouro é o principal recurso explorado, sendo acompanhado pela extração de bauxita, matéria-prima essencial para a indústria do alumínio (FREITAS, 2023; SILVA, 2022). No Equador, o projeto Fruta del Norte, situado na região de Zamora-Chinchipe, compõe um dos maiores empreendimentos auríferos da chamada Amazônia Equatoriana (LEARY *et al.*, 2016). Na Venezuela, o Arco Mineiro de Orinoco abrange áreas de concentração e exploração de ouro e ferro em larga escala (RODRIGUES, 2019). No entanto, apesar da relevância econômica, a mineração na Região Amazônica está associada a severos impactos socioambientais, especialmente nas áreas de garimpo de ouro que frequentemente operam de forma ilegal (SEPE *et al.*, 2021). A ausência de fiscalização e de políticas públicas eficazes intensificam tais efeitos, ameaçando a biodiversidade e os modos de vida tradicionais.

Nas últimas décadas, as modificações espaciais induzidas por atividades antrópicas na Amazônia têm acelerado drasticamente a degradação ambiental (LAPOLA *et al.*, 2023). A maioria dessas mudanças tem sido norteadas pela atuação de grandes projetos na Amazônia e suas complexas interações, essencialmente entre a agroindústria e a mineração (HECHT *et al.*, 2021). Estas atividades econômicas

desencadeiam diversas alterações ecossistêmicas, promovendo a supressão da vegetação, a destruição do solo, a degradação de recursos hídricos (superficiais e subterrâneos) e a instabilidade ecológica representando riscos para a saúde humana e para o ecossistema (GARRET *et al.*, 2017; CASTRO *et al.*, 2019; MARTINS *et al.*, 2022).

A dispersão de metais no ambiente pode ocorrer devido ao processo natural de intemperismo de rochas e solos, portanto associada à fonte natural ou à fontes antrópicas provenientes das atividades humanas, tais como a mineração e o uso de agroquímicos na agricultura (JIA *et al.*, 2020; ZHAO *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2020). Frequentemente, os contaminantes metálicos têm sido abordados pela comunidade científica como um dos mais perigosos, essencialmente por serem persistentes, tóxicos e não serem biodegradáveis, e por possuir tendência para a bioacumulação ao longo da cadeia trófica (VARDHAN *et al.*, 2019; KUMAR *et al.*, 2020; TRUCHET *et al.*, 2021). Por estes motivos, a exposição aos metais apresenta riscos à saúde humana, induzindo lesões em múltiplos órgãos, causando doenças neurodegenerativas e, por vezes, sendo carcinogênicos e teratogênicos (LE *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2024; CABRAL PINTO *et al.*, 2019; PINZON-BEDOYA *et al.*, 2020; ZAMORA-LEDESMA *et al.*, 2021).

Há uma preocupação eminente em relação aos metais oriundos das atividades antrópicas, uma vez que estes elementos comumente englobam múltiplas fontes cujas descargas caracterizam-se por superarem as naturais tanto em maior diversidade e concentração de substâncias metálicas como em menor tempo de entrada e posterior acumulação no ambiente, culminando em um incremento às concentrações naturais no solo, na água, no ar, além de serem mais prontamente biodisponíveis em relação às fontes naturais (HUANG *et al.*, 2019; HONG *et al.*, 2022). De todo modo, grande parte dos contaminantes metálicos é oriunda de áreas terrestres, sendo passível de transporte por meio fluvial, descarga de águas subterrâneas e deposição atmosférica (SHAH, 2021).

Na escala global, diversos estudos têm aplicado a bibliometria para analisar tendências de pesquisa sobre metais associados a riscos à saúde (HAN *et al.*, 2020), metais e a evolução de políticas ambientais (NOFRIANDI *et al.*, 2024), ou mesmo para rastreamento da contaminação de metais (DING, 2024). Na Região Amazônica alguns trabalhos utilizaram a revisão sistemática para abordagens acerca das concentrações

de metais influenciadas pela mineração (MOULATLET *et al.*, 2023) e biomagnificação de metilmercúrio em peixes (GIMENES *et al.*, 2021).

Nesse sentido, o estudo bibliométrico é útil para a análise intelectual do campo de investigação, cuja interpretação de dados é realizada por meio do mapeamento quantitativo (ABAD-SEGURA, 2020; HERRERA-FRANCO *et al.*, 2021), quanto a revisão sistemática é uma ferramenta utilizada para sintetizar, avaliar, identificar ou comunicar os resultados e implicações de uma grande quantidade de pesquisas e informações (CAMILO e GARRIDO, 2019). Contudo, a literatura mostra que estas metodologias vêm sendo pouco exploradas no enfoque a diferentes estudos envolvendo metais na Região Amazônica, sendo, portanto, utilizadas restritamente à evolução de pesquisas sobre Hg (MORAES PINTO *et al.*, 2019) ou sobre a fitorremediação deste metal (MOSQUERA CHAVERRA *et al.*, 2024).

Considerando-se a relevância do conhecimento acerca de estudos que vêm sendo feitos sobre metais no território amazônico, o presente trabalho constitui o primeiro estudo a integrar análise bibliométrica e revisão sistemática com o propósito de verificar o panorama atual, mapear tendências e abordagens sobre este campo de pesquisa em uma região de extrema importância mundial. Para tanto, o método de revisão bibliométrica avaliou 511 artigos publicados ao longo das últimas quatro décadas (1984-2023), visando elucidar o estado da arte sobre esta área de investigação. A análise do panorama atual contemplou os padrões de crescimento anual dos artigos e citações, bem como a performance segundo grandes áreas do conhecimento, países, instituições, periódicos e autores. A revisão sistemática, por sua vez, abrangeu 61 trabalhos científicos realizados durante a década de 2014 a 2023, com o intuito de analisar as abordagens referentes aos principais metais, suas concentrações, fontes e impactos decorrentes quando há riscos de contaminação metálica.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Apresentar um panorama da abordagem científica sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023 através da investigação da literatura publicada na base *Scopus*, a fim de se obter o atual estado de arte do conhecimento sobre esses elementos na Amazônia e assim contribuir para a compreensão das necessidades

futuras e tendências para os próximos anos, fomentando o desenvolvimento deste campo de pesquisa científica da região.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Avaliar os padrões de crescimento de publicações e citações, bem como prever a quantidade de publicações para as próximas décadas;
- ✓ Verificar a performance científica na literatura relacionada a estudos de metais na Amazônia: áreas de estudo, países, instituições, revistas e autores;
- ✓ Analisar, por meio de uma revisão sistemática abrangente, os principais metais estudados, as concentrações em sedimento, água e solo, e se estas estão de acordo com as normas ambientais estabelecidas para proteção do ecossistema, além das principais fontes desses elementos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Bibliometria

A análise bibliométrica é caracterizada como um método popular e rigoroso para explorar e analisar grandes volumes de dados científicos (DONTU *et al.*, 2021). A bibliometria é considerada uma importante ferramenta de avaliação, na escala global, de produções científicas que trazem informações relevantes nos mais variados campos de conhecimento (PIMENTA *et al.*, 2017). Essa análise tem como finalidade identificar tendências e crescimento de conhecimento em uma determinada área, identificar editoras, identificar os principais pesquisadores, grupos e instituições, estudar a dispersão e obsolescências da literatura, prever padrões de produtividade individuais de autores, países que mais publicam trabalhos, medir graus e padrões de colaboração entre autores, analisar processos de citação e co-citação, avaliar os aspectos estatísticos de linguagem e das palavras, além de medir o crescimento de determinadas áreas (D'ABREU *et al.*, 2020). Segundo Wallin (2005), as primeiras discussões sobre bibliometria surgiram nos anos 1950, o que sugere que essa metodologia não é nova. Assim, o termo 'bibliometria' foi proposto no final da década de 60 por Pritchard, e definido como método estatístico e matemático na análise de obras literárias (PRITCHARD, 1969).

Esse método tem ganhado popularidade nos últimos anos e isso pode ser

atribuído aos avanços, disponibilidade e acessibilidade de *softwares* bibliométricos que auxiliam nas análises dos dados obtidos, como o *Gephi*, *Leximancer*, *VOSviewer* e algumas bases de dados científicas como a *Scopus* e *Web of Sciences* (DONTHU *et al.*, 2021). A base de dados referencial *Scopus* utilizada neste trabalho, é, segundo a Elsevier, a maior base de resumos e citações revisadas por pares. Além disso, a *Scopus* conta com ferramentas de acompanhamento, análise e visualização de pesquisas, que oferecem uma ampla base de dados nas mais variadas áreas do conhecimento como ciências, tecnologia, medicina, ciências sociais, artes, entre outros (WILMERS *et al.*, 2017).

3.2 Revisão sistemática da literatura

A revisão sistemática é definida como um tipo de investigação científica cujo objetivo principal busca reunir, avaliar e conduzir sínteses dos resultados de múltiplos estudos pré-determinados (COOK *et al.*, 1997). Esse tipo de investigação é responsável por disponibilizar evidências que estejam relacionadas a uma estratégia de intervenção específica, mediante a aplicação de métodos explícitos e sistematizados de buscas, crítica e síntese das informações adquiridas por meio da literatura (SAMPAIO e MANCINI, 2006). Para esse tipo de revisão é importante a elaboração de alguns critérios de avaliação para a escolha dos artigos, tais como: onde os estudos são encontrados (qual a base de dados), critério de inclusão e exclusão dos artigos, definição dos desfechos de interesse, verificação da acurácia dos resultados, determinação da qualidade dos estudos e, em alguns casos, incluir também as análises estatísticas utilizadas (MAGEE, 1988).

3.3 Metais: fontes, distribuição e riscos

Metais são considerados elementos que muitas vezes podem ser nocivos para os seres humanos e meio ambiente, apresentam propriedades únicas e em alguns casos podem se tornar tóxicos mesmo em baixas concentrações (BUDI *et al.*, 2024). Fontes desses elementos estão relacionados a fontes naturais e/ou atividades antrópicas. Muitos estudos abrangem as diferentes formas naturais de ocorrências de metais no meio ambiente e, entre essas fontes podem-se citar: erupções vulcânicas, incêndios florestais naturais, intemperismo de rochas, fontes biogênicas e particulados atmosféricos (MASINDI e MUEDI, 2018). As fontes advindas de atividades antrópicas

estão principalmente relacionadas à mineração, queima de combustíveis fósseis e biomassa, despejo de resíduos sólidos sem tratamento e práticas agrícolas com uso de fertilizantes (HE *et al.*, 2015). Esses elementos podem ser encontrados em formas, dentre outras, principalmente de hidróxidos, óxidos, sulfetos, sulfatos, fosfatos, silicatos (MASINDI e MUEDI, 2018).

A distribuição de metais no ambiente ocorre de várias formas. Nos solos, a disponibilidade e dinâmica dos metais são controlados por processos químicos e bioquímicos, tais como, precipitação-dissolução, adsorção-dessorção, complexação-dissociação e oxidação-redução, os quais podem ser fortemente influenciados também pelo pH, processos biológicos, toxicidade do elemento, o ambiente ou até mesmo fonte desse metal (HE *et al.*, 2005; CAMPOS, 2010). Nos sedimentos, a taxa de concentração de metais varia de acordo com a razão da deposição desses elementos, razão de sedimentação das partículas, a natureza e tamanho das partículas e a presença e ausência de matéria orgânica e espécies complexantes (FERNANDEZ *et al.*, 1994). Em meio aquático a concentração de metais varia, sendo influenciada pela química, físico-química e geoquímica do meio relacionados a adsorção, troca catiônica, precipitação, co-precipitação e complexação/floculação (LOUREIRO *et al.*, 2012).

Vários fatores apresentam riscos para os seres humanos, animais, plantas e ecossistema como um todo, destacando-se a indigestão, a absorção por plantas, consumo de alimentos e água contaminados, além das alterações que ocorrem no solo e impactam diretamente em sua qualidade e da água subterrânea (MUSILOVA *et al.*, 2016). Um dos fatores de riscos mais comum está relacionado tanto a bioacumulação de metais no organismo que pode causar sérios problemas para a fisiologia, como ao processo de biomagnificação que ocorre quando o metal se acumula ao longo da cadeia trófica (COSTA, 2020). Tais fatores, juntamente com a toxicidade e persistência, característicos dos metais (ALI *et al.*, 2019), e os sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente, tornam cada vez mais relevantes e importantes os estudos sobre esses elementos.

Estudos sobre as influências de metais são de extrema relevância para a compreensão da dinâmica desses elementos no meio ambiente. A concentração natural desses elementos na crosta terrestre é comumente referida como *background* geoquímico, os valores obtidos pelo *background* são importantes, tendo em vista que

sua definição possibilita o estabelecimento de padrões de qualidade ambientais, assim como interpretar se o impacto foi originado por fontes químicas de contaminação antrópica ou natural (SALOMONS e FÖRSTNER, 2012; AMARANTE, 2021).

Assim, altas concentrações de metais nos seres humanos podem causar danos, dentre outros, nos sistemas circulatório, enzimático, nervoso, endócrino e imunológico e doenças como câncer, disfunção renal, hipertensão (LI *et al.*, 2014). Nas plantas foram observados problemas no metabolismo, desde processos germinativos até a emissão de frutos e sementes, além de influenciar na fotossíntese e no processo de transporte de açúcares (NAGAJYOTI *et al.*, 2010; FALCÃO, 2019).

3.3.1 Metais na Amazônia

A riqueza mineral metálica da Região Amazônica está intrinsecamente vinculada às suas antigas formações geológicas, representadas principalmente pelo Cráton Amazônico e pelo Escudo das Guianas. Essas estruturas correspondem a unidades cratônicas estáveis, formadas por blocos arqueanos amalgamados durante eventos orogênicos do Paleoproterozoico (SANTOS *et al.*, 2000; CORDANI *et al.*, 2013). A Amazônia destaca-se pela abundância de recursos naturais, especialmente minérios metálicos, aquíferos de água doce, e reservas de hidrocarbonetos como petróleo e gás natural. O Sistema Aquífero Alter do Chão (SAAC), localizado nos estados do Pará, Amapá, Amazonas e Roraima, considerado um dos maiores reservatórios de água doce subterrânea do mundo com um volume estimado de cerca de 90 mil km³, é a principal fonte de abastecimento de vários municípios da região (ANA, 2015; TANCREDI 1996). Os principais depósitos de minérios concentram-se ao redor dos escudos pré-cambrianos e constituem produtos de significativa relevância para a exportação (VAL *et al.*, 2021). Grande parte desses depósitos encontram-se na porção brasileira da Amazônia, com destaque para as jazidas de minério de ferro da Província Carajás, situada no estado do Pará no núcleo mais antigo do escudo pré-cambriano amazônico (~3,0 a 2,5 Ga) e é mundialmente reconhecida por abrigar um dos maiores depósitos de ferro de alto teor do mundo (SILVA, 2020; MACAMBIRA *et al.*, 2020). Os depósitos que abrangem essa região estão associados a formações vulcano-sedimentares, intrusões graníticas e complexos máficos e ultramáficos, que embora sejam vinculados a rochas antigas,

formaram-se e acumularam-se entre o Paleógeno e o Quaternário, por meio de processos de laterização, erosão e concentração (SANTOS, 2002).

Cerca de 40% da Amazônia é composta por terrenos pré-cambrianos, que abrigam depósitos minerais diversos, como ferro, manganês, alumínio, cobre, zinco, níquel, cromo, titânio, fosfato, ouro, prata, platina, paládio, ródio, estanho, tungstênio, nióbio, tântalo, zircônio, terras-raras, urânio e diamante (SANTOS, 2002). A potencialidade mineral da Amazônia não apenas impulsiona a economia regional, como também gera desafios socioambientais, onde a mineração se destaca como a principal causa dessa problemática (SANTOS, 2002; BOSSI, 2023). A extração de recursos minerais na Região Amazônica gera impactos ambientais significativos, incluindo desmatamento, contaminação de recursos hídricos e alterações na biodiversidade (COELHO e MORAES-WANDERLEY, 2013; SONTER *et al.*, 2017). O uso de mercúrio na mineração artesanal de ouro constitui uma das principais preocupações ambientais, resultando em contaminação de ecossistemas aquáticos e riscos à saúde humana (TELMER e VEIGA, 2009). A implementação de grandes projetos na Amazônia, principalmente relacionados à mineração e à agropecuária, geram impactos sociais profundos e multifacetados que atingem especialmente as comunidades tradicionais e indígenas da região (CURI, 2007).

4. METODOLOGIA

Conforme os objetivos do estudo, foram utilizados dois recortes temporais distintos segundo a metodologia aplicada. A análise bibliométrica abrangeu o período de 1984 a 2023, com o objetivo de mapear a produção científica ao longo das últimas quatro décadas, identificando tendências históricas, crescimento de publicações e performance científica. A revisão sistemática foi delimitada ao intervalo de 2014 a 2023, correspondendo à década mais recente. Essa escolha visou priorizar os estudos mais atuais e com dados disponíveis integralmente, garantindo maior precisão na análise das concentrações de metais, matrizes ambientais, fontes de contaminação e áreas impactadas. A aplicação de diferentes períodos reflete a especificidade de cada abordagem metodológica utilizada neste estudo.

4.1. Análise bibliométrica: critérios de pesquisa e exportação de dados

O levantamento de dados bibliométricos foi realizado na plataforma *Scopus*, a qual foi escolhida por abranger um grande e atualizado acervo de periódicos (HERRERA-FRANCO *et al.*, 2021). Utilizando-se o campo de pesquisa avançada da plataforma, foram usados descritores que auxiliaram na busca de estudos sobre metais na Amazônia. Os descritores foram definidos a partir do fluxo *booleano*: *TITLE-ABS-KEY ("Amazon" OR "Amazonian") AND TITLE-ABS-KEY ("metal*" OR "trace metal*" OR "heavy metal*" OR "potentially toxic element*") AND ("contaminant*" OR "contamination" OR "pollutant" OR "pollution" OR "impact") AND ("water" OR "sediment" OR "soil")*. Esses descritores incluíram campos específicos, considerados fundamentais para uma busca mais delimitada, tais como título, resumo e palavras-chave. Inicialmente, os resultados reuniram 639 documentos que foram publicados entre os anos de 1984 e 2023. O recorte temporal de quatro décadas foi previamente definido, considerando-se o crescimento de estudos abordando a contaminação por metais pesados nas últimas décadas (POURRET e HURSTHOUSE, 2019).

A filtragem de dados foi realizada por meio de marcação de campos presentes na base de dados da *Scopus*, tais como tipo de documento e a linguagem em que o trabalho foi escrito, para garantir a qualidade e melhor precisão nos resultados. Nesse sentido, o tipo de documento escolhido para essa análise foram os artigos, pois já passaram por rigorosas revisões e correções (HERRERA-FRANCO *et al.*, 2021). A linguagem escolhida considerou apenas o inglês, por ser o idioma mais utilizado na grande maioria das publicações científicas (HERRERA-FRANCO *et al.*, 2020). Essa filtragem resultou em um novo resultado [639 (pré-filtragem) – 128 (exclusão após os filtros) = 511 artigos para análise]. Todos os dados foram baixados em formato CSV - *Comma-Separated Values* (valores separados por vírgula), os quais incluíram diversos dados bibliográficos na transferência, tais como autores, título, ano de publicação, título da fonte, afiliação do autor, palavras-chave, número e dados de citação, básicos para os estudos bibliométricos (HALLINGER e SURIYANKIETKAEW, 2018).

4.2 Padrões de crescimento e modelagem matemática

Para análise do padrão de crescimento das publicações e citações foi utilizada a Lei de Price (1963), a qual utiliza uma análise integrada entre equações linear e exponencial para avaliar o crescimento predominante das publicações e citações nos artigos avaliados. Para verificar a relevância da literatura sobre esta temática, foi aplicado o Índice de Price, o qual indica o número de citações dos últimos cinco anos avaliados dividido pelo número total de citações dos artigos, multiplicado por 100 (Eq. (1) (WILDGAARD *et al.*, 2014).

$$\text{Índice de Price} = \frac{\text{número de citações dos últimos 5 anos}}{\text{número de publicações totais}} \times 100 \quad (1)$$

Um modelo matemático foi aplicado para descrever a relação entre o número anual acumulado e o ano de publicação. Estudos anteriores utilizaram polinômios de terceira ordem para prever o crescimento de futuras publicações, como os de VEIGADEL-BAÑO *et al.* (2023) e SILVA *et al.* (2024). Portanto, este modelo foi aplicado para prever o número de publicações sobre esta temática para as próximas duas décadas.

