

Distribuição de metais potencialmente tóxicos nos sedimentos do rio Água Branca: influência da atividade antrópica no Polo Industrial de Piquiá, Açailândia-MA, no leste da Amazônia brasileira

Distribution of potentially toxic metals in the sediments of the Água Branca river: influence of anthropic activity in the Piquiá Industrial Pole, Açailândia-MA, in the eastern Brazilian Amazon

Distribución de metales potencialmente tóxicos en los sedimentos del río Água Branca: influencia de la actividad antrópica en el Polo Industrial de Piquiá, Açailândia-MA, en la Amazonia Oriental Brasileña

Joaquim Paulo de Almeida Júnior

Doutor em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI. Professor do Curso de Química da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL.

joaquimjunior@uemasul.edu.br / <http://orcid.org/0009-0007-1641-4936>

Marcelo Francisco da Silva

Doutor em Biologia de Agentes Infecciosos e Parasitários pela Universidade Federal do Pará – UFPA. Professor do Curso de Ciências Biológicas da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL.

silvamf@gmail.com / <http://orcid.org/0000-0002-9148-6725>

Arabutan Maracaípe da Silva Neto

Mestrando em Ciências Ambientais e Graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – PPGCIAMB/UEMASUL.

arabutanmaracaípe@gmail.com / <http://orcid.org/0000-0002-8238-5412>

Ísis da Rocha Sousa

Mestranda em Zoologia pelo Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Graduada em Curso de Ciências Biológicas pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL.

isisrochasousa25@gmail.com / <http://orcid.org/0009-0007-7812-4723>

Jurandir Pereira Filho

Doutor em Ecologia e Recursos Naturais pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR. Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI.

jurandir@univali.br / <http://orcid.org/0000-0002-7166-458X>

Recebido: 28/02/2024; Aceito: 11/05/2024; Publicado: 28/06/2026.

Resumo

Na época da implantação do Polo Siderúrgico de Açailândia-MA, no Piquiá, na década de 80, não havia políticas públicas ambientais consolidadas no Brasil, ocasionando a ausência criteriosa do licenciamento ambiental. Este trabalho teve como objetivo, determinar a influência da atividade siderúrgica do polo industrial do Piquiá, no município de Açailândia-MA, na qualidade do corpo hídrico, a partir do estudo das variáveis físico-químicas e químicas dos sedimentos fluviais em relação aos metais potencialmente tóxicos no rio Água Branca. Foram coletadas amostras de sedimentos a montante, área de influência direta e jusante, sendo três no período chuvoso e três no período não chuvoso e realizadas as análises de pH, Acidez Potencial, Capacidade de Troca Catiônica, Metais Potencialmente Tóxicos Totais e Biodisponíveis (Cu, Ni, Pb, Zn, As, Hg, Fe, Mn, Al, Cd, Co, Cr). Os resultados indicaram alterações nos parâmetros físico-químicos analisados, e concentrações de metais, que excederam as diretrizes de qualidade da resolução CONAMA n° 420, tais como o Cu, Cd, Ni e Hg, gerando riscos à saúde da população e a perda de biodiversidade na região.

Palavras-chave: Metais Potencialmente Tóxicos; Sedimentos; Amazônia Oriental Maranhense.

Abstract

At the time of the implementation of the Açailândia-MA Steel Pole in Piquiá, in the 1980s, there were no consolidated public environmental policies in Brazil, causing the absence of careful environmental licensing. This work aimed to determine the influence of the steel activity of the Piquiá industrial pole, in the municipality of Açailândia-MA, on the quality of the hydrous, based on the study of the physical-chemical and chemical variables of the river sediments in relation to potentially toxic metals in Água Branca river. Sediment samples were collected in the upstream area (area before the Piquiá point), downstream (after Pequiá) and in the area of influence (in Piquiá), 3 in the rainy period and 3 in the non-rainy period and it was carried out the analyses of pH, Potential Acidity, CTC, Total and Bioavailable Potentially Toxic Metals (Cu, Ni, Pb, Zn, As, Hg, Fe, Mn, Al, Cd, Co, Cr). The results indicated changes in the physical-chemical parameters analyzed, and concentrations of metals, which exceeded the quality guidelines of the resolution CONAMA n° 420, such as Cu, Cd, Ni and Hg, generating risks to the health of the population and the loss of biodiversity in the region.

Keywords: Potentially Toxic Metals; Sediments; Eastern Maranhense Amazon.

Resumen

En la época de implantación del Polo Siderúrgico de Açailândia-MA, en Piquiá, en la década de 80, no había políticas públicas ambientales consolidadas en el Brasil, ocasionando la ausencia criteriosa de licenciamiento ambiental. Este trabajo tuvo como objetivo, determinar la influencia de la actividad siderúrgica del polo industrial de Piquiá, en el municipio de Açailândia-MA, en la calidad relación con metales potencialmente tóxicos del cuerpo hídrico, a partir del estudio de las variables físico-químicas y químicas de los sedimentos fluviales en el río Agua Branca. Fueron colectadas muestras de sedimentos aguas arriba, área de influencia directa y aguas abajo, siendo 3 en el período lluvioso y 3 en el período no lluvioso y realizadas los análisis de pH, Acidez Potencial, CTC, Metales Potencialmente Tóxicos Totales y Biodisponibles (Cu, Ni, Pb, Zn, As, Hg, Fe, Mn, Al, Cd, Co, Cr). Los resultados indicaron alteraciones en los parámetros físico-químicos analizados, y concentraciones de metales, que excedieron las directrices de calidad de la resolución CONAMA n° 420, tales como el Cu, Cd, Ni y Hg, generando riesgos a la salud de la población y la pérdida de biodiversidade en la región.