4.3 Revisão sistemática: critérios, abordagens e tratamento de dados

Para a seleção dos artigos usados na revisão sistemática, foram utilizados inicialmente os descritores do fluxo *booleano*: *TITLE-ABS-KEY ("Amazon" OR "Amazonian") AND TITLE-ABS-KEY ("metal*" OR "trace metal*" OR "heavy metal*" OR "potentially toxic element*") AND ("contaminant*" OR "contamination" OR "pollutant" OR "pollution" OR "impact") AND ("water" OR "sediment" OR "soil")*, aplicado na base de dados da *Scopus*, incluindo também descritores relacionados a título, resumo e palavras-chave, abrangendo o recorte temporal de 1984-2023, totalizando 639 artigos.

Em seguida, estes documentos foram submetidos a análises de filtragem, a saber: 1) Triagem (inclusão apenas de artigos na língua inglesa) = 511 artigos, 2) Elegibilidade (identificação de um novo período temporal, 2014 a 2023) = 326 artigos, 3) Inclusão (apenas artigos com acesso livre disponíveis para download) = 147 artigos, e 4) Exclusão (artigos com dados insuficientes e/ou incompletos sobre dados pré-estabelecidos) = 81 artigos excluídos. Após a aplicação dos métodos de filtragem, os textos elegíveis para realização da revisão sistemática totalizaram 61 artigos. Os

dados foram adicionados e processados em uma planilha utilizando-se o aplicativo *Microsoft Excel* (V 16.0.1). Os dados pré-estabelecidos consistiam em artigos cuja abordagem permitia a: 1) identificação dos principais metais, fontes e matrizes ambientais, 2) identificação das principais áreas abordadas e impactos advindos da contaminação.

Os gráficos da visualização dos resultados foram elaborados utilizando-se a linguagem de programação Python, com o auxílio do ambiente de desenvolvimento *Visual Studio Code* (VS Code) e da biblioteca *Matplotlib*.

5. RESULTADOS

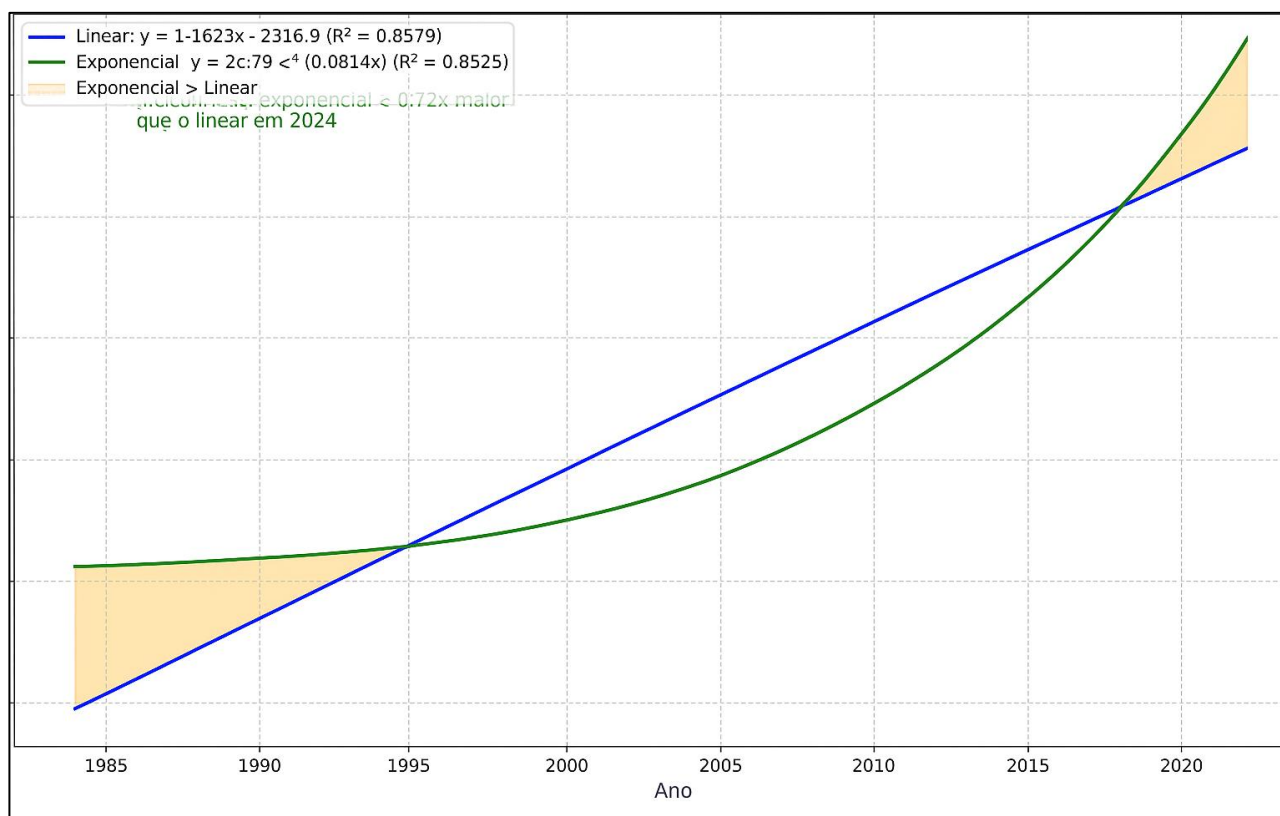
5.1 Análise bibliométrica

5.1.1. Padrões e tendências de crescimento das publicações e citações

O total de publicações sobre estudos de metais na Amazônia foi de 511 artigos científicos, cujo crescimento no número de estudos foi notável ao longo do período temporal de 1984 a 2023 (**Figura 1**). Na primeira década, de 1984 a 1993, o número de publicações não foi tão expressivo quanto nas décadas posteriores. Na década seguinte, de 1994 a 2003, foi possível observar o aumento significativo no número de publicações, ao todo foram 67 artigos publicados, representando 13,1% das publicações. No período posterior, de 2004 a 2013, foram registrados 114 artigos que representam 22,3% das publicações. A mudança no padrão de publicações mudou abruptamente na última década entre 2014 e 2023, com crescimento acentuado no número de trabalhos publicados, totalizando 326 artigos. O ano de 2020 se destacou pelo maior número de artigos, com o total de 55 estudos publicados.

Para a análise de produtividade, foi utilizada a Lei de Price como indicador bibliométrico, que apresenta um crescimento exponencial no corte temporal de 40 anos (1984 a 2023). A **Figura 1**, apresenta os dois tipos de equações utilizadas para a análise desses padrões, a primeira linear $y = 1,1623x - 2316,9$ cujo resultado foi de $R^2 = 0,6579$ e a outra exponencial $y = 2 \times 10^{-79} \cdot e^{(0,0914x)}$ onde o resultado obtido foi de $R^2 = 0,8525$ indicando excelente capacidade de previsão. Dessa maneira, nota-se que o valor de crescimento exponencial no número de publicações ocorre de forma abrupta, sendo 0,77 vezes maior que o valor linear.

Figura 1: Evolução anual das publicações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023, com ajuste linear e exponencial segundo a Lei de Price.



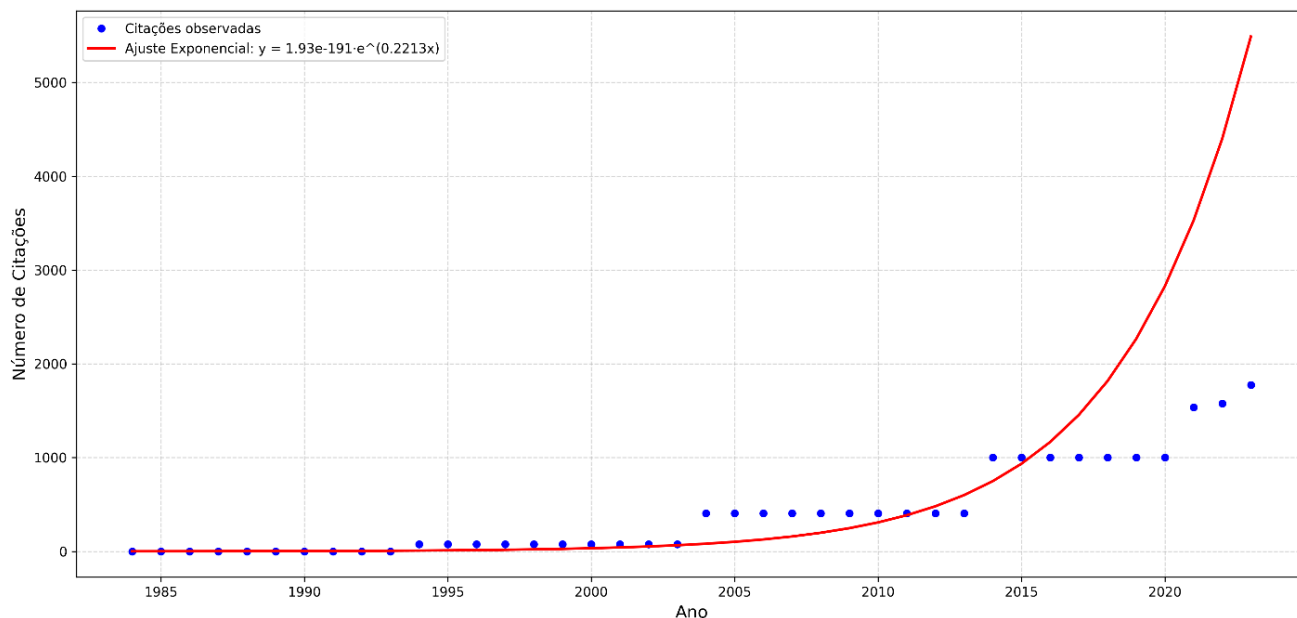
Fonte: Autor, 2025.

Para a análise dos números de citações foram considerados 511 artigos que somados totalizaram 15.574 citações, ou seja, uma média de 30,4 citações por artigo. A Figura 2 exibe a representação gráfica desses dados. É possível observar um crescimento abrupto no número de citações a partir do ano de 2011. Na primeira década, de 1984 a 1993, o total foi de apenas 8 citações. Em seguida, na década de 1994 a 2003 as citações totalizaram 771. A década seguinte, de 2004 a 2013 totalizou 4.048 citações. A última década, de 2014 a 2023, destaca-se por apresentar um aumento significativo, somando 10.747 citações portanto, a década mais representativa. O ano de 2023 se destaca com maior índice de citações (1.774 no total), seguido pelo ano de 2022 (1.577 citações) e 2021 (1.537 citações).

O Índice de Price foi usado para indicar o percentual de artigos citados no decorrer dos anos, no qual o cálculo percentual foi de 45,9%, indicando que os estudos sobre metais na Região Amazônica, abrangem um grande acervo de literatura e relevância dentro do campo científico. De forma a verificar as principais contribuições, foram consideradas as 10 publicações mais citadas em artigos sobre estudos de metais na Amazônia (**Tabela 1**). Em primeiro lugar o artigo mais citado foi

de Zahir *et al* (2005) com o total de 952 citações, seguido por Malm (1998) com 447 citações, Gochfeld (2003) com 403 citações, Esser *et al.* (1993) com 344 citações e Yamasoe *et al.* (2000) que totalizou 342 citações. Os 5 artigos que fecham esse ranking são publicações que foram citadas <300 vezes, que somados totalizaram 1.121 citações.

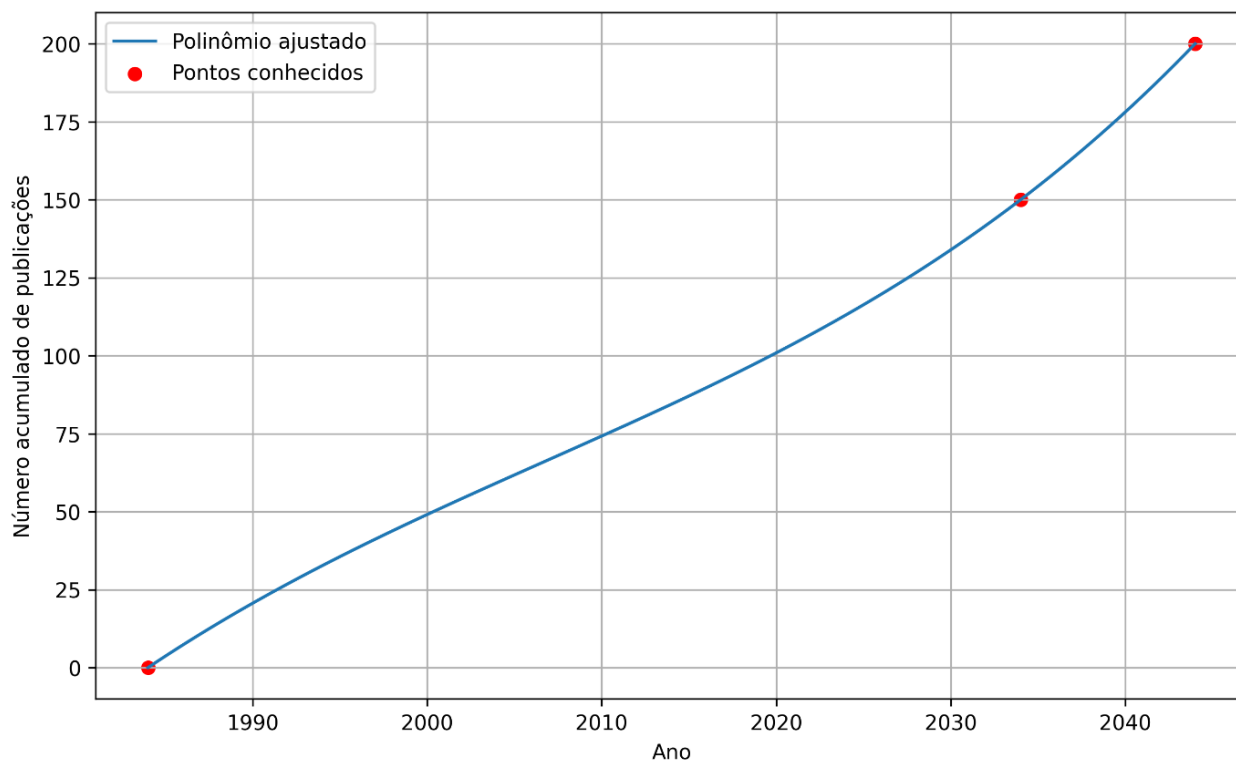
Figura 2: Tendência de crescimento anual das citações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023, segundo o Índice de Price.



Fonte: Autor, 2025.

Para reforçar os dados sobre o crescimento no número de publicações foi utilizado o modelo polinomial de terceira ordem, empregado por Veiga-del-baño *et. al* (2023) e Silva *et al.* (2024). Conforme o gráfico na **Figura 3**, a equação resultante é $y = 0,0033x^3 - 19,561x^2 + 39162x - 3 \times 10^7$ e $R^2 = 0,9889$, um coeficiente de determinação elevado. Esse resultado estabelece uma relação entre o número anual acumulado de publicações e os anos de publicação. Com base no gráfico é possível prever o crescimento de publicações futuras para os próximos 20 anos. De acordo com a previsão numérica, o número de artigos publicados será > 150 artigos em 2034 e > 200 artigos em 2044.

Figura 3: Relação entre o número cumulativo e ano de publicações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 1: Estudos mais citados sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.

Título	Autor	Metal	Matriz	Ano	Número de citação
Low dose mercury toxicity and human health	Zahir <i>et al.</i>	Hg	Água, solo e sedimentos	2005	952
Gold mining as a source of mercury exposure in the brazilian amazon	Malm	Hg	Sedimentos, solo, ar, peixes, cabelo humano e urina	1998	447
Cases of mercury exposure, bioavailability, and absorption	Gochfeld	Hg	Cabelo, sangue, urina, ar, solo, água e alimentos	2003	403
The osmium isotopic composition of the continental crust	Esser e Turekian	Os e Re	Sedimentos	1993	344
Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the amazon basin: water-soluble species and trace elements	Yamasoe <i>et al.</i>	Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Br, Rb, Sr e Zr	Partículas de aerossol	2000	342
Heavy metals distribution in mangrove sediments along the mobile coastline of french guiana	Marchand <i>et al.</i>	Cu, Co, Pb, Ni, Cr, Zn, Mn, Fe e Hg	Sedimentos e amostras de plantas	2006	265

Early diagenesis of biogenic silica in the amazon delta: alteration, authigenic clay formation, and storage	Michalopoulos and Aller	Si, K, Mg, Fe, Al, Mn, F, Cl	Sedimentos, água, material suspenso, diatomáceas e radiolários	2004	233
Tidal river dynamics: implications for deltas	Hoitink e Jay	-	-	2016	227
The geochemistry of mercury in central amazonian soils developed on the alter-do-chao formation of the lower Tapajós river valley, Pará state, Brazil	Roulet <i>et al.</i>	Hg	Solos e camadas de serrapilheira da superfície do solo	1998	212
Effects of recent human colonization on the presence of mercury in amazonian ecosystems	Roulet <i>et al.</i>	Hg	Solos, vegetação e húmus	1999	184

Fonte: elaborado pelo Autor, 2025.

5.1.2 Análise da performance: países, instituições, áreas do conhecimento, revistas e autores

No total, 47 países publicaram artigos sobre metais na Região Amazônica. Considerando-se que diversas publicações possuem autores de diferentes nacionalidades, a contagem total de autorias por país (incluindo-se coautorias internacionais) resultou em 804 ocorrências. Para este estudo, foram destacados os 10 países que mais publicaram artigos sobre metais na Amazônia, conforme representado na Tabela 2. O Brasil se destaca com 354 artigos publicados, seguido por os Estados Unidos com 82 artigos, Canadá com 52 artigos, França com 46 artigos e Espanha com 34 artigos. Equador, Alemanha, Peru, Reino Unido e Índia fecham esse ranking com 111 artigos. Somente para dois artigos não se identificou qual país de origem.

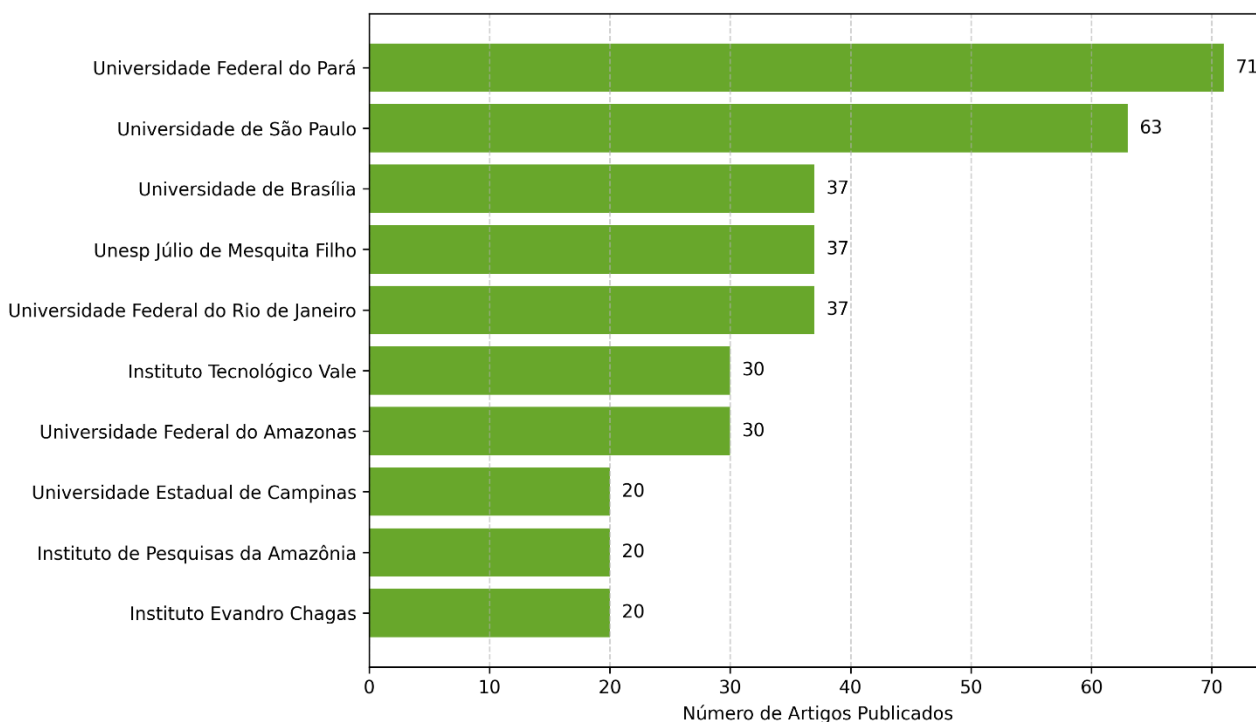
Tabela 2: Países que mais publicaram artigos sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.

País	N° de Publicações
Brasil	354
Estados Unidos	82
Canadá	52
França	46
Espanha	34
Equador	33
Alemanha	27

Peru	22
Reino Unido	17
Índia	13

Ao todo foram analisadas por este estudo 160 instituições de ensino superior, das quais alguns artigos possuem autores com mais de uma afiliação. Dessa maneira, o número total de registros para todos as instituições foi de 1.159 afiliações. Entre as 10 universidades que mais publicaram sobre esse tema (Figura 4), a Universidade Federal do Pará, se destaca com 71 artigos, seguida pela Universidade de São Paulo com 63 artigos, enquanto a Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho e a Universidade de Brasília publicaram 37 artigos cada, que somados totalizam 111 artigos. A Universidade Federal do Amazonas e o Instituto Tecnológico Vale possuem 30 publicações cada, que somados totalizam 60 artigos. O ranking é finalizado pelo Instituto Evandro Chagas, Instituto de Pesquisas da Amazônia e Universidade Estadual de Campinas, que publicaram < 30 artigos.

Figura 4: Instituições de ensino superior com maior número de publicações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.



Fonte: Autor, 2025.

Foram realizadas publicações sobre metais na Região Amazônica em 21 áreas do conhecimento (**Figura 5**). Considerando-se que o total de documentos possuem artigos em mais de uma área específica, a somatória desses registros consolidou cerca de 848 áreas e subáreas de conhecimento. A maioria dos artigos publicados foi da área de Ciências Ambientais com 323 artigos. Em seguida destacaram-se as áreas de Ciências da Terra e Planetária, com 119 artigos, Ciências Agrárias e Biológicas, com 104 artigos, Química, com o total de 66 artigos e Medicina com 62 artigos. As demais áreas do conhecimento com menos de 50 artigos publicados individualmente foram Farmacologia, Toxicologia e Farmácia (49), Bioquímica, Genética e Biologia Molecular (38), Engenharia (16), Ciências dos Materiais (10) e multidisciplinar (10). Juntas, essas cinco áreas corresponderam a um total de 123 publicações, o que representa 14,5% do total analisado.

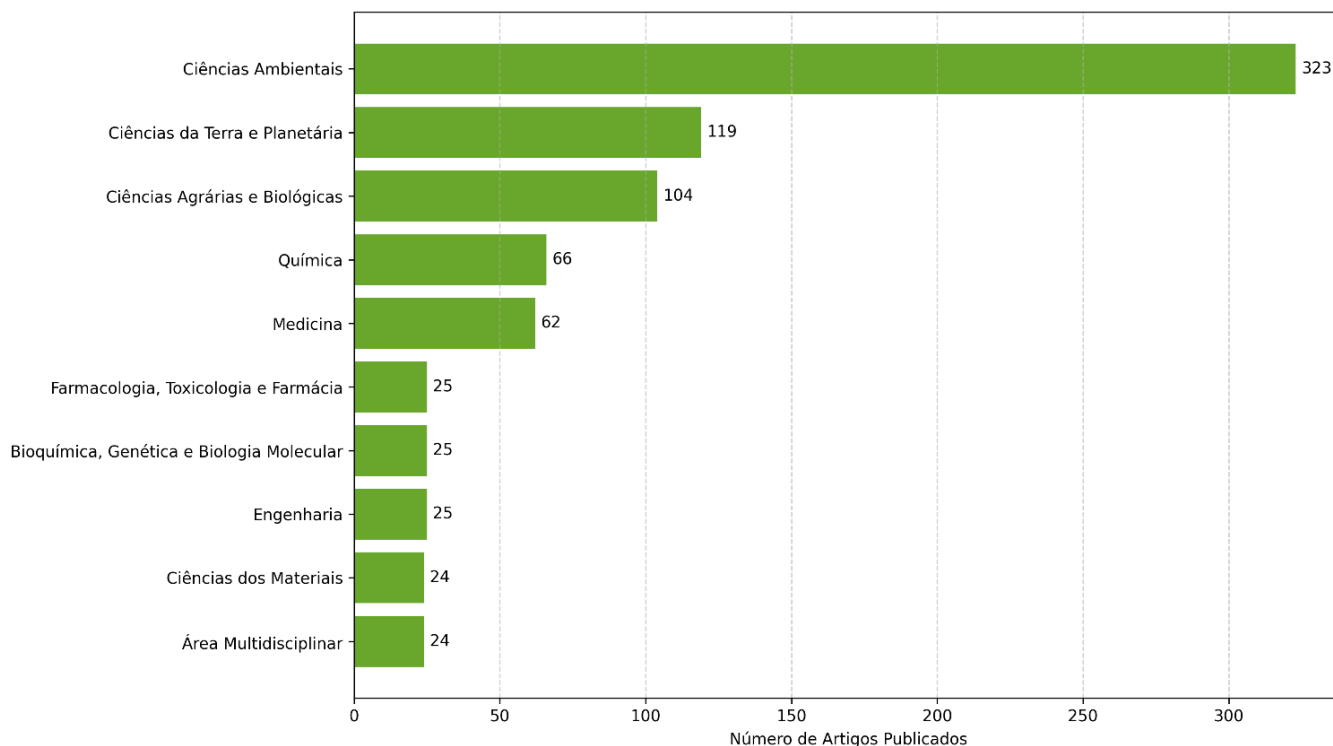
Na avaliação de revistas foram consideradas 159 editoras científicas e para o presente estudo foram destacados as 10 principais (**Tabela 3**). A revista *Science of the Total Environment* se destaca com o total de 44 artigos publicados, seguida pela *Chemosphere*, com 20 artigos. As revistas *Environmental Monitoring and Assessment* e *Environmental Pollution* possuem 17 artigos cada, totalizando 34 artigos. As demais revistas que compõem este *ranking*, com até 15 artigos individualmente, foram *Water Air and Soil Pollution* (15), *Environmental Research* (14), *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* (11), *Environmental Science and Pollution Research* (11), *Journal of South American Earth Sciences* (11) e *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* (9). Juntas, essas seis revistas totalizaram 71 publicações, correspondendo a 13,8% do total analisado.

Tabela 3: As dez principais revistas científicas que mais publicaram estudos sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.

Revista científica	Número de publicações
Science of the total environment	44
Chemosphere	20
Environmental monitoring and assessment	17
Environmental pollution	17
Water air and soil pollution	15
Environmental research	14
Bulletin of environmental contamination and toxicology	11
Environmental science and pollution research	11

Journal of south american earth sciences	11
Archives of environmental contamination and toxicology	9

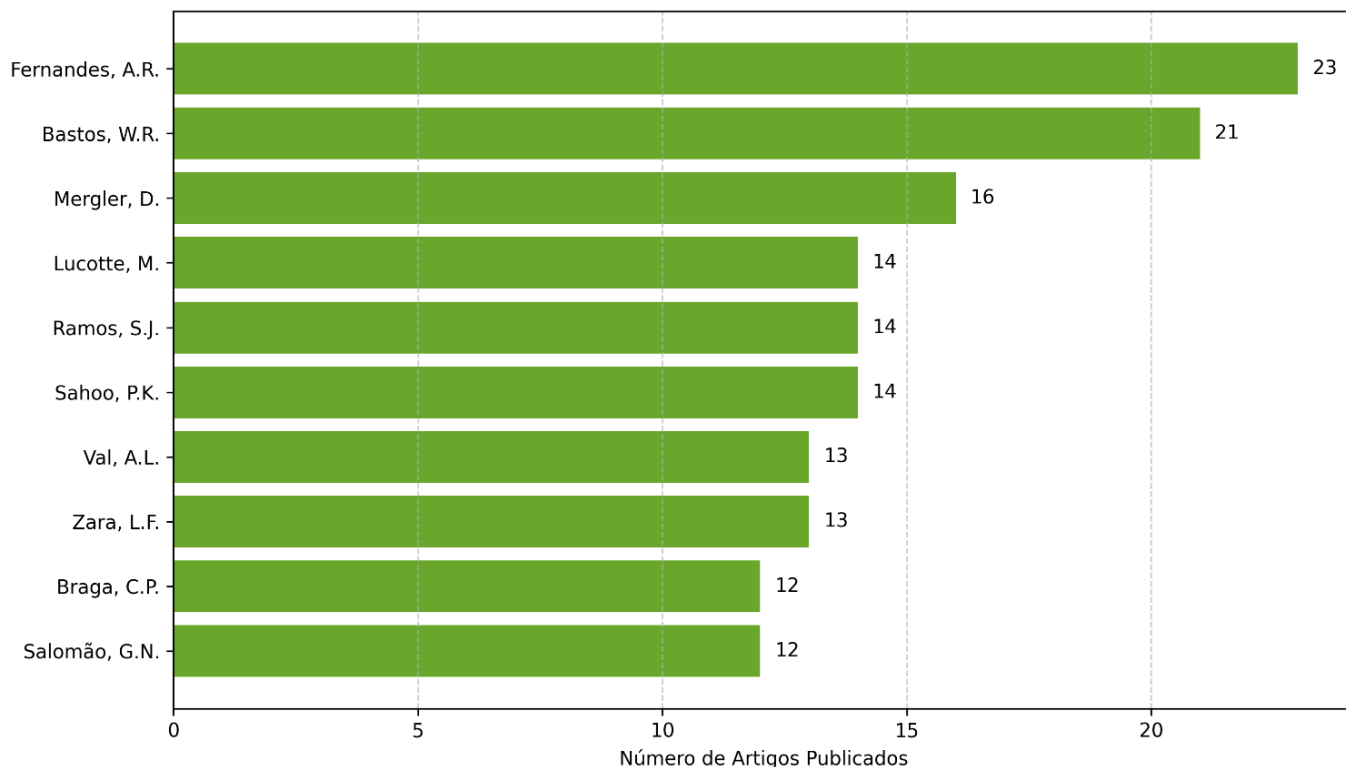
Figura 5: Principais áreas do conhecimento com maior número de publicações sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.



Fonte: Autor, 2025.

Foram considerados para este estudo o total de 159 autores, dos quais foram destacados os 10 principais (**Figura 6**). O autor/co-autor mais produtivo foi Fernandes, A.R., com 23 artigos (2,7% das publicações), seguido por Bastos, W.R., responsável pela autoria/co-autoria de 21 artigos (2,5% das publicações). Os demais autores do *ranking*, Megler, D., Lucotte, M., Ramos, S.J., Sahoo, P.K., Val, A.L., Zara, L.F., Braga, C.P. e Salomão, G.N., publicaram menos de 20 artigos (13,1% das publicações).

Figura 6: Autores com maior número de artigos publicados sobre metais na Região Amazônica entre 1984 e 2023.



Fonte: Autor, 2025.

5.2 Revisão sistemática

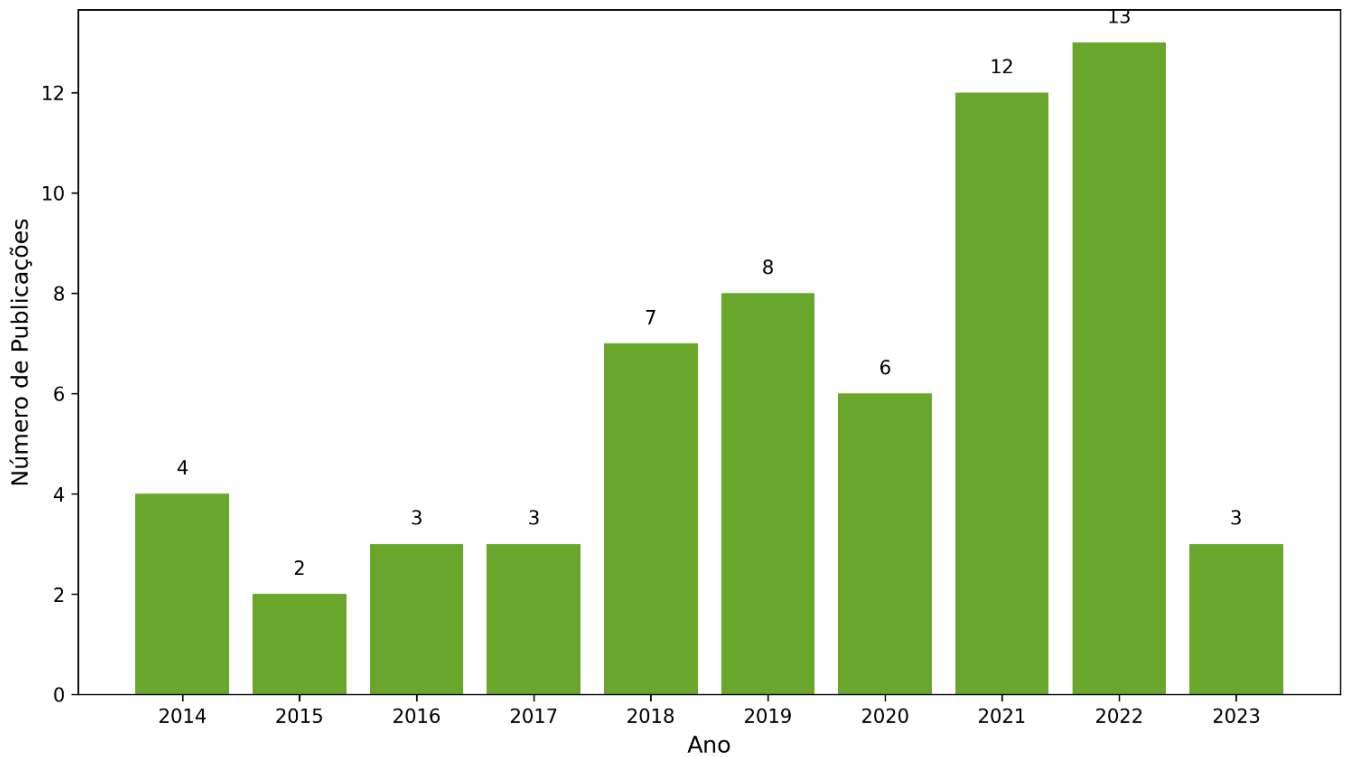
5.2.1 Revisão da literatura e características dos artigos

Entre os artigos selecionados para a leitura integral ($n = 61$), foi possível observar que os anos de 2021 ($n = 12$) e 2022 ($n = 13$) são aqueles com as maiores quantidade de artigos publicados, que somados representam 54,1% das publicações. Em seguida, o ano de 2019 ($n = 8$) também se destacou pela quantidade de artigos, representando 13% das publicações. Esses resultados reforçam que as abordagens na literatura acerca da contaminação por metais na Região Amazônica estão cada vez mais atualizadas. Os demais artigos ($n = 28$), que representam 45,9% das publicações, distribuem-se entre os outros anos analisados, cada um com menos de 7 artigos publicados individualmente (**Figura 7**).

No que concerne aos países que mais publicaram (**Figura 8**), o Brasil ocupa a primeira colocação, com o total de 45 artigos (80% das publicações), seguido de Equador com 9 artigos (14% das publicações), Peru com 5 artigos (8% das publicações) e Colômbia com o total de 2 artigos (3% das publicações). No Brasil,

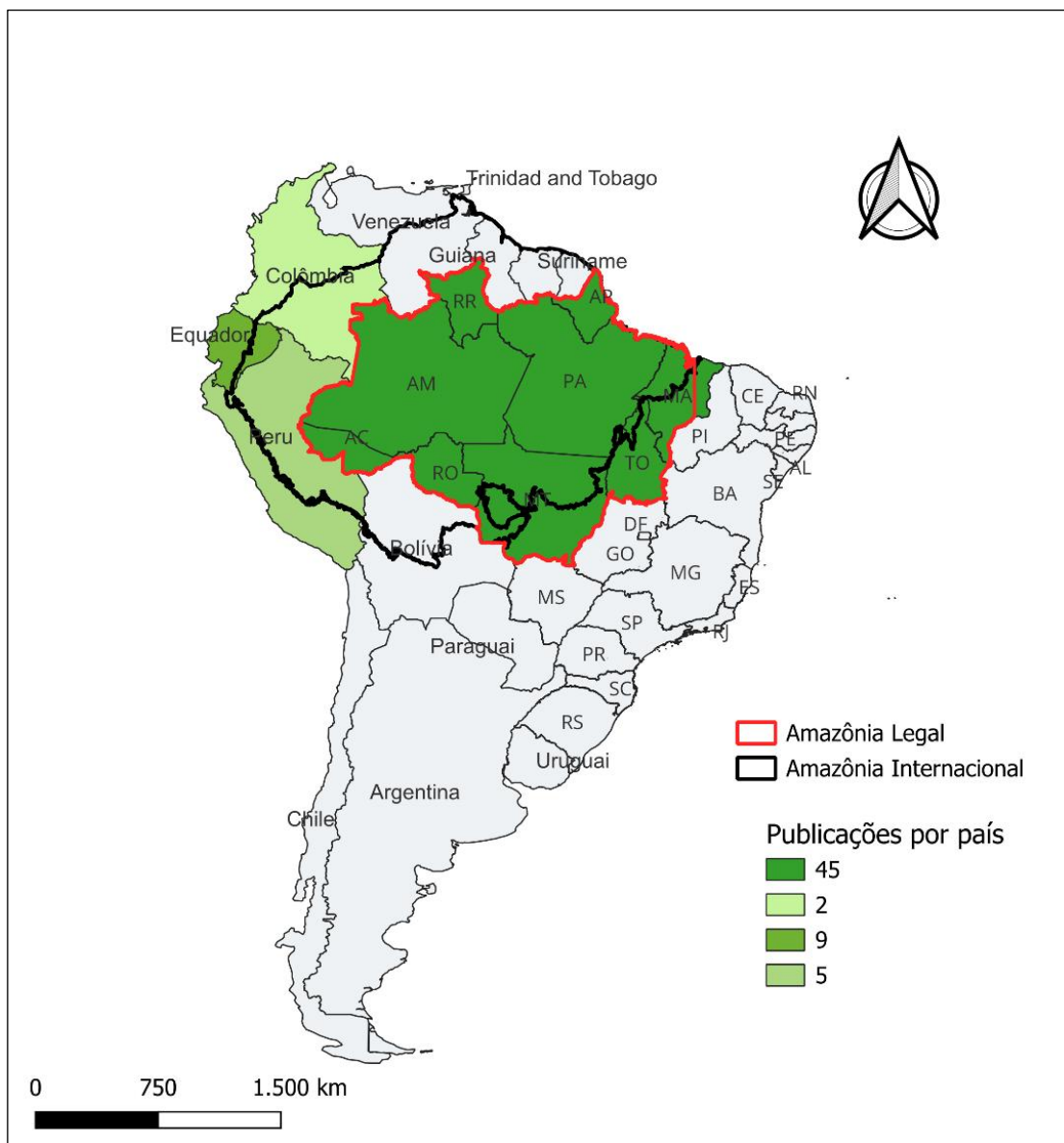
entre os estados que mais publicaram e que se destacam como área de estudo sobre metais, o Pará (n = 29) ocupa o primeiro lugar, o que corresponde a 64% das publicações, seguido pelos estados do Amazonas (n = 4), representando 9% das publicações, Amapá (n = 4) e Rondônia (n = 5), que totalizam juntos 8% e 10% de publicações respectivamente, seguido por Maranhão (n = 4) que corresponde a 8% das publicações e Mato Grosso com apenas um (2%).

Figura 7: Distribuição anual de estudos sobre metais na Região Amazônica do período de 2014 a 2023.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 8: Países que mais publicaram trabalhos sobre metais na Região Amazônica do período de 2014 a 2023.

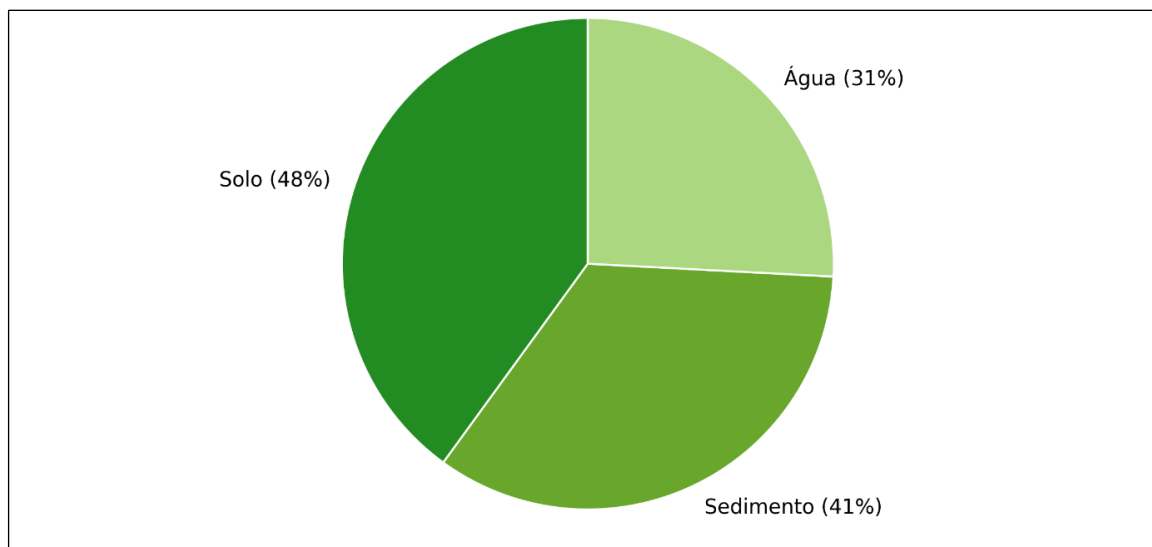


Fonte: IBGE (2021); RAISG (2022). Adaptado pelo Autor, 2025.

Quanto a quantidade de amostras utilizadas por cada estudo, destaca-se que alguns artigos não mencionaram de forma direta, o que dificultou na contagem e aprimoração dos dados. No entanto, considerando os artigos que continham esses valores, o número de amostras utilizadas por estudos teve uma variação entre 6 e 700 coletas de amostras. Entre as matrizes selecionadas para essa revisão, estudos com solo ocupam a primeira colocação, esse tipo de matriz foi analisado 29 vezes, o que representa 48% das publicações, seguido de estudos com sedimentos que totalizaram 25 abordagens, e representam 41% das publicações e água com 19 abordagens, totalizando assim, 31% das publicações (**Figura 9**). É importante destacar que muitos

trabalhos fizeram estudos que abordavam mais de uma dessas matrizes.

Figura 9: Matrizes ambientais mais estudadas para a determinação de metais na Região Amazônica do período de 2014 a 2023.



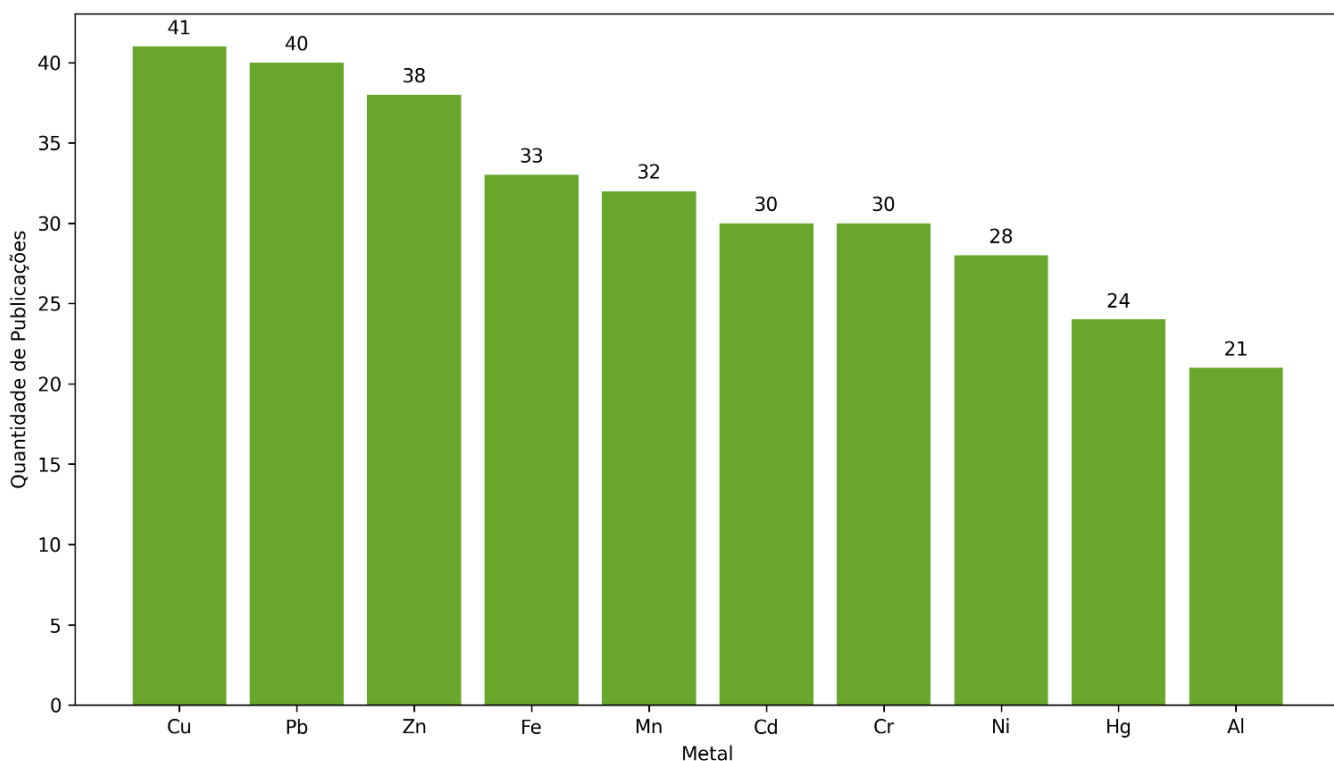
Fonte: Autor, 2025.

Em relação à contaminação das áreas estudadas, mediante a determinação dos metais das amostras de solos, sedimentos e água, 36 artigos (59% do total) indicaram a contaminação por um ou mais elementos. Por outro lado, 18 publicações (30%) não identificaram qualquer indício de contaminação ou alteração nos níveis de metais avaliados. Quatro estudos (7%) apontaram a presença de contaminação em níveis moderados nas matrizes analisadas. Além disso, dois artigos (3%) avaliaram as concentrações de metais sem o objetivo de diagnosticar contaminação, focando na determinação do *background* geoquímico, isto é, nos teores naturais de elementos em áreas pouco ou minimamente impactadas por atividades antrópicas, onde as concentrações observadas refletem predominantemente características geogênicas, associadas aos processos naturais de formação dos ambientes. Por fim, apenas uma publicação (2%) não apresentou informações conclusivas quanto à existência ou não de contaminação da área mediante matrizes estudadas.

A análise quantitativa das concentrações de metais em diferentes matrizes resultou na identificação de 58 elementos químicos distintos ao longo dos estudos selecionados. Desses, 41 elementos foram relatados entre 1 e 9 vezes, representando aproximadamente 71% do total de elementos citados e analisados. Para fins de aprofundamento nesta revisão sistemática, optou-se por destacar os 10 metais mais

frequentemente investigados (**Figura 10**), dada sua relevância ambiental e recorrência na literatura. Entre eles, cinco foram relatados menos de 30 vezes, sendo eles: alumínio (Al) presente em 21 estudos, mercúrio (Hg) em 24, níquel (Ni) com 28, cromo (Cr) em 30, e cádmio (Cd), igualmente em 30 publicações. Os metais mais recorrentes que foram mencionados mais de 30 vezes foram, em ordem decrescente: cobre (Cu) analisado em 41 estudos; chumbo (Pb) em 40, zinco (Zn) em 38, ferro (Fe), em 33, e manganês (Mn) em 32. A predominância desses elementos nas publicações analisadas reforça sua relevância na avaliação da contaminação ambiental, especialmente em regiões sob constante atividade antrópica com potencial poluente e em ecossistemas sensíveis.

Figura 10: Os dez metais mais citados e analisados por estudos na Região Amazônica do período de 2014 a 2023.



Fonte: Autor, 2025.

Em relação às fontes de contaminação, a maioria das publicações apontou múltiplos fatores simultaneamente, com destaque para as atividades antrópicas como principal causa. Entre elas, sobressaem-se o lançamento de águas residuais sem tratamento, o crescimento urbano desordenado, a mineração em especial o garimpo de ouro, atividades portuárias e práticas agrícolas. Por outro lado, as fontes naturais foram associadas principalmente à litologia local, com ênfase no intemperismo de

rochas, que pode favorecer a liberação natural de metais, especialmente em áreas com ocorrência de depósitos minerais.

Entre os metais mais frequentemente analisados nos estudos incluídos nesta revisão, o cobre (Cu) se destacou com maior recorrência, presente em 41 artigos. A análise por matriz revelou que o Cu foi investigado em 18 estudos com solo, 15 com sedimentos e 11 com amostras de água. Essa distribuição sugere que o cobre tem sido amplamente estudado em diferentes compartimentos ambientais, refletindo sua relevância ecológica e toxicológica nos contextos investigados.

O chumbo (Pb) apareceu em 40 publicações, sendo também um dos metais mais analisados. A maior incidência ocorreu em amostras de solo (18), seguida por sedimentos (14) e água (11), o que demonstra uma atenção recorrente às suas possíveis fontes e impactos associados à contaminação terrestre e aquática. O zinco (Zn), identificado em 38 artigos, apresentou distribuição semelhante, com predominância de análises em solo (21), além de sedimentos (12) e água (9). Esse padrão pode refletir o comportamento geoquímico do metal, cuja retenção em solos é favorecida por processos de adsorção.

O ferro (Fe) foi reportado em 33 estudos, sendo analisado principalmente em solo (17) e água (11), além de sedimentos (9). O manganês (Mn), presente em 32 artigos, também foi mais determinado em solo (17), seguido por água (10) e sedimentos (7). Esses elementos, por serem essenciais e ao mesmo tempo potencialmente tóxicos em concentrações elevadas, despertam interesse tanto pelo risco à saúde humana quanto pelo papel que desempenham nos ciclos biogeoquímicos.

O cádmio (Cd), reconhecido por sua elevada toxicidade mesmo em baixas concentrações, foi analisado em 30 publicações, com ênfase em solo (13), sedimentos (10) e água (9). O cromo (Cr), com igual número de ocorrências, teve maior incidência em sedimentos (15), seguido por solo (12) e água (6), o que pode estar relacionado à sua origem industrial e à tendência de deposição em ambientes aquáticos. Já o níquel (Ni), presente em 28 estudos, foi igualmente investigado em solo (14) e sedimentos (12), com menor número de análises em água (4).

O mercúrio (Hg), notório por seus efeitos neurotóxicos e por processos de bioacumulação, foi identificado em 24 publicações, sendo mais frequentemente analisado em sedimentos (13) e solo (13), além de água (7). Por fim, o alumínio (Al)

apareceu em 21 estudos, com destaque para as análises em solo (9), água (7) e sedimentos (6). Embora não seja tradicionalmente incluído entre os metais pesados, sua presença em concentrações elevadas pode afetar negativamente a biota aquática e edáfica.

Conforme representado na **Figura 11**, observa-se que a maioria dos metais foi analisada principalmente em amostras de solo, com destaque para Cu, Pb e Zn. Os sedimentos também foram amplamente investigados, especialmente em relação ao Cr e Hg. Quanto às amostras de água, os metais mais frequentemente analisados foram Fe, Cu e Pb, evidenciando a atenção dada à contaminação hídrica por elementos potencialmente tóxicos. Essa distribuição reforça o interesse científico nos diferentes compartimentos ambientais, considerando a mobilidade e os impactos desses metais em contextos diversos.

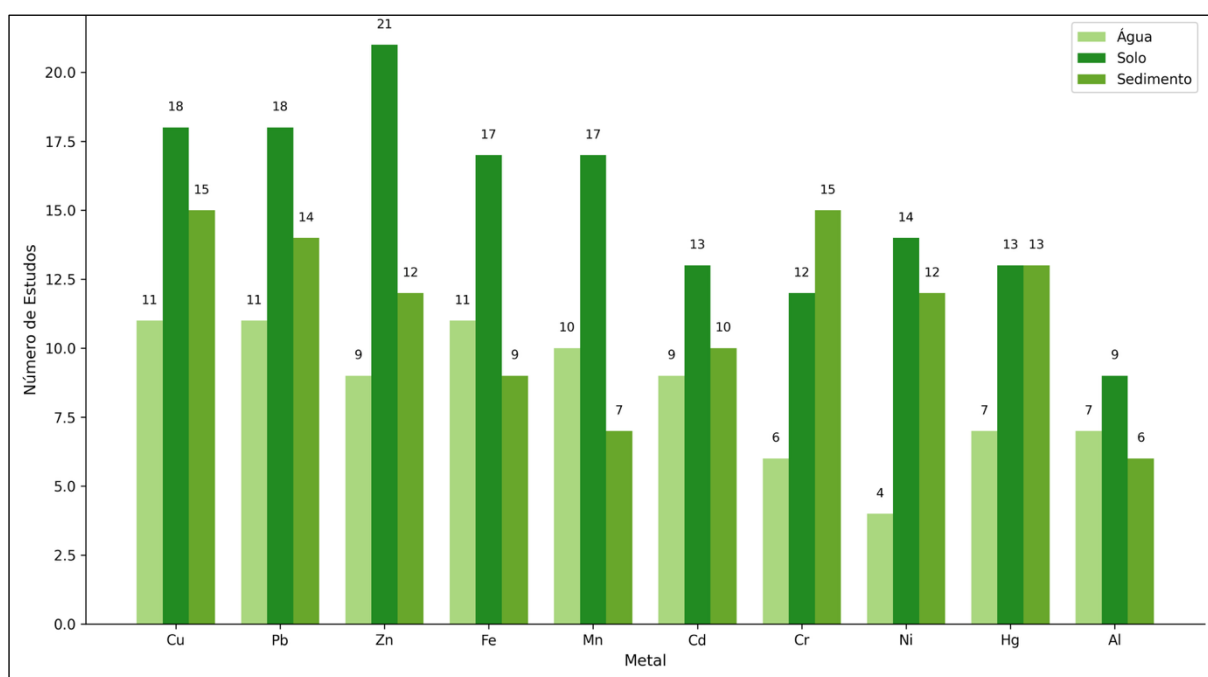


Figura 11: Quantidade de estudos por metal em água, solo e sedimento da Região Amazônica do período de 2014 a 2023.

Fonte: Autor, 2025.

As concentrações de metais detectadas nos solos da Região Amazônica revelaram ampla variabilidade, refletindo as diferentes pressões antrópicas e características geológicas locais. A comparação desses dados com os limites de referência da Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil) e com a *Canadian Soil Quality Guidelines* (CCME), que estabelecem limites diferenciados conforme o uso do solo, como agrícola, residencial, comercial e industrial, possibilitou identificar possíveis situações de contaminação ambiental. Os níveis de concentração foram definidos a

partir dos valores disponibilizados pelos artigos escolhidos para a revisão sistemática, foram obtidos os valores máximos e mínimos e adicionados a **Tabela 4**.

O cobre (Cu) foi determinado no solo em concentrações que variaram entre 1,09 µg/g na Província de San Martín e no Distrito de La Banda de Shilcayo, no Peru, e 726 µg/g na Província Mineral de Carajás, no Estado do Pará, Brasil. Esse valor máximo supera os limites estabelecidos tanto pela CONAMA 420/2009 (60 µg/g) quanto pelos padrões da CCME para todos os usos do solo, sugerindo contaminação expressiva potencialmente associada à atividade mineradora local. O chumbo (Pb) foi encontrado em concentrações entre 3,40 µg/g, na Província de Zamora-Chinchipe (Equador), e 523 µg/g na porção amazônica do estado do Mato Grosso no Brasil. O valor máximo ultrapassa significativamente o valor de prevenção da CONAMA 420/2009 (72 µg/g) e os limites canadenses para usos agrícola (70 µg/g), residencial (140 µg/g) e comercial (260 µg/g), sendo compatível apenas com uso industrial (600 µg/g), indicando elevado risco ambiental em áreas não industriais.

Para o zinco (Zn), as concentrações variaram de 1,47 µg/g em Paragominas no Pará, a 589 µg/g também em Zamora-Chinchipe no Equador. A concentração máxima excede os limites da CONAMA/420 (300 µg/g) e da CCME (250 µg/g), inclusive para uso industrial, o que acende um alerta sobre a possível presença de fontes pontuais de contaminação ou acúmulo natural com potencial impacto ambiental. O cádmio (Cd) foi detectado com concentrações que variaram entre 0,7 µg/g, registrado às margens da Rodovia Transamazônica também no Estado do Pará, e 10,1 µg/g na Província Mineral de Carajás. Ambas as concentrações excedem o limite da CONAMA 420/2009 (1,3 µg/g), e o valor máximo só é tolerado pela CCME para usos comercial e industrial (22 µg/g), apontando para riscos potenciais à saúde humana e ao solo, especialmente em áreas agrícolas.

As concentrações de mercúrio (Hg) variaram de 0,010 µg/g na região do Rio Tocantins (Brasil) até 19,4 µg/g em Taraira, na Colômbia. O valor mais elevado excede amplamente os limites da CONAMA 420/2009 (0,5 µg/g) e da CCME para usos agrícola (0,5 µg/g) e residencial (6,6 µg/g), sendo compatível apenas com uso industrial (33 µg/g). Dada a toxicidade do mercúrio, esse resultado é particularmente preocupante. Cromo (Cr) foi detectado com valores entre 8,2 µg/g no Estado do Mato Grosso, Brasil e 141 µg/g no Estado do Amazonas, ambos no Brasil. A concentração máxima ultrapassa os valores de prevenção da CONAMA 420/2009 (75 µg/g) e os

valores canadenses para todos os usos (87 µg/g), indicando necessidade de investigação sobre sua origem e dispersão. O níquel (Ni) foi detectado com concentrações que variaram de 1,4 µg/g no Estado do Pará a 36,7 µg/g na Província Mineral de Carajás, ambos no Brasil. Embora abaixo dos limites da CCME (50 µg/g para todos os usos), a concentração máxima ultrapassa o valor de prevenção da CONAMA 420/2009 (30 µg/g), sugerindo atenção especial em áreas residenciais e agrícolas.

Ferro (Fe), manganês (Mn) e alumínio (Al), cujas concentrações máximas foram respectivamente 143 µg/g (comunidades às margens do Rio Tapajós, Brasil), 3.400 µg/g (mesma localidade anteriormente citada), e 27,3 µg/g (Sub-bacia de Parauapebas, Pará, Brasil), não possuem limites de prevenção estabelecidos pela CONAMA 420/2009 e pelo CCME.

As análises dos solos na Região Amazônica indicam que as áreas mais impactadas por níveis elevados de metais são a Província Mineral de Carajás, no Pará, com concentrações expressivas de cobre, cádmio e níquel que ultrapassam os limites estabelecidos pela CONAMA 420/2009 e pelos padrões canadenses, a porção amazônica do Mato Grosso, onde o chumbo e o cromo apresentam valores muito acima dos níveis de prevenção, apontando risco ambiental significativo, e a Província de Zamora-Chinchipe, no Equador, que registra altas concentrações de chumbo e zinco. Também merece destaque a localidade de Taraira, na Colômbia, devido aos elevados níveis de mercúrio detectados. Essas regiões indicam forte influência antrópica, possivelmente associada a atividades mineradoras e outras fontes de contaminação, exigindo monitoramento e ações mitigadoras para proteger o solo e a saúde ambiental.

Tabela 4: Concentração de metais em solo da Região Amazônica publicada nos estudos do período de 2014 a 2023.

Metal	Local	Menor concentração (µg/g)	Maior concentração (µg/g)	Concentração na crosta terrestre
Cu	San Martín, Peru	1,09	-	2–50 ppm*
Cu	Carajás, Pará, Brasil	-	726	2–50 ppm*
Pb	Zamora-Chinchipe, Equador	3,40	-	10–50 ppm*
Pb	Mato Grosso, Brasil	-	523	10–50 ppm*
Zn	Paragominas, Pará, Brasil	1,47	-	20–200 ppm*
Zn	Zamora-Chinchipe, Equador	-	589	20–200 ppm*
Fe	Rio Parauapebas, PA	4,96	-	50.000 ppm**
Fe	Rio Tapajós, PA	-	143	50.000 ppm**
Mn	Mato Grosso, Brasil	4,3	-	950 ppm***
Mn	Rio Tapajós, PA	-	3400	950 ppm***
Cd	Transamazônica, PA	0,7	-	0,1–0,5 ppm*
Cd	Carajás, PA	-	10,1	0,1–0,5 ppm*
Cr	Mato Grosso, Brasil	8,2	-	92 ppm**
Cr	Amazonas, Brasil	-	141	92 ppm**
Ni	Pará, Brasil	1,4	-	47 ppm**
Ni	Carajás, PA	-	36,7	47 ppm**
Hg	Rio Tocantins, Brasil	0,010	-	50 ppm**

Hg	Taraira, Colômbia	-	19,4	50 ppm**
Al	Rio Parauapebas, PA	2,48	-	80.000 ppm***
Al	Sub-bacia de Parauapebas, PA	-	27,3	80.000 ppm***

Fontes: Elaborado pelo autor. ATSDR (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*) (*); Rudnick e Gao, 2003 (**); Taylor e McLennan, 1985 (***).

Dada a ausência de valores orientadores específicos para sedimentos em ambientes de água doce na legislação ambiental brasileira, optou-se por utilizar as diretrizes estabelecidas pelo *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME) como referência para a avaliação das concentrações de metais observadas neste estudo. Embora os valores ISQG (*Interim Sediment Quality Guideline*) e PEL (*Probable Effect Level*) tenham sido originalmente desenvolvidos com foco na proteção da biota aquática, seu uso é aceito na literatura científica como ferramenta de triagem para a identificação de possíveis áreas de contaminação em sedimentos, como em estudos feitos realizados por Cardoso Silva *et al.* (2024) e Acioly *et al.* (2024). Assim, tais valores foram empregados neste trabalho com o objetivo de fornecer um parâmetro comparativo internacionalmente reconhecido, permitindo avaliar o grau de alteração geoquímica nos sedimentos da Região Amazônica e identificar potenciais indícios de contaminação ambiental.

O cobre (Cu) apresentou a maior concentração de 141 µg/g nos sedimentos de fundo da Bacia do Rio Zamora, no Equador, ultrapassando o valor ISQG de 35,7 µg/g, mas ainda abaixo do PEL de 197 µg/g. Em contrapartida, a menor concentração foi registrada em Manaus (AM), Brasil, com 0,03 µg/g, indicando níveis bem abaixo do limite de preocupação ecológica.

Para o chumbo (Pb), os valores variaram de 0,48 µg/g (Manaus, AM) até 902 µg/g no Rio Zamora (Equador), este último excedendo expressivamente tanto o ISQG (35,0 µg/g) quanto o PEL (91,3 µg/g), o que sugere risco ecológico significativo. O zinco (Zn) também apresentou concentrações alarmantes no mesmo local, atingindo 3.067 µg/g, valor muito acima dos limites ISQG (123 µg/g) e PEL (315 µg/g). Em Manaus, o valor mínimo encontrado foi de 0,13 µg/g.

As concentrações de cádmio (Cd) oscilaram entre 0,02 µg/g (Manaus, AM) e 5,9 µg/g na região nordeste do Pará, sendo esta última acima tanto do ISQG (0,596 µg/g) quanto do PEL (3,53 µg/g). O cromo (Cr) apresentou um pico de 549 µg/g no Rio Candeias (RO), superando amplamente os limites do ISQG (37,3 µg/g) e PEL (90 µg/g), enquanto o menor valor foi de 0,460 µg/g em Manaus.

As concentrações de níquel (Ni) variaram entre 0,080 µg/g (Manaus, AM) e 44,9 µg/g (também em Manaus), no entanto, o CCME não definiu valores oficiais de ISQG e PEL para este elemento em sedimentos. As concentrações de mercúrio (Hg) estiveram entre 0,00003 µg/g (Praia de Goiabal, AP) e 18,6 µg/g (Rio Nangaritzza, Equador), sendo este valor máximo muito superior aos limites estabelecidos, tanto o ISQG (0,17 µg/g) quanto o PEL (0,486 µg/g), o que reforça o potencial de toxicidade ecológica associado ao metal.

Os elementos ferro (Fe), manganês (Mn) e alumínio (Al) não foram comparados diretamente aos valores ISQG/PEL do CCME, pois esses parâmetros não estão definidos para tais metais devido à sua elevada abundância natural e variabilidade geológica. Esses resultados indicam que, nas áreas da Bacia do Rio Zamora (Equador), nordeste do Pará e Manaus, há indícios de contaminação ambiental relevante, com concentrações de diversos metais ultrapassando os níveis de efeito limiar definidos por órgãos internacionais, o que sugere risco potencial à biota aquática e necessidade de monitoramento contínuo.

Tabela 5: Concentração de metais em sedimentos da Região Amazônica publicada nos estudos do período de 2014 a 2023.

Metal	Local	Matriz	Menor concentração (µg/g)	Maior concentração (µg/g)	Concentração na crosta terrestre*	Observações
Cu	Manaus, AM-Brasil	Sedimentos de superfície	0,03	-	2-50 ppm	
Cu	Bacia do Rio Zamora - Equador	Sedimentos de fundo	-	141	2-50 ppm	
Pb	Manaus, AM-Brasil	Manaus, AM- Brasil	0,480		10-50 ppm	
Pb	Bacia do Rio Zamora - Equador	Sedimentos de fundo		902	10-50 ppm	
Zn	Manaus, AM-Brasil	Sedimentos de superfície	0,13	-	20-200 ppm	

Zn	Bacia do Rio Zamora - Equador	Sedimentos de fundo	-	3.067	20-200 ppm	
Fe	Baía de São Marcos e Estuário do Rio Anil, Maranhão, Brasil	Sedimentos de superfície	1,07	-	50.000 ppm**	
Mn	Manaus, AM-Brasil	Sedimentos de superfície	0,15	-	950 ppm***	
Mn	Cantón Paquisha, Bacia do Rio Nangaritzá, Equador	Sedimentos de fundo	-	4.086	950 ppm***	
Cd	Manaus, Amazonas, Brasil	Sedimentos de superfície	0,02	-	0,1–0,5 ppm*	
Cd	Nordeste do estado do Pará, Brasil	Sedimentos de superfície	-	5,9	0,1–0,5 ppm*	
Cr	Manaus, AM-Brasil	Sedimentos de superfície	0,460	-	92 ppm**	
Cr	Rio Candeias - RO, Brasil	Sedimentos de fundo	-	549	92 ppm**	Valor detectado durante estação seca
Ni	Manaus, AM-Brasil	Sedimentos de superfície	0,080	--	47 ppm**	
Ni	Manaus, AM-Brasil	Sedimentos de superfície	-	44,9	47 ppm**	
Hg	Praia de Goiabal, Amapá, Brasil	Sedimentos de superfície	0,00003	-	50 ppm**	
Hg	Cantón Paquisha, Bacia do Rio Nangaritzá, Equador	Sedimentos de fundo	-	18,6	50 ppb**	
Al	Bacia do Rio Parauapebas, PA- Brasil	Sedimentos de fundo	1,14	-	80,000 ppm***	

Fonte: Elaborado pelo autor. ATSDR (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*) (*); Rudnick e Gao, 2003 (**); Taylor e McLennan, 1985 (***).

As concentrações de metais encontradas nas amostras de água analisadas pelos artigos utilizados na revisão sistemática (Tabela 5), foram comparadas com os valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, nº CONAMA 396/2008 (BRASIL, 2005; BRASIL, 2008) e pelas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022) para água potável. Os resultados evidenciam que, em

diversos pontos amostrados, os níveis de contaminação excedem os limites recomendados por essas normas, indicando potenciais riscos ambientais e à saúde humana.

A concentração de cobre (Cu) variou de 0,580 a 103 µg/L em águas superficiais da comunidade Igarapé-Açu (PA). Embora o valor máximo esteja abaixo do limite estipulado pela OMS/2022 (2.000 µg/L), ele excede significativamente o limite da CONAMA/357/396, que é de apenas 9 µg/L, configurando, portanto, um quadro de contaminação segundo à legislação nacional.

No caso do chumbo (Pb), os resultados são ainda mais preocupantes. Foram registradas concentrações que chegaram a 2.002 µg/L em águas subterrâneas no município de Marituba (PA), valor que ultrapassa em mais de 200 vezes os limites estabelecidos para água potável tanto pela CONAMA/357 como pela OMS/2022, ambos fixados em 10 µg/L. Essa magnitude de contaminação reforça a gravidade da presença desse metal, conhecido por seus efeitos neurotóxicos mesmo em baixas concentrações. Para o zinco (Zn), as concentrações variaram de 0,200 a 4.800 µg/L, também em Igarapé-Açu. O valor máximo supera o limite da CONAMA 357/2005 (180 µg/L), embora o zinco seja um metal essencial em pequenas quantidades. A presença em níveis elevados, no entanto, pode comprometer a qualidade da água e causar impactos ecotoxicológicos.

O ferro (Fe) apresentou uma máxima concentração de 408 µg/L, também acima do limite de 300 µg/L estabelecido pela CONAMA 357/2005. Já o manganês (Mn) atingiu 980 µg/L no Igarapé do Irurá, valor que ultrapassa tanto o limite nacional (100 µg/L) quanto o internacional (400 µg/L), sugerindo acúmulo expressivo desse elemento na matriz aquática. O cádmio (Cd), altamente tóxico mesmo em baixas concentrações, apresentou o valor de 0,358 µg/L em Igarapé-Açu, está abaixo do limite máximo permitido pelo CONAMA 357/2005 (1 µg/L).

A concentração de 0,816 µg/L de cromo (Cr) está dentro dos limites permitidos pela legislação ambiental brasileira (CONAMA 357/2005) que estipula para cromo total o limite máximo de 50 µg/L. Isso indica que a amostra analisada não apresenta risco de contaminação acima dos padrões estabelecidos para corpos hídricos ou consumo humano (segundo a Portaria MS 888/2021). Para o níquel (Ni), a concentração máxima observada foi de 183 µg/L no Rio Mocajuba (PA), ultrapassando os limites da CONAMA/357/2005 (25 µg/L) e da OMS/2022 (70 µg/L). A variabilidade

elevada nesse ponto sugere influência de fontes pontuais de poluição ou variações ambientais locais.

Com relação ao mercúrio (Hg), um dos metais mais tóxicos, o valor mais elevado foi registrado em Tarapacá, Colômbia (100 µg/L), superando em muito os limites de 0,5 µg/L (CONAMA 357/2005) e 1 µg/L (OMS/2022). Já no Rio Madeira, a concentração foi de apenas 0,0026 µg/L, considerada segura. O alumínio (Al) foi detectado em concentração de até 5,74 µg/L na Comunidade Iracema (PA), valor que está abaixo do limite máximo de 100 µg/L estabelecido pela CONAMA 357/2005. Embora a OMS não tenha definido um limite específico para alumínio em água potável, esse resultado indica que, apesar da presença do metal, não há indícios de contaminação preocupante para a qualidade da água nessa localidade.

As análises das concentrações de metais em águas superficiais e subterrâneas indicam que as áreas mais impactadas na Região Amazônica são as comunidades de Igarapé-Açu e Marituba, no Pará, onde foram detectados níveis alarmantes de cobre, chumbo e zinco que ultrapassam amplamente os limites estabelecidos pela legislação ambiental nacional e internacional. Destaca-se também o Rio Mocajuba (PA), com altas concentrações de níquel, e a região de Tarapacá, na Colômbia, que apresentou concentrações críticas de mercúrio. Esses resultados evidenciam a presença de fontes pontuais de contaminação que comprometem a qualidade da água e representam riscos significativos para a saúde humana e os ecossistemas locais.

Tabela 6: Concentração de metais em água superficial e subterrânea da Região Amazônica publicados nos estudos do período de 2014 a 2023.

Metal	Local	Menor concentração (µg/L)	Maior concentração (µg/L)	Valor de referência	Observações
Cu	Igarapé-Açu, PA-Brasil	0,58	103	0,009 mg/L *	-
Pb	Marituba, PA-Brasil	0,3	2.002	10 µg L ⁻¹ **	Média com alta variabilidade (±2041 µg/L; máximo = 4043 µg/L)
Zn	Igarapé-Açu, PA-Brasil	0,20	4.800	0,18 mg/L *	Média com baixa variabilidade (±35.4 µg/L; intervalo: 4764.6–4835.4 µg/L)
Fe	Igarapé-Açu, PA-Brasil	-	408	0,3 mg/L *	
Fe	Igarapé do Irurá, Santarém-PA	0	-	0,3 mg/L *	
Mn	Rio Xingú, PA-Brasil	0,67	-	0,1 mg/L *	

Mn	Igarapé do Irurá, Santarém-PA	-	980	0,1 mg/L *	
Cd	Rio Pará, PA-Brasil	0,13	-	0,001 mg/L *	
Cd	Igarapé-Açu, PA-Brasil	-	0,358	0,001 mg/L *	
Cr	Rio Candeias, RO-Brasil	0,05	-	0,05 mg/L *	
Cr	Igarapé-Açu, PA-Brasil	-	0,816	0,05 mg/L *	
Ni	Rio Pará, PA-Brasil	1*	-	0,025 mg/L *	Baixa variabilidade. Resultados consistentes e homogêneos.
Ni	Rio Mocajuba, PA-Brasil	-	183	0,025 mg/L *	Alta variabilidade. Indica dispersão acentuada entre os dados, possivelmente causada por fontes pontuais de contaminação ou influência de diferentes condições ambientais.
Hg	Bacia do Rio Madeira, Amazônia Ocidental	0,0026	-	0,0002 mg/L*	
Hg	Tarapacá, Colômbia	-	100,00	0,0002 mg/L*	O valor com desvio padrão igual a $\pm 0,00$ indica ausência de variabilidade na amostragem, podendo representar uma única medição ou valores idênticos em todas as réplicas
Al	Igarapé do Irurá, Santarém-PA	10	-	0,1 mg/L*	
Al	Comunidade Iracema, PA-Brasil	-	5,74	0,1 mg/L*	

Fonte: Elaborado pelo autor: CONAMA 357/2005; (*): CONAMA 396/2008(**).

6. DISCUSSÃO

Nas últimas quatro décadas, entre 1984 e 2023, por meio da análise bibliométrica do acervo *Scopus*, foi possível observar o aumento substancial no número de artigos publicados acerca de metais na Região Amazônica, visando compreender e determinar as concentrações em diferentes matrizes ambientais. Ao todo foram analisados 511 artigos, sendo que o primeiro trabalho foi publicado no ano

de 1984 com objetivo de estudar sobre concentrações de metais em plantas no sudoeste da Amazônia venezuelana (MONTANIGNI *et al.*, 1984). Na última década (de 2014 a 2023) houve um crescimento acentuado no número de artigos publicados, com destaque para o ano de 2020, o ano com o maior número de publicações. A aplicação da Lei de Price (PRICE, 1986) como indicador de produtividade científica revelou um crescimento exponencial de publicações sobre metais na Amazônia. Quanto ao Índice de Price (1965), um percentual aproximado de 50% indica que um campo de pesquisa atingiu maturidade científica. Neste estudo, o percentual obtido foi de 45,9%, demonstrando que o tema ainda está em expansão, mas próximo de atingir uma fase consolidada. Um padrão também observado em estudos sobre contaminação por metais em águas costeiras (VEIGA-DEL-BAÑO *et al.*, 2023) e sedimentos (SILVA *et al.*, 2024). Adicionalmente, o aumento de citações reforça o impacto crescente dessas pesquisas (LIU *et al.*, 2022). Utilizando-se a Lei de Price como um indicador determinístico de produtividade, de um domínio específico de investigação (PRICE, 1986), foi possível observar um crescimento exponencial de publicações para essa temática, a partir do ano de 2011.

Apesar das vantagens da análise bibliométrica, este método tem limitações específicas. Primeiramente, a escolha da base de dados *Scopus*, ainda que esta seja reconhecida por sua abrangência, excluiu outras fontes potencialmente relevantes, o que pode ter restringido a compreensão integral do tema (ANDREO-MARTÍNEZ *et al.*, 2020; BAAS *et al.*, 2020). Em segundo lugar, o uso de operadores booleanos, embora eficazes para refinar buscas, depende criticamente da seleção inicial de termos, o que pode enviesar os resultados (CHEN *et al.*, 2022). Por fim, a padronização manual dos dados introduz riscos de viés (LÓPEZ-MUÑOZ *et al.*, 2017). Embora essas limitações possam ter subestimado o crescimento real do campo, os resultados obtidos ainda oferecem *insights* valiosos para a comunidade científica.

Estudos prévios empregaram modelagens matemáticas para projeção de tendências de publicações científicas, destacando-se a utilização de modelos polinomiais de terceira ordem, tais como os trabalhos de Andreo-Martínez *et al.*, 2020 e Veiga-Del-Baño *et al.*, 2023. No presente trabalho, tal modelo demonstrou elevado poder explicativo, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9989, indicando capacidade de explicar 99,89% da variância dos dados. Esses resultados apresentam consonância tanto com os postulados da Lei de Price quanto com os valores do Índice

de Price, além de corroborar os achados de Silva *et al.* (2024) em estudos sobre contaminação por metais em sedimentos costeiros. Tal convergência de evidências ressalta a crescente relevância desta temática no cenário científico global para as próximas décadas.

Na análise da produção científica sobre metais na Região Amazônica, Brasil, Estados Unidos e Canadá emergem como os três países mais produtivos em termos de publicações. A presença do Brasil nesse grupo é especialmente relevante, considerando-se que se trata de um país em desenvolvimento, enquanto os demais são nações desenvolvidas com tradição consolidada em pesquisa científica. Além disso, o Brasil abriga 49,5% do bioma amazônico em seu território e representa a maior economia da América do Sul (FAJARDO, 2021; SILVA *et al.*, 2024), o que contribui para justificar sua expressiva participação na produção acadêmica sobre o tema. Esse resultado reflete também o crescente envolvimento internacional com a Região Amazônica, especialmente a partir da década de 1990, impulsionado por preocupações ambientais globais e pelos impactos das mudanças climáticas (HOMMA *et al.*, 2020).

Entre os países mais produtivos, os Estados Unidos se destacam como polo de excelência científica, com forte atuação na pesquisa sobre os riscos associados à contaminação por metais, evidenciada por contribuições consistentes ao longo das últimas três décadas (ANDREO-MARTÍNEZ *et al.*, 2020; HAN *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2022). O Canadá, por sua vez, tem atuado de forma significativa em projetos de cooperação internacional voltados à contaminação por mercúrio, como no estudo desenvolvido na região do Tapajós em parceria com instituições brasileiras e comunidades tradicionais, com apoio do *International Development Research Centre* (IDRC) (IDRC, 2021). Já o Brasil, único país amazônico entre os três mais produtivos, tem ampliado sua produção científica na área, com destaque para avaliações de risco ecológico em águas, sedimentos e solo contaminados por metais, especialmente em áreas impactadas por mineração (GALVÃO *et al.*, 2018; VILHENA *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2022), além de estudos voltados aos impactos sobre populações indígenas afetadas pela poluição por mercúrio (VALDELAMAR-VILLEGAS e OLIVERO-VERBEL, 2020).

Dentre as 160 instituições de ensino superior analisadas neste estudo, a Universidade Federal do Pará (UFPA) destacou-se como a mais produtiva, com 71

publicações registradas. Esse desempenho era previsível, considerando-se o papel central da UFPA no desenvolvimento de pesquisas sobre a Região Amazônica, além de apresentar diversos estudos sobre metais na região conduzidos por grupos de pesquisa vinculados à instituição (ROULET *et al.*, 2000; GUIMARÃES, 2020; LIMA *et al.*, 2023). Em segundo e terceiro lugares, respectivamente, figuram a Universidade de São Paulo (USP) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A elevada produção científica dessas instituições pode ser associada à sua posição de destaque no cenário acadêmico nacional, conforme atestado pelo *Center for World University Rankings* (CWUR, 2023). Particularmente no caso da USP, sua longa tradição em pesquisas amazônicas foi recentemente reforçada com a criação do Centro de Estudos da Amazônia Sustentável (NEGRI, 2024).

As Ciências Ambientais se destacaram como a área com maior número de publicações sobre estudos de metais na Amazônia, refletindo seu caráter multidisciplinar e a consequente tendência de concentração dos estudos em periódicos dessa área (SILVA *et al.*, 2024a). Diante das transformações ambientais em escala global, que impõem desafios crescentes tanto para os ecossistemas quanto para as sociedades humanas, torna-se cada vez mais evidente a necessidade de abordagens interdisciplinares para enfrentar essas problemáticas (HICKS *et al.*, 2010).

Dentre os periódicos com maior produção científica sobre o tema, a *Science of the Total Environment* destaca-se como o mais relevante. Essa predominância corrobora achados de estudos bibliométricos anteriores sobre publicações relacionadas a metais, como os de HAN *et al.* (2020) e XIAO *et al.* (2021). Em segundo lugar no *ranking*, situa-se *Chemosphere*, cuja relevância para a área também foi atestada em outras investigações sobre metais no meio ambiente (IRFAN *et al.*, 2021; NOFRIANDI *et al.*, 2024). O elevado fator de impacto desses periódicos (8.2 e 9.6, respectivamente) contribui para sua visibilidade internacional, favorecendo a captação de recursos financeiros, e o estabelecimento de parcerias estratégicas e de desenvolvimento para colaborações técnicas essenciais para o progresso científico (BASTI *et al.*, 2024).

A avaliação dos padrões de autoria e coautoria constitui uma ferramenta valiosa para investigar a concentração de produção científica em estudos sobre metais, permitindo identificar se há dominância por um grupo restrito de pesquisadores

(MOURÃO e MARTINHO, 2020). Neste estudo, a análise revelou como autores mais produtivos Fernandes, A.R., Bastos, W.R., Mergler, D., Lucotte, M. e Ramos, S.J. Contudo, observa-se que nenhum destes pesquisadores figura entre os dez artigos mais citados da amostra. Entretanto, as colaborações envolvendo esses autores têm gerado contribuições significativas em diversas linhas de pesquisa, incluindo: mineração artesanal de ouro e contaminação por mercúrio (TEIXEIRA *et al.*, 2021), dinâmica de distribuição de mercúrio (ROULET *et al.*, 1998), processos de biomagnificação (AZEVEDO *et al.*, 2021), redução da exposição ao mercúrio mediante consumo de frutas tropicais (PASSOS *et al.*, 2003), impactos ambientais de rejeitos da mineração de cobre (COVRE *et al.*, 2022), e alterações nas propriedades do solo decorrentes da mineração de ouro (RAMOS *et al.*, 2022).

Embora a análise bibliométrica tenha permitido mapear a evolução temporal, distribuição geográfica e redes de colaboração nos estudos sobre metais na Amazônia, uma abordagem sistemática do conteúdo dessas publicações revela padrões ainda mais significativos sobre os contaminantes em questão. Passando da dimensão quantitativa para a qualitativa, a revisão sistemática dos artigos destacou, entre os 58 elementos mais citados/analizados, os 10 metais mais frequentemente estudados, cujos impactos ambientais e à saúde humana serão detalhados a seguir.

O cobre (Cu) emergiu como o mais investigado, refletindo uma preocupação crescente com a contaminação por efluentes domésticos e industriais não tratados, dado seu reconhecido papel como traçador de poluição por esgotos (COSTA *et al.*, 2022). Essa tendência é corroborada por estudos que detectaram concentrações elevadas de Cu em ambientes antropizados (CARRILLO *et al.*, 2021), com destaque para sua dinâmica em corpos hídricos, onde a adsorção em partículas em suspensão potencializa sua dispersão (CARVALHO *et al.*, 2018). Adicionalmente, pesquisas como as de DAL PONT *et al.* (2016) e FREITAS *et al.* (2019) evidenciam a relação direta entre a presença de Cu e a falta de infraestrutura de saneamento, reforçando sua relevância como indicador de degradação ambiental na Região Amazônica.

Do ponto de vista econômico, o Cu se destaca como um dos metais mais estratégicos globalmente, sendo essencial para diversos setores industriais. O Brasil posiciona-se entre os maiores produtores mundiais, com aproximadamente 85% de suas reservas concentradas no estado do Pará, particularmente na Província Mineral de Carajás (PMC), onde ocorrem expressivos depósitos de óxidos de ferro-cobre-ouro

(Fe-Cu-Au) (RZYMSKI *et al.*, 2017; CRAVEIRO *et al.*, 2019). Entretanto, a extração desse recurso, quando realizada de forma artesanal e sem controle técnico adequado, representa riscos significativos tanto para a saúde humana quanto para os ecossistemas locais (COVRE *et al.*, 2022).

Dois aspectos paradoxais caracterizam o Cu: (I) sua importância biológica, atuando na síntese de hemoglobina e como cofator enzimático quando em concentrações adequadas e (II) sua toxicidade em níveis elevados, causando distúrbios gastrointestinais (náusea, vômito, dor abdominal) e impactos ambientais cumulativos (BARCELOS, 2008; SINGH *et al.*, 2011; AL-FARTUSIE e MOHSSAN, 2017). Essa dualidade ressalta a necessidade de equilíbrio entre exploração econômica e gestão ambiental, particularmente em regiões de intensa atividade mineradora como a Amazônia.

O zinco (Zn) e o chumbo (Pb) também se destacaram entre os metais mais estudados. O Zn ocorre naturalmente na crosta terrestre, frequentemente associado a sedimentos orgânicos e lamas (ANBUSELVAN e SRIDHARAN, 2018), tendo recebido destaque em diversos estudos na Amazônia nos últimos anos, por exemplo, ESPINOZA GUILLEN *et al.* (2022) e BARROS *et al.* (2023). Embora essencial como micronutriente, participando de processos fisiológicos cruciais (SCHOOFS *et al.*, 2024), em concentrações elevadas torna-se nocivo, provocando distúrbios cardiovasculares e neurotoxicidade em humanos (CUI *et al.*, 2021; KARIKARI *et al.*, 2020), além de impactos ecológicos. Sua principal fonte antrópica na região está vinculada à agroindústria, especialmente pelo uso de fertilizantes e defensivos agrícolas (SHAH *et al.*, 2021; YADAV *et al.*, 2024).

Em contraste, o chumbo (Pb) é majoritariamente associado a atividades industriais, metalúrgicas e de mineração (MELO *et al.*, 2012). Na Amazônia, suas altas concentrações são frequentemente relacionadas a efluentes mineradores (MORA *et al.*, 2019), sendo classificado como um metal altamente tóxico, não biodegradável e sem função biológica conhecida (MOUSAVI *et al.*, 2022). Sua dinâmica ambiental é fortemente influenciada por fatores físico-químicos e biogeoquímicos, que regulam sua biodisponibilidade, mobilidade e especiação (PUNAMIYA *et al.*, 2010).

O ferro (Fe) e o manganês (Mn), embora amplamente estudados, diferenciam-se dos demais metais por seu baixo risco ecológico. Presentes naturalmente na crosta terrestre, atuam como agentes complexantes de outros metais (ZHUANG e ZHOU,

2021). Ambos são essenciais à saúde humana, com papel documentado no sistema imunológico e na função hepática e renal (FRYDRYCH *et al.*, 2023). O ferro (Fe), quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, desempenha funções críticas nos ciclos geoquímicos e está presente até em partículas atmosféricas (FREY e REED, 2012; WANG *et al.*, 2022). Essencial em sistemas biológicos, participa de processos como respiração celular e fixação de nutrientes (KAPPLER e STRAUB, 2005). Economicamente relevante, suas reservas na Amazônia concentram-se principalmente no Pará, onde estudos têm investigado sua distribuição em solos, águas e sedimentos, com fontes tanto naturais quanto antrópicas (SALOMÃO *et al.*, 2021; RAMOS *et al.*, 2022; SILVA-JÚNIOR *et al.*, 2023). O manganês (Mn), amplamente distribuído na natureza, ocorre em rochas, solos, corpos hídricos e alimentos (AVILA *et al.*, 2013; STUDER *et al.*, 2022). Durante o intemperismo, sofre transformações químicas, formando compostos como hidróxidos antes de se depositar em sedimentos (BHUYAN *et al.*, 2023).

O cádmio (Cd) destaca-se como um dos metais mais tóxicos, com elevado potencial de bioacumulação em organismos e ecossistemas, ocupando o terceiro lugar entre os contaminantes de maior risco ambiental e à saúde (ISMAEL *et al.*, 2019; GENCHI *et al.*, 2020; GRAÇAS-TELES, 2021). Sua presença no ambiente deriva tanto de fontes antrópicas (agropecuária, indústria e mineração) quanto naturais (vulcanismo e erosão) (CASADO, 2008). Na Amazônia, estudos como o de CHAMBAERAS *et al.* (2023) relacionam o aumento das concentrações de Cd em solos equatorianos a resíduos da mineração. Do ponto de vista toxicológico, sua exposição crônica está associada ao desenvolvimento de neoplasias mamárias, pulmonares e renais (GENCHI *et al.*, 2020). Em contraste, o níquel (Ni) ocorre em baixas concentrações ambientais, predominantemente na forma de óxidos e sulfetos associados a depósitos vulcânicos e meteoritos (DAS *et al.*, 2019).

O Cr é caracterizado como um metal tóxico, mutagênico e cancerígeno, é um elemento que pode impactar a saúde e o meio ambiente, dependendo da concentração e da forma como está disponível (COETZEE *et al.*, 2018; MININEL *et al.*, 2024). O Cr é comumente empregado em diversos setores industriais, destacando-se na fabricação de aços inoxidáveis e outras ligas metálicas, especialmente na indústria siderúrgica, além disso, possui ampla aplicação nos processos de curtimento e tratamento de couros (MININEL *et al.*, 2024). Entre os

artigos analisados para essa revisão, alguns trabalhos relacionaram o aumento de concentrações desse elemento na água e nos sedimentos de fundo do rio Candeias, no estado de Rondônia, cuja principal fonte advém de uma empresa de curtume que despeja seus efluentes nesse rio, como demonstrado por Souza *et al.* (2016). Foram também atribuídas fontes naturais, como por exemplo no estudo feito em solos da região de Carajás, que comprovou que o Cr nessa região ocorre de forma natural sendo atribuído a formações geológicas ricas em depósitos ferruginosos e minerais associados (LIMA *et al.*, 2020).

O mercúrio (Hg), naturalmente presente na crosta terrestre e na atmosfera, destaca-se pela sua toxicidade em duas formas principais: inorgânica e orgânica (metilmercúrio) (BARP, 2022; MEDEIROS *et al.*, 2022). Este elemento pode ser liberado no meio ambiente por meio de erupções vulcânicas, intemperismo de rochas e por atividades antrópicas (MEDEIROS *et al.*, 2022). O metilmercúrio é perigoso e pode ocasionar sérios danos neurológicos, cardiovasculares, e reprodutivos em animais e em seres humanos (SILVA *et al.*, 2024d). É um elemento muito utilizado no processo de amalgamação de ouro o que vem levantando debates nos últimos anos, tendo em vista que a Região Amazônica é uma das áreas mais afetadas pelo uso e contaminação por esse metal. Assim, muitos trabalhos sobre metais pesados na Amazônia tendem a focar mais sobre esse elemento, com ênfase principalmente nos processos de bioacumulação e biomagnificação, como o de SANTOS *et al.* (2017). Em muitos trabalhos avaliados nessa revisão o Hg foi encontrado em forma de mercúrio total (THg) e metilmercúrio (MeHg), alguns associando a concentração de mercúrio também a fonte natural, como SAHOO *et al.* 2019, que fizeram análise em solos da sub-bacia do rio Parauapebas (sudeste do Estado do Pará, Brasil) constatando que a distribuição do Hg nessa região é de origem natural com pouca ou nenhuma influência antrópica.

O Al é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre além de ser o segundo metal mais importante para a indústria, é considerado um metal leve e com excelente condutividade térmica e elétrica (KEITH *et al.*, 2008; FONSECA *et al.*, 2020; RAHMAN e UPADHYAYA, 2021). Embora suas concentrações naturais, derivadas de intemperismo e vulcanismo, sejam geralmente não tóxicas (MOLD *et al.*, 2019), atividades como mineração podem potencializar seus impactos em ecossistemas aquáticos e terrestres (RAHMAN e UPADHYAYA, 2021). Apesar de ter sido o menos

estudado entre os dez metais destacados para este trabalho, sua relevância econômica para países amazônicos, como Brasil, Guiana e Suriname, justifica pesquisas adicionais sobre sua dinâmica ambiental na região.

A revisão sistemática evidenciou o Brasil, particularmente o Estado do Pará, como o principal produtor de estudos sobre metais em matrizes ambientais (sedimentos, solos e água) na Amazônia. Essa predominância pode ser atribuída a dois fatores: (I) a presença de instituições de pesquisa de excelência, como a UFPA (NEGRI, 2024) e (II) a intensa atividade minerária no estado, voltada para a extração de Al, Cu, Fe, Mn e Au (VIANA *et al.*, 2024). Essa convergência entre potencial científico e recursos naturais explica a concentração de pesquisas em áreas como Serra Pelada e Carajás (TEIXEIRA *et al.*, 2019; SILVA-JÚNIOR *et al.*, 2023).

Entre as matrizes ambientais mais analisadas, estudos relacionados aos solos se destacaram no primeiro lugar, tendo em vista que os solos da Amazônia apresentam uma grande diversidade geoquímica, o que reflete os diferentes processos de formação do solo dessa região (NASCIMENTO *et al.*, 2018a). Quanto aos metais presentes nessa matriz podem ter fontes naturais, relacionado ao intemperismo e processos pedogênicos, que incluem a dissolução de rochas, e fontes antrópicas que estão relacionadas a indústria, mineração, urbanização, uso de fertilizantes e agroquímicos, entre outros (NOGUEIRA *et al.*, 2018; CACHADA *et al.*, 2018; QIN *et al.*, 2021). Os solos amazônicos, caracterizados por sua diversidade geoquímica (NASCIMENTO *et al.*, 2018a), representam a segunda matriz mais investigada. A presença de metais nessa matriz deriva tanto de processos naturais (intemperismo, pedogênese) quanto de atividades humanas, como mineração, urbanização e agricultura (NOGUEIRA *et al.*, 2018; CACHADA *et al.*, 2018; QIN *et al.*, 2021).

Os estudos com sedimentos se destacam como a segunda principal forma de meio amostral. Alguns fatores, como a acumulação e armazenamento de metais, podem justificar a predominância dessa matriz como principal matriz, pois as concentrações presentes nesse meio os tornam bons indicadores de poluição ambiental atual ou pretérita (FÖRSTNER e WITTMANN, 1981; CARVALHO *et al.*, 2018). Estudos com sedimentos também são importantes, pois são fundamentais para avaliar riscos ecológicos e possíveis fontes poluidoras, possibilitando que medidas de remediação e monitoramento de efeitos causados por ações antrópicas sejam

realizadas (ANDRADE *et al.*, 2018; VILHENA *et al.*, 2021).

A água, destacada como recurso essencial para subsistência, segurança alimentar e manutenção de modos de vida tradicionais das populações amazônicas (MOQUET *et al.*, 2014), foi o terceiro meio amostral mais utilizado nos trabalhos. A contaminação por metais nessa matriz representa riscos diretos à saúde humana via bioacumulação na cadeia alimentar (KOBIELSKA *et al.*, 2017), agravados pela dinâmica hidrológica regional, que transporta contaminantes por longas distâncias. Sua composição é modulada por fatores geológicos, biogeoquímicos (adsorção a sedimentos, pH, potencial redox) e climáticos (BRADL, 2005). Estudos recentes têm adotado abordagens integradas, combinando múltiplas matrizes (LIMA *et al.*, 2021; SALOMÃO *et al.*, 2021; SOUSA *et al.*, 2016).

A crescente ameaça à biodiversidade amazônica, impulsionada por poluição de metais, garimpo e industrialização (GOMES *et al.*, 2023), tem direcionado pesquisas sobre seus impactos em espécies, como quelônios (TARGINO *et al.*, 2018), peixes (VIEIRA *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2022) e fitoplânctons (NASCIMENTO *et al.*, 2019b). O risco à saúde humana é particularmente crítico, dado o consumo de pescado na região, que é oito vezes superior à média global, e a frequente detecção de metais acima dos limites legais para consumo (FAO *et al.*, 2014; ISAAC e FERRARI, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2023). O mercúrio (Hg), especialmente na forma de metilmercúrio, merece atenção prioritária devido à sua biomagnificação e efeitos neurotóxicos comprovados (RODRIGUES *et al.*, 2022; MUSSY *et al.*, 2023).

Os resultados da revisão sistemática evidenciam que monitorar a contaminação por metais na Amazônia é um desafio multifacetado, influenciado por atividades antrópicas (mineração, agropecuária, urbanização) e processos naturais. Entre os elementos analisados, Hg, Cu e Cd destacam-se pelos seus efeitos ecotoxicológicos e riscos à saúde humana, principalmente devido à biomagnificação na cadeia alimentar, problema agravado pelo alto consumo de pescado na região. A predominância de estudos no Pará reflete tanto a intensa pressão ambiental local quanto a maior capacidade institucional para pesquisa científica. No entanto, persistem lacunas críticas, como a escassez de dados sobre a especiação de elementos emergentes e seus efeitos crônicos em populações tradicionais, além da carência de informações em outros países da bacia amazônica. Para mitigar esses impactos, recomenda-se: (I) a implementação de programas de monitoramento

integrado abrangendo sedimentos, solo e água, e (II) políticas públicas que equilibrem desenvolvimento econômico e conservação ambiental, com ênfase no combate ao garimpo ilegal e na gestão sustentável dos recursos naturais. Tais medidas são urgentes para preservar a biodiversidade amazônica e a saúde das populações que dependem diretamente desses ecossistemas (BARBIERI, 2020; COUTO, 2020).

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou uma análise bibliométrica e uma revisão sistemática abrangente sobre os estudos de metais na Amazônia entre 1984 e 2023, publicados no acervo *Scopus*, revelando padrões de crescimento exponencial na produção científica, alinhados à Lei de Price. Os resultados demonstraram que o tema está em expansão, com projeções robustas indicando um aumento significativo de publicações nas próximas décadas. O Brasil, seguido pelos Estados Unidos e Canadá destacaram-se como principais produtores de conhecimento, refletindo tanto a relevância local da Amazônia quanto o engajamento internacional em questões ambientais globais.

Entre os metais mais estudados, cobre (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb) emergiram como os três principais, frequentemente associados a fontes antrópicas como mineração, agricultura e urbanização. Os níveis de concentração desses metais nas matrizes ambientais revelaram situações críticas:

Solo: as concentrações de Cu na Província Mineral de Carajás (PA), atingiu até 726 µg/g na superando em 12 vezes o limite da CONAMA 420/2009 (60 µg/g). O Pb registrou 523 µg/g no Mato Grosso, excedendo os padrões para uso agrícola e residencial. Para o zinco (Zn), as concentrações variaram de 1,47 µg/g em Paragominas no Pará, a 589 µg/g também em Zamora-Chinchipe no Equador. A concentração máxima excede os limites da CONAMA/420 (300 µg/g) e da CCME (250 µg/g).

Sedimentos: as concentrações de Cu apresentaram a maior concentração de 141 µg/g nos sedimentos de fundo da Bacia do Rio Zamora, no Equador, ultrapassando o valor ISQG de 35,7 µg/g, mas ainda abaixo do PEL de 197 µg/g. O Pb atingiu 902 µg/g e o Zn 3.067 µg/g na Bacia do Rio Zamora (Equador), superando amplamente os limites do CCME (ISQG/PEL).

Água: as concentrações de Cu variaram de 0,580 a 103 µg/L em águas superficiais da comunidade Igarapé-Açu (PA). Embora o valor máximo esteja abaixo do limite estipulado pela OMS/2022 (2000 µg/L), ele excede significativamente o limite da CONAMA/357/396 (9 µg/L). O Pb em águas subterrâneas no Pará alcançou 2.002 µg/L, ultrapassando em 200 vezes os limites da CONAMA 396/2008. O Zn atingiu 4.800 µg/L em Igarapé-Açu (PA), acima do permitido (180 µg/L).

A revisão sistemática reforçou a predominância de estudos no Estado do Pará, um reflexo direto da intensa atividade mineral na região, mas também revelou lacunas importantes, como a falta de representação de outros países amazônicos e a escassez de pesquisas sobre metais emergentes, como terras-raras e sua especiação química. Além disso, solo e sedimentos foram as matrizes mais investigadas, seguidas por água, enquanto estudos sobre biota ainda carecem de análises mais aprofundadas, especialmente no que diz respeito aos efeitos cumulativos e sinérgicos da contaminação.

Os resultados deste trabalho destacam a urgência de políticas públicas mais efetivas para prevenção e mitigação dos impactos da contaminação por metais na Amazônia, que incluem fortalecimento da fiscalização de atividades minerárias e urbanas, implementação de sistemas de monitoramento integrado (solo-água-sedimento) e desenvolvimento de estratégias de remediação adaptadas às particularidades regionais. Como primeira revisão a combinar bibliometria e análise sistemática sobre metais na Amazônia, este estudo não apenas mapeou o estado da arte, mas também identificou caminhos críticos para investigações futuras. A Amazônia, como patrimônio global, exige respostas integradas e imediatas, onde este trabalho espera contribuir para essa urgente discussão, reforçando a necessidade de equilibrar desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABAD-SEGURA, E., DE LA FUENTE, A. B., GONZÁLEZ-ZAMAR, M.D., BELMON-TE-UREÑA, L.J. 2020. **Effects of circular economy policies on the environment and sustainable growth: Worldwide research.** *Sustainability*, **12** (14): 57-92.
- AL-FARTUSIE, F. S., MOHSSAN, S. N. 2017. **Essential trace elements and their vital roles in human body.** *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, **5** (3): 127-136.
- ALI, H., KHAN, E., ILAHI, I. 2019. **Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation.** *Journal of chemistry*, (1): **6730305**.
- AMARANTE, R. T. 2021. **Mapeamento geoquímico por sedimentos de corrente na borda do Cráton São Francisco e Cinturão Brasília, Minas Gerais: definição de background geoquímico e aplicação de análise estatística multivariada.** Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – UFMG, Belo Horizonte, 106p.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2015. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000).** Balanço Hídrico da Província Hidrogeológica Amazonas, 306.
- ANBUSELVAN, N. D. S. N., SRIDHARAN, M. 2018. **Heavy metal assessment in surface sediments off Coromandel Coast of India: Implication on marine pollution.** *Marine pollution bulletin*, 131: 712-726.
- ANDREO-MARTÍNEZ, P., ORTIZ-MARTÍNEZ, V. M., GARCÍA-MARTÍNEZ, N., DE LOS RÍOS, A. P., HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, F. J., & QUESADA-MEDINA, J. 2020. **Production of biodiesel under supercritical conditions: State of the art and bibliometric analysis.** *Applied Energy*, 264. 114753.
- AVILA, D. S., PUNTEL, R. L., & ASCHNER, M. 2013. **Manganese in health and disease. Interrelations between essential metal ions and human diseases.** In: *Interrelations between Essential Metal Ions and Human Diseases*. Springer, 573p.
- ACIOLY, T.M. DA S., SILVA, M. F. DA., IANNAcone, J., & VIANA, D. C. 2024. **Levels of potentially toxic and essential elements in Tocantins River sediment: Health risks at Brazil's Savanna-Amazon interface.** *Scientific Reports*, **14** (1): 18037.
- 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.
- BAAS, J., SCHOTTEN, M., PLUME, A., CÔTÉ, G., & KARIMI, R. 2020. **Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies.** *Quantitative science studies*, **1** (1): 377-386.
- BARBIERI, E. 2019. **A Amazônia e a sustentabilidade da sua biodiversidade.** *Revista Relicário*, **6** (12): 107-126.

- BARCELOS, T. D. D. J. 2008. **Cobre: vital ou prejudicial para a saúde humana?**. Dissertação (Mestrado em Medicina) UBI, Covilhã, 69p.
- BASTI, S., Sahu, C., PATI, S. S., & SAHU, S. K. 2024. **Sediment organic carbon and heavy metals: A bibliometric analysis**. *Environmental Quality Management*, **33** (3): 493-503.
- BONAN, G. B. 2008. **Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests**. *Science*, **320** (5882): 1444-1449.
- BRADL, H. B. 2005. **Sources and origins of heavy metals**. In *Interface science and technology*. In: Interface Science and Technology, Elsevier, 1-27pp.
- BUDI, H. S., CATALAN OPULENCIA, M. J., AFRA, A., ABDELBASSET, W. K., AB-DULLAEV, D., MAJDI, A., & MOHAMMADI, M. J. 2024. **Source, toxicity and carcinogenic health risk assessment of heavy metals**. *Reviews on Environmental Health*, **39** (1): 77-90.
- CABRAL PINTO, M. M. S., MARINHO-REIS, P., ALMEIDA, A., PINTO, E., NEVES, O., INÁCIO, M., GERARDO, B., FREITAS, S., SIMÕES, M. R., DINIS, P. A., DINIZ, L., FERREIRA DA SILVA, E., & MOREIRA, P. I. 2019. **Links between Cognitive Status and Trace Element Levels in Hair for an Environmentally Exposed Population: A Case Study in the Surroundings of the Estarreja Industrial Area**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16** (22): 4560.
- CACHADA, A., ROCHA-SANTOS, T., & DUARTE, A. C. 2018. **Soil and pollution: an introduction to the main issues**. In: Soil pollution, Elsevier, 1-28pp.
- CAMILO, C., & GARRIDO, M. V. 2019. **A revisão sistemática de literatura em psicologia: Desafios e orientações**. *Instituto Universitário de Lisboa*, (4), 535-552.
- CAMPOS, M. C. C. 2010. **Soil attributes and risk of leaching of heavy metals in Tropical Soils**. *Ambiência*, **6** (3): 547-565.
- 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**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 23-21.
- CASADO, M., ANAWAR, H. M., GARCIA-SANCHEZ, A., SANTA REGINA, I. 2008. **Cadmium and zinc in polluted mining soils and uptake by plants (El Losar mine, Spain)**. *International Journal of Environment and Pollution*, **33**: 146–159.
- CASTRIOTA, R. 2022. **Preservar para extrair, grilar e espoliar: ambientalismo operacional e as unidades de conservação de Carajás**. *Revista GEOgrafias*, **18** (2): 21-43.
- CASTRO, M. C., BAEZA, A., CODEÇO, C. T., CUCUNUBÁ, Z. M., DAL'ASTA, A. P., De Leo, G. A., & SANTOS-VEGA, M. 2019. **Development, environmental degradation, and disease spread in the Brazilian Amazon**. *PLoS biology*, **17** (11): 3000526.

- CHAMBA-ERAS, I., GRIFFITH, D. M., KALINHOFF, C., RAMÍREZ, J., & GÁZQUEZ, M. J. 2022. **Native hyperaccumulator plants with differential phytoremediation potential in an artisanal gold mine of the Ecuadorian Amazon.** *Plants*, **11** (9): 1186.
- CHEN, S., XU, M., CUI, D., LV, L., WANG, Z., LIU, B., & WANG, J. 2022. **Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Marine Sediments of Binhai County, Jiangsu Province.** *Journal of Marine Science and Engineering*, **10** (9): 1242.
- COETZEE, J. J., BANSAL, N., & CHIRWA, E. M. 2020. **Chromium in environment, its toxic effect from chromite-mining and ferrochrome industries, and its possible bioremediation.** *Exposure and health*, **12**: 51-62.
- COOK, D. J., MULROW, C. D., & HAYNES, R. B. 1997. **Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions.** *Annals of internal medicine*, **126** (5): 376-380.
- COSTA, L. S. D. 2020. **Bioacumulação de metais pesados em pequenos mamíferos em áreas de remanescentes de mata atlântica e monocultura de cana-de-açúcar na Paraíba, Brasil.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Biológicas) – UFPB, João Pessoa, 69p.
- COSTA, I. D. D., NASCIMENTO, E. L. D., FACCHETI, M. S. D. A., NUNES, N. N. D. S., GOMES, J. P. D. O., ALMEIDA, R. D., & BASTOS, W. R. 2022. **Mercury in muscle and liver of *Plagioscion squamosissimus* (Acanthuriformes: Sciaenidae) from the Machado River, Brazilian Amazon.** *Acta Amazonica*, **52** (1): 60-68.
- COVRE, W. P., RAMOS, S. J., DA SILVEIRA PEREIRA, W. V., DE SOUZA, E. S., MARTINS, G. C., TEIXEIRA, O. M. M., & FERNANDES, A. R. 2022. **Impact of copper mining wastes in the Amazon: Properties and risks to environment and human health.** *Journal of hazardous materials*, **421**: 126688.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.** *Diário Oficial da União*: seção 1, 58-63, 18p.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008. **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas.** *Diário Oficial da União*: seção 1, 64-68, 7p.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias.** *Diário Oficial da União*: seção 1, 81-84p.
- CRAVEIRO, G. S., XAVIER, R. P., & VILLAS, R. N. N. 2019. **The Cristalino IOCG deposit: an example of multistage events of hydrothermal alteration and copper mineralization.** *Brazilian Journal of Geology*, **49** (01): 20180015.
- CWUR. **Center for World University Rankings.** Disponível em: < <https://cwur.org/media.php> >. Acesso em: 06/2024.

- CCME - Canadian Council of Ministers of the Environment. 2001. **Protocol for the derivation of Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life**. Ottawa, Canada, 35p.
- D'ABREU, I. M., SANTA RITTA, P. M. A., & BRAUER, M. 2020. **Análise das bibliometrias em administração na base Spell: uma bibliometria de bibliometrias nacionais**. *Revista Vianna Sapiens*, **11** (1): 21-21.
- DA SILVA-JÚNIOR, R. O., ALMEIDA, H. P., DA SILVA, M. S., FRANÇA, A. C., BAL-LERONI, E., DOS SANTOS, N., & GUIMARÃES, J. T. F. 2023. **Methodological Approach for an Online Water Quality Monitoring System in an Iron Ore Tailing Dam**. *Water*, **15** (20): 3663.
- DAS, K. K., REDDY, R. C., BAGOJI, I. B., DAS, S., BAGALI, S., MULLUR, L., & BIRADAR, M. S. 2019. **Primary concept of nickel toxicity—an overview**. *Journal of basic and clinical physiology and pharmacology*, **30** (2): 141-152.
- DAS GRAÇAS TELES, V. D. L. 2021. **Desenvolvimento de procedimentos analíticos para avaliação ionômica e metabólica em manjeriço (*Ocimum basilicum* L. grecco a palla) exposto ao Cádmi**. Tese (Doutorado em em Ciências – Química) – UFMG, Belo Horizonte, 157p.
- DE ANDRADE, L. C., TIECHER, T., DE OLIVEIRA, J. S., ANDREAZZA, R., INDA, A. V., & DE OLIVEIRA CAMARGO, F. A. 2018. **Sediment pollution in margins of the Lake Guaíba, Southern Brazil**. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190: 1-13.
- DE LIMA, M. W., HAMID, S. S., DE SOUZA, E. S., TEIXEIRA, R. A., DA CONCEIÇÃO PALHETA, D., DO CARMO FREITAS FAIAL, K., & FERNANDES, A. R. 2020. **Geochemical background concentrations of potentially toxic elements in soils of the Carajás Mineral Province, southeast of the Amazonian Craton**. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192: 1-16.
- DING, Y. 2024. **A Bibliographic Exploration: Tackling Heavy Metal Contamination**. Preprints. Disponível em: < <https://www.preprints.org/manuscript/202401.0625/v1> >. Acesso: 05/2025.
- DO NASCIMENTO, C. W. A., LIMA, L. H. V., DA SILVA, F. L., BIONDI, C. M., & CAMPOS, M. C. C. 2018. **Natural concentrations and reference values of heavy metals in sedimentary soils in the Brazilian Amazon**. *Environmental monitoring and assessment*, 190: 1-9.
- DONTHU, N., KUMAR, S., MUKHERJEE, D., PANDEY, N., & LIM, W. M. 2021. **How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines**. *Journal of business research*, 133: 285-296.
- FAJARDO, M. 2021. **The world that Latin America created: the United Nations Economic Commission for Latin America in the development era**.v. 192 Harvard University Press, 296p.
- FALCÃO, J. F. 2019. **Atributos e teores naturais de metais pesados em solos arenosos na Amazônia Central**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – UFAM, Manaus, 83p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2014. **Yearbook-fishery and aquaculture statistics summary tables. World Apparent Consumpt.Continent**. Disponível em: < ftp://ftp.fao.org/FI/STAT/summary/FBS_bycontinent.pdf > . Acesso em: 02/2025.

- FERNANDEZ, H. M., CONTI, L. F. C., & PATCHINEELAM, S. R. 1994. **An assessment of the pollution of heavy metals in Jacarepagua basin, Rio de Janeiro, Brazil: a statistical approach.** *Environmental technology*, **15** (1): 87-94.
- FREITAS, A. R. D. J. 2023. **Geoambientes: solos e áreas de mineração de ouro na região norte do Suriname.** Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – UFV, Viçosa, 97p.
- FREY, P. A., & REED, G. H. 2012. **The ubiquity of iron.** *ACS Chemical Biology*, **7**: 1477–1481
- FÖRSTNER, U., & WITTMANN, G. T. 2012. **Metal pollution in the aquatic environment.** Springer. 2nd edition, Science & Business Media, 488p.
- GALVÃO, R. C. F., HOLANDA, I. B. B., DE CARVALHO, D. P., ALMEIDA, R., SOUZA, C. M. M., LACERDA, L. D. D., & BASTOS, W. R. 2018. **Freshwater shrimps (*Macrobrachium depressimanum* and *Macrobrachium jelskii*) biomonitors of Hg availability in the Madeira River Basin, Western Amazon.** *Environmental Monitoring and Assessment*, **190** (2): 77.
- GARRETT, R. D., GARDNER, T. A., MORELLO, T. F., MARCHAND, S., BARLOW, J., DE BLAS, D. E., & PARRY, L. 2017. **Explaining the persistence of low income and environmentally degrading land uses in the Brazilian Amazon.** *Ecology and Society*, **22** (3).
- GENCHI, G., SINICROPI, M. S., LAURIA, G., CAROCCI, A., & CATALANO, A. 2020. **The effects of cadmium toxicity.** *International journal of environmental research and public health*, **17** (11): 3782.
- GIMENES, T. C., PENTEADO, J. O., DOS SANTOS, M., & DA SILVA JÚNIOR, F. M. R. 2021. **Methylmercury in fish from the Amazon region - A Review focused on eating habits.** *Water, Air, & Soil Pollution*, **232** (5): 199.
- GOMES, D. F., DA SILVA PINTO, T. J., RAYMUNDO, L. B., DA FONTOURA SPERANDEI, V., DAAM, M., MOREIRA, R. A., & ROCHA, O. 2023. **Ecological risk assessment for metals in sediment and waters from the Brazilian Amazon region.** *Chemosphere*, **345**: 140413.
- GUIMARAES, J. R. 2020. **Mercury in the Amazon: Problem or opportunity? A commentary on 30 years of research on the subject.** *Elementa: Science of the Anthropocene*, **8** (1): 032.
- HALLINGER, P., & SURIYANKIETKAEW, S. 2018. **Science mapping of the knowledge base on sustainable leadership, 1990–2018.** *Sustainability*, **10**: 4846.
- HAN, R., ZHOU, B., HUANG, Y., LU, X., LI, S., & LI, N. 2020. **Bibliometric overview of research trends on heavy metal health risks and impacts in 1989–2018.** *Journal of Cleaner Production*, **276**: 123249.
- HE, Z. L., YANG, X. E., & STOFFELLA, P. J. 2005. **Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment.** *Journal of Trace elements in Medicine and Biology*, **19** (2-3): 125-140.
- HE, Z., SHENTU, J., YANG, X., BALIGAR, V. C., ZHANG, T., & STOFFELLA, P. J. 2015. **Heavy metal contamination of soils: sources, indicators and assessment.** *Journal of Environmental Indicators*, **9**: 17-18

- HECHT, S., SCHMINK, M., ABERS, R., ASSAD, E., HUMPHREYS BEBBINGTON, D., EDUARDO, B., & PINEDO-VAZQUEZ, M. 2021. **The Amazon in motion: Changing politics, development strategies, peoples, landscapes, and livelihoods**. *Amazon Assessment Report*, Part II, 14-2.
- HERRERA-FRANCO, G., MONTALVÁN-BURBANO, N., CARRIÓN-MERO, P., APO-LO MASACHE, B., JAYAMONTALVO, M. 2020. **Research trends in geotourism: a bibliometric analysis using the Scopus database**. *Geosciences* 10 (10): 379.
- HERRERA-FRANCO, G., MONTALVÁN-BURBANO, N., CARRIÓN-MERO, P., JA-YA-MONTALVO, M., GURUMENDI-NORIEGA, M. 2021. **Worldwide research on geoparks through bibliometric analysis**. *Sustainability* 13 (3): 1175.
- HICKS, C. C., FITZSIMMONS, C., & POLUNIN, N. V. 2010. **Interdisciplinarity in the environmental sciences: barriers and frontiers**. *Environmental Conservation*, 37 (4): 464-477.
- HOMMA, A. K. O., DE MENEZES, A. J. E. A., SANTANA, C. A. M., & NAVARRO, Z. 2020. **O desenvolvimento mais sustentável da Região Amazônica: entre (muitas) controvérsias e o caminho possível**. *Colóquio-Revista do Desenvolvimento Regional*, 17 (4): 1-27.
- HONG, J., ZHANG, J., SONG, Y., & CAO, X. 2022. **Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Nutrient Elements and Heavy Metals in Surface Water of Tibet, China and Their Pollution Assessment**. *Water*, 14 (22): 3664.
- HUANG, B., GUO, Z., XIAO, X., ZENG, P., & PENG, C. 2019. **Changes in chemical fractions and ecological risk prediction of heavy metals in estuarine sediments of Chunfeng Lake estuary, China**. *Marine pollution bulletin*, 138: 575-583.
- HÄNGGLI, A., LEVY, S. A., ARMENTERAS, D., BOVOLO, C. I., BRANDÃO, J., RUEDA, X., & GARRETT, R. D. 2023. **A systematic comparison of deforestation drivers and policy effectiveness across the Amazon biome**. *Environmental Research Letters*, 18 (7): 073001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Amazônia Legal: limite da região*. 2021. Shapefile. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15819-amazonia-legal.html> >. Acesso: 07/2025.
- IRFAN, M., LIU, X., HUSSAIN, K., MUSHTAQ, S., CABRERA, J., & ZHANG, P. 2021. **The global research trend on cadmium in freshwater: a bibliometric review**. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14.
- ISMAEL, M. A., ELYAMINE, A. M., MOUSSA, M. G., CAI, M., ZHAO, X., & HU, C. 2019. **Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers**. *Metallomics*, 11 (2): 255-277.
- JIA, X., FU, T., HU, B., SHI, Z., ZHOU, L., & ZHU, Y. 2020. **Identification of the potential risk areas for soil heavy metal pollution based on the source-sink theory**. *Journal of hazardous materials*, 393: 122424.
- KAPPLER, A., & STRAUB, K. L. 2005. **Geomicrobiological cycling of iron**. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59 (1): 85-108.

- KEITH S, JONES D., ROSEMOND Z., INGERMAN L., CHAPPELL L. 2008. **Potential for human exposure**. *Toxicological Profile for Aluminum*, 175–227.
- KOBIELSKA, P. A., HOWARTH, A. J., FARHA, O. K., & NAYAK, S. 2018. **Metal–organic frameworks for heavy metal removal from water**. *Coordination chemistry reviews*, 358: 92-107.
- KUMAR, A., CABRAL-PINTO, M., KUMAR, A., KUMAR, M., & DINIS, P. A. 2020. **Estimation of risk to the eco-environment and human health of using heavy metals in the Uttarakhand Himalaya, India**. *Applied Sciences*, **10** (20): 7078.
- LAPOLA, D. M., PINHO, P., BARLOW, J., ARAGÃO, L. E., BERENQUER, E., CARMENTA, R., & WALKER, W. S. 2023. **The drivers and impacts of Amazon Forest degradation**. *Science*, 379 (6630): 8622.
- LE, T. T. N., LE, V. T., DAO, M. U., NGUYEN, Q. V., VU, T. T., NGUYEN, M. H., & LE, H. S. 2019. **Preparation of magnetic graphene oxide/chitosan composite beads for effective removal of heavy metals and dyes from aqueous solutions**. *Chemical Engineering Communications*, **206** (10): 1337-1352.
- LEARY, S., SILLITOE, R. H., STEWART, P. W., ROA, K. J., & NICOLSON, B. E. 2016. **Discovery, geology, and origin of the Fruta del Norte epithermal gold-silver deposit, southeastern Ecuador**. *Economic Geology*, **111** (5): 1043-1072.
- LI, Z., MA, Z., VAN DER KUIJP, T. J., YUAN, Z., & HUANG, L. 2014. **A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment**. *Science of the total environment*, 468: 843-853.
- LIMA, J. T. M. D., SEPÚLVREDA, B., & COSTA, S. A. R. F. D. 2023. **Systematics, Taxonomy and Management: A Case Study on the Implementation of a Digital Repository in the Collection of Natural Heritage in the Amazon**. *Intervención (México DF)*, **14** (28): 88-147.
- LOUREIRO, D., FERNANDEZ, M., HERMS, F., ARAÚJO, C., & LACERDA, L. D. D. 2012. **Distribuição dos metais pesados em sedimentos da Lagoa Rodrigo de Freitas**. *Oecologia Australis* **16** (3): 353-364.
- LÓPEZ-MUÑOZ, F., DE BERARDIS, D., FORNARO, M., VELLANTE, F., DI GIAN-NANTONIO, M., POVEDANO-MONTERO, F. J., FERNÁNDEZ-MARTÍN, M. P., RU-BIO, G., & ÁLAMO, C. 2017. **A bibliometric analysis of scientific production on atypical antipsychotic drugs from Italy**. *Rivista di Psichiatria*, **52** (6): 236-246.
- MAGEE, D. J. 1998. **Systematic reviews (meta-analysis) and functional out-come measures**. *Developmental Editor: B. Aindow*.
- MAPBIOMAS AMAZONIA. 2021. **MapBiomias Amazonia project collection v. 3. of Amazonian annual land cover and land us maps**. Disponível em: < <https://amazonia.mapbiomas.org/>> . Acesso em: 02/2025.
- MARTINS, W. B. R., DE MATOS RODRIGUES, J. I., DE OLIVEIRA, V. P., RIBEI-RO, S. S., DOS SANTOS BARROS, W., & SCHWARTZ, G. 2022. **Mining in the Amazon: Importance, impacts, and**

- challenges to restore degraded ecosystems. Are we on the right way?, *Ecological Engineering*, 174: 106468.
- MARTINS, R. K. 2022. **Divulgação científica para a conscientização sobre a ex-posição ao mercúrio em populações indígenas e ribeirinhas na Amazônia**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas) – UFRGS, Porto Alegre, 44p.
- MASINDI, V., & MUEDI, K. L. 2018. **Environmental contamination by heavy metals**. In: Heavy metals, *IntechOpen*, **10** (4): 115-133.
- MEDEIROS, M. F., BATISTA, G. C. V., DA SILVA CORDOVA, J. V., SANTOS, L. S., DE LIMA, R. M., & DE SOUSA, M. V. V. 2022. **Fundamentos da assistência de enfermagem na atenção primária às gestantes ribeirinhas afetadas pelo despejo de mercúrio em corpos d'água**. *Global Clinical Research Journal*, **2** (2): 31-31.
- MININEL, F. J., MININEL, S. M. X., DA SILVA OLIVEIRA, L. E. 2024. **Precipitação e recuperação do cromo presente em resíduos provenientes do processo de cromação**. *Revista Tópicos*, **2** (16): 1-17.
- MONTALVÁN-BURBANO, N., VELASTEGUI-MONTOYA, A., GURUMENDI-NORIEGA, M., MORANTE-CARBALLO, F., & ADAMI, M. 2021. **Worldwide research on land use and land cover in the amazon region**. *Sustainability*, **13** (11): 6039.
- MORAES PINTO, L. D. C., DÓREA, J. G., BERNARDI, J. V. E., GOMES, L. F. 2019. **Mapping the evolution of mercury (Hg) research in the Amazon (1991–2017): A scientometric analysis**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16** (7): 1111.
- MOSQUERA CHAVERRA, L., PAREDES CUERVO, D., LÓPEZ GUTIÉRREZ, A., ARIAS, C. a., CARVALHO, P. N. 2024. **Phytoremediation of Mercury Contamination: Bibliometric Analysis**. *Sustainability*, **16** (21): 9408.
- MOULATLET, G. M., YACELGA, N., RICO, A., MORA, A., HAUSER-DAVIS, R. A., CABRERA, M., & CAPPARELLI, M. V. 2023. **A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards**. *Chemosphere*, 139700.
- MOURÃO, P. R., & MARTINHO, V. D. 2020. **Forest entrepreneurship: A biblio-metric analysis and a discussion about the co-authorship networks of an emerging scientific field**. *Journal of Cleaner Production*, 256: 120413.
- MUSILOVA, J., ARVAY, J., VOLLMANNOVA, A., TOTH, T., & TOMAS, J. 2016. **Environmental contamination by heavy metals in region with previous mining activity**. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 97: 569-575.
- NAGAJYOTI, P. C., LEE, K. D., & SREEKANTH, T. V. M. 2010. **Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review**. *Environmental chemistry letters*, 8: 199-216.
- NEGRI, F. 2024. **A Pesquisa sobre Amazônia no mundo: uma análise bibliométrica**. *Radar*, 75: 33-38.

- NOBRE, C., ENCALADA, A., ANDERSON, E., ALCAZAR, F., BUSTAMANTE, M., MENA, C., PEÑA-CLAROS, M., POVEDA, G., RODRIGUEZ, J., SALESKA, S., TRUMBORE, S., VAL, A., VILLA NOVA, L., ABRAMOVAY, R., ALENCAR, A., RO-DRÍGUEZ ALZZA, C., ARMENTERAS, D., ARTAXO, P., ATHAYDE, S., ESPINOZA, J. 2021. **Amazon Assessment Report**. In: SCIENCE PANEL FOR THE AMAZON. New York: United Nations Sustainable Development Solutions Network).
- NOFRIANDI, A., FRINALDI, A., LANIN, D., REMBRANDT, R., YULKIFLI, Y., DEWA-TA, I., & FEBRINA, S. 2024. **Heavy Metals Contamination and the Evolution of Environmental Policy: A Comprehensive Bibliometric Reviews**. *Science and Environmental Journal for Postgraduate*, **7** (1): 09-24.
- NOGUEIRA, T. A. R., ABREU-JUNIOR, C. H., ALLEONI, L. R. F., HE, Z., SOARES, M. R., DOS SANTOS VIEIRA, C., & CAPRA, G. F. 2018. **Background concentrations and quality reference values for some potentially toxic elements in soils of São Paulo State, Brazil**. *Journal of Environmental Management*, **221**: 10-19.
- PASSOS, C. J., MERGLER, D., GASPAR, E., MORAIS, S., LUCOTTE, M., LAR-RIBE, F., & DE GROSOBOIS, S. 2003. **Eating tropical fruit reduces mercury expo-sure from fish consumption in the Brazilian Amazon**. *Environmental research*, **93** (2): 123-130.
- PIMENTA, A. A., PORTELA, A. R. M. R., OLIVEIRA, C. D., & RIBEIRO, R. M. 2017. **A bibliometria nas pesquisas acadêmicas**. *Scientia*, **4** (7): 1-13.
- PINZÓN-BEDOYA, C. H., PINZÓN-BEDOYA, M. L., PINEDO-HERNÁNDEZ, J., URANGO-CARDENAS, I., & MARRUGO-NEGRETE, J. 2020. **Assessment of potential health risks associated with the intake of heavy metals in fish harvest-ed from the largest estuary in Colombia**. *International journal of environmental research and public health*, **17** (8): 2921.
- PITMAN, N. C., TERBORGH, J. W., SILMAN, M. R., NÚÑEZ V, P., NEILL, D. A., CERÓN, C. E., & AULESTIA, M. 2001. **Dominance and distribution of tree species in upper Amazonian terra firme forests**. *Ecology*, **82** (8): 2101-2117.
- POURRET, O., & HURSTHOUSE, A. 2019. **It's time to replace the term "heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16** (22): 4446.
- PRICE, D. 1963. **Little Science, Big Science**. *ColumbiaUniversity Press*, New York.
- PRICE, D. J. 1986. **Little Science, Big Science...and beyond**. *Columbia University Press*, New York.
- PRITCHARD, A. 1969. **Statistical bibliography or bibliometrics**. *Journal of documentation*, **25**: 348.
- PUNAMIYA, P., DATTA, R., SARKAR, D., BARBER, S., PATEL, M., & DAS, P. 2010. **Symbiotic role of *Glomus mosseae* in phytoextraction of lead in vetiver grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.)]**. *Journal of hazardous materials*, **177** (1-3): 465-474.
- QIN, G., NIU, Z., YU, J., LI, Z., MA, J., XIANG, P. 2021. **Soil heavy metal pollution and food safety in China: effects, sources and removing technology**. *Chemosphere* **267**: 129205.

RAHMAN, R., & UPADHYAYA, H. 2021. **Aluminium toxicity and its tolerance in plant: A review**. *Journal of Plant Biology*, **64** (2): 101-121.

REDE AMAZÔNICA DE INFORMAÇÃO SOCIOAMBIENTAL GEORREFERENCIADA (RAISG). Pan-Amazônia: limites geográficos – Shapefile. 2022. Disponível em: < <https://www.raisg.org/pt-br/mapas/>>. Acesso: 07/2025.

RAMOS, S. J., GASTAUER, M., MARTINS, G. C., GUEDES, R. S., CALDEIRA, C. F., SOUZA-FILHO, P. W., & SIQUEIRA, J. O. 2022. **Changes in soil properties during iron mining and in rehabilitating minelands in the Eastern Amazon**. *Environmental Monitoring and Assessment*, **194** (4): 256.

RODRIGUES, L. F. D. S. 2019. **Mineração ilegal Bolivar (Venezuela) e Madre de Diós (Peru): novo paradigma de segurança ambiental na América do Sul**. Dissertação (Mestrado em Estudos Estratégicos Internacionais da Faculdade de Ciências Econômicas) – UFRGS, Porto Alegre, 126p.

ROULET, M., LUCOTTE, M., CANUEL, R., FARELLA, N., COURCELLES, M., GUIMARAES, J. R., & AMORIM, M. 2000. **Increase in mercury contamination recorded in lacustrine sediments following deforestation in the central Amazon**. *Chemical Geology*, **165** (3-4): 243-266.

RUDNICK, R.L. & GAO, S. 2003. **The Composition of the Continental Crust**. In: Holland, H.D. and Turekian, K.K., Eds., *Treatise on Geochemistry*, Vol. 3, The Crust, *Elsevier-Pergamon*, Oxford, 1-64 p.

RZYMSKI, P., KLIMASZYK, P., MARSZELEWSKI, W., BOROWIAK, D., MLECZEK, M., NOWIŃSKI, K., & PONIEDZIAŁEK, B. 2017. **The chemistry and toxicity of discharge waters from copper mine tailing impoundment in the valley of the Apuseni Mountains in Romania**. *Environmental science and pollution research*, **24**: 21445-21458.

SALOMONS, W., e FÖRSTNER, U. 2012. **Metals in the Hydrocycle**. *Springer Science & Business Media*. Ed. p.63-92

SANTOS, J. A., BARROCO, L. S. A., DE SOUZA, F. K. S., & DE CARVALHO FREI-TAS, C. E. 2017. **Isótopos estáveis em estudos ecológicos com peixes na Amazônia Brasileira**. *Scientia Amazonia*, **6** (3): 119-127.

SEPE, J., HERRMANN, H., & SALVADOR, N. N. B. 2021. **Mineração, responsabilidade socioambiental e sustentabilidade**. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **10** (4): 401-422.

SHAH, S. B. 2021. **Heavy metals in the marine environment—an overview**. *Heavy metals in Scleractinian corals*, 1-26.

SILVA, M. C., DO NASCIMENTO MONTE, C., DE SOUZA, J. R., SELFE, A. C. C., & ISHIHARA, J. H. 2024. **Mapping of metals contamination in coastal sediments around the world in the last decades: A bibliometric analysis and systematic review**. *Marine Pollution Bulletin*, **205**: 116572.

SILVA, J. M. F., DE PAULA SILVA, J., & MANOSSO, F. C. 2024b. **Evaluation of geodiversity in the Brazilian Amazon using different quantification methodologies**. *Geomorphology*, **466**: 109441.

- SILVA, L. N. L., DE CARVALHO, G. S., HURTADO, T. C., JUNIOR, E. S. O., & IG-NÁCIO, Á. R. A. 2024c. **Concentração de mercúrio em pisciculturas do Mato Grosso, Brasil: uma necessidade de análise para a redução de impactos sobre o pescado.** *Caderno Pedagógico*, **21** (5): 4171-4171.
- SINGH, R., GAUTAM, N., MISHRA, A., GUPTA, R. 2011. **Heavy metals and living systems: An overview.** *Indian Journal of Pharmacology*, **43**: 246–253.
- SILVA, S. C., FERREIRA, P. A. L., BIAMONT ROJAS, I., TREVIZANI, T. H., FI-GUEIRA, R. C. L., POMPEO, M., MOSCHINI CARLOS, V. 2024. **Heterogeneidade geoquímica temporal e espacial de sedimentos em reservatório de área protegida: a busca por condições de referência.** In: POMPÊO, M. (Org.) *Limnologia de reservatórios: do clássico às novas abordagens*. São Paulo: Instituto de Biociências, USP, cap. 8: 143p.
- STRAND, J., SOARES-FILHO, B., COSTA, M. H., OLIVEIRA, U., RIBEIRO, S. C., PIRES, G. F., & TOMAN, M. 2018. **Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon forest's ecosystem services.** *Nature Sustainability*, **1** (11): 657-664.
- TAYLOR, S. R., & MCLENNAN, S. M. 1985. **The continental crust: its composition and evolution.** *Blackwell Scientific Publication*, Oxford, 312p.
- TANCREDI, A. C. F. N. S. 1996. **Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: Fundamentos para uso e proteção.** Tese (Doutorado) – UFPA, Belém, 153p.
- TEIXEIRA, R. A., DA SILVEIRA PEREIRA, W. V., DE SOUZA, E. S., RAMOS, S. J., DIAS, Y. N., DE LIMA, M. W., & FERNANDES, A. R. 2021. **Artisanal gold mining in the eastern Amazon: Environmental and human health risks of mercury from different mining methods.** *Chemosphere*, **284**: 131220.
- TRUCHET, D. M., BUZZI, N. S., NEGRO, C. L., MORA, M. C., & MARCOVECCHIO, J. E. 2021. **Integrative assessment of the ecological risk of heavy metals in a South American estuary under human pressures.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **208**: 111498.
- UNITED STATES. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Toxicological profile for cooper.** 2024. Atlanta: *U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service*. Disponível em:< <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp132.pdf>>. Acesso em: 07/2025.
- UNITED STATES. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Toxicological profile for lead.** 2020. Atlanta: *U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service*. Disponível em:< <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp13.pdf> >. Acesso em: 07/2025.
- UNITED STATES. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Toxicological profile for zinc.** 2005. Atlanta: *U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service*. Disponível em:< <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp60.pdf> >. Acesso em: 07/2025.
- UNITED STATES. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Toxicological profile for cadmium.** 2012. Atlanta: *U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service*. Disponível em:< <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp5.pdf> >. Acesso em: 07/2025.

- VALDELAMAR-VILLEGAS, J., OLIVERO-VERBEL, J. 2020. **High mercury levels in the indigenous population of the Yaigojé Apaporis National Natural Park, Colombian Amazon.** *Biological Trace Element Research*, **194** (1) 3-12.
- VARDHAN, K. H., KUMAR, P. S., & PANDA, R. C. 2019. **A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives.** *Journal of Molecular Liquids*, **290**: 111197
- VEIGA-DEL-BAÑO, J. M., CÁMARA, M. Á., OLIVA, J., HERNÁNDEZ-CEGARRA, A. T., ANDREO-MARTÍNEZ, P., & MOTAS, M. 2023. **Mapping of emerging contaminants in coastal waters research: A bibliometric analysis of research output during 1986–2022.** *Marine Pollution Bulletin*, **194**: 115366.
- VIANA, J. S. S., AGUIAR, Y. B., DOS SANTOS, R. S., SILVA, E. M., COSTA, J. C. D. O., & DA SILVA, L. R. C. 2024. **O Pequeno minerador individual e as empresas mineradoras de pequena escala: a luta a favor da legalização no sudeste do estado do Pará.** *Facit Business and Technology Journal*, **1** (49).
- VILHENA, J. C. E., AMORIM, A., RIBEIRO, L., DUARTE, B., & POMBO, M. 2021. **Baseline study of trace element concentrations in sediments of the inter-tidal zone of Amazonian oceanic beaches.** *Frontiers in Marine Science*, **8**.
- WALLIN, J. A. 2005. **Bibliometric methods: pitfalls and possibilities.** *Basic & clinical pharmacology & toxicology*, **97** (5): 261-275.
- WANG, Z., LUO, P., ZHA, X., XU, C., KANG, S., ZHOU, M., & WANG, Y. 2022. **Overview assessment of risk evaluation and treatment technologies for heavy metal pollution of water and soil.** *Journal of Cleaner Production*, **379**: 134043.
- WILDGAARD, L., SCHNEIDER, J. W., & LARSEN, B. 2014. **A review of the characteristics of 108 author-level bibliometric indicators.** *Scientometrics*, **101**: 125-158.
- WILMERS, J. T. A. V. L., CAVALCA, D. L., & FERNANDES, R. A. S. 2017. **Análise bibliométrica da área de pesquisa denominada Demand Response.** In: IV Encontro Regional dos Estudantes de Biblioteconomia, Documentação, Ciência da In-formação e Gestão da Informação – Regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul. Anais..Porto Alegre, UFRGS, 308p.
- XIAO, P., ZHOU, Y., LI, X., XU, J., & ZHAO, C. 2021. **Assessment of heavy metals in agricultural land: A literature review based on bibliometric analysis.** *Sustainability*, **13** (8): 4559.
- YADAV, A., SOHLOT, M., SAHU, S. R., BANERJEE, T., BHATTACHARYA, J., BANDYOPADHYAY, K., & DEBNATH, N. 2024. **Determination of antifungal efficacy and phytotoxicity of a unique silica coated porous zinc oxide nanocomposite medium for slow-release agrochemicals.** *Journal of Applied Microbiology*, **135** (7): 153.
- ZAMORA-LEDEZMA, C., NEGRETE-BOLAGAY, D., FIGUEROA, F., ZAMORA-LEDEZMA, E., NI, M., ALEXIS, F., & GUERRERO, V. H. 2021. **Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods.** *Environmental Technology & Innovation*, **22**: 101504.

ZHAO, L., GONG, D., ZHAO, W., LIN, L., YANG, W., GUO, W., & LI, Q. 2020. **Spatial-temporal distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water of the Three Gorges Reservoir, China.** *Science of the Total Environment*, 704: 134883.

ZHOU, C., BI, R., SU, C., LIU, W., & WANG, T. 2022. **The emerging issue of microplastics in marine environment: A bibliometric analysis from 2004 to 2020.** *Marine Pollution Bulletin*, 179: 113712.