Palabras clave: Metales Potencialmente Tóxicos; Sedimentos; Amazonia Oriental Maranhense.

Introdução

O minério de ferro bruto extraído na Serra dos Carajás-PA é transportado pela ferrovia até o porto de Itaqui-MA, mas parte é beneficiado na forma primária de Ferro-Gusa, no município de Açailândia-MA, na região industrial do Piquiá. Este processo é feito em altos fornos por empresas siderúrgicas desde o final dos anos 80 na região (Mancini; Carneiro, 2018). À época da implantação do Polo Siderúrgico de Açailândia-MA no Piquiá, na década de 80, não havia políticas públicas ambientais consolidadas no Brasil, que teve início com a Lei no 6938/81, que criou o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) como órgão consultivo e deliberativo, instituindo a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), e a resolução CONAMA n° 001/86. As indústrias siderúrgicas que se instalaram na região, não foram submetidas a criteriosos licenciamentos ambientais na fase de ocupação territorial, assim como para seu funcionamento.

As atividades de extração dos metais dos seus respectivos minérios estão interrelacionadas ao desenvolvimento econômico, e isto ocorre em diversas partes em escala mundial, da mesma forma que acontece no município de Açailândia-MA. Contudo, este setor de mineração produz grandes volumes de resíduos sólidos e materiais particulados emitidos na atmosfera, nos corpos hídricos e solo, gerando preocupações e desafios ambientais para a sociedade (Hamilton *et al.*, 2020). Estes eventos ocasionam impactos aos ecossistemas aquáticos pela inserção de metais potencialmente tóxicos (MPTs), ocasionando riscos à saúde da população e a perda de biodiversidade na região (Coimbra *et al.*, 2021). O impacto dos MPTs no ambiente é um problema grave que cresce em todo o mundo devido à expansão industrial e dos centros urbanos de forma descontrolada (Liu *et al.*, 2017).

A contaminação de ecossistemas aquáticos por metais potencialmente tóxicos tem gerado uma grande preocupação social, devido a sua toxicidade, elevada persistência no substrato do solo e por representar riscos à saúde humana, devido a sua mobilidade ao ser dissolvido em meio aquoso e absorvido por organismos vivos, adentrando na cadeia alimentar, e sendo potencializado pela bioacumulação (Varol; Sem, 2012).

O impacto em longo prazo depende da quantidade e espécie de poluentes produzidos na forma de rejeitos sólidos, que são descarregados no leito do rio por lixiviação causada pelos ventos ou pelas chuvas, assim como a emissão de material particulado na atmosfera através das chaminés, que decantam sobre a região (Ferreira *et al.*, 2020). Os metais potencialmente tóxicos inseridos nos sedimentos do curso de um rio, a partir da ação antrópica, advêm do processo de floculação e sedimentação, oriundos de precipitação ou decantação atmosférica dos materiais particulados emitidos, ou através de lixiviação dos rejeitos produzidos pela indústria, que se encontram depositados sobre o

solo sem prévio tratamento (Li *et al.*, 2013). As concentrações de metais potencialmente tóxicos contidos no material depositado, e sua biodisponibilidade, tem papel importante na avaliação do grau de impacto no curso hídrico (Pacheco *et al.*, 2022).

Os metais potencialmente tóxicos (MPTs) possuem características não biodegradáveis, elevada toxicidade para a grande maioria dos organismos vivos e significantes efeitos à saúde (Kukrer *et al.*, 2015). A acumulação destes metais, nos ecossistemas aquáticos, deteriora a qualidade dos corpos hídricos, concomitantemente à qualidade ambiental da região (Alizadeh *et al.*, 2017). O processo contínuo de emissão de MPTs provoca efeito adverso no ciclo biogeoquímico natural (Kormoker *et al.*, 2019). A elevada concentração de poluentes nos sedimentos aquáticos, provocam alterações nas composições químicas de metais, pH e outros parâmetros físico-químicos que influenciam na qualidade da água (Tas *et al.*, 2019). Portanto, a caracterização qualitativa e quantitativa do sedimento, é importante e necessária para a classificação de um corpo hídrico (Fiket *et al.*, 2019).

Os sedimentos aquáticos são reservatórios de metais potencialmente tóxicos, que estão inseridos na manutenção do estado trófico de qualquer corpo hídrico (Ahmed *et al.*, 2016). Os sedimentos localizados no curso do rio, devido à vazão hídrica e as características morfológicas do canal do rio, tais como, largura, sinuosidade e inclinação, estão em contínuo transporte, orientados em sentido do montante à jusante, sendo intensificado pela sazonalidade do período seco e chuvoso (Terêncio *et al.*, 2023). O processo de diluição dos metais potencialmente tóxicos existentes no sedimento dos rios, quando da passagem para a fase líquida do curso d'água é influenciado pela precipitação das chuvas (Fischer *et al.*, 2022). Podem ocasionar também o escoamento de material contido no solo e poluentes atmosféricos (Basso; Silva, 2013). O carreamento de compostos orgânicos e inorgânicos, produzidos por diversos fatores, é também influenciado pelo regime pluviométrico da região (Corazza *et al.*, 2013).

A determinação de parâmetros físico-químicos é indispensável para uma análise hídrica e ambiental adequada. Ao avaliar a qualidade da água e do solo, esses parâmetros se destacam e são largamente utilizados (Nogueira; Costa; Pereira, 2015). Normalmente são medidos em campo e possibilitam a avaliação da qualidade do solo, de forma a compreender o funcionamento dos ecossistemas e identificar possíveis problemas ambientais que necessitam de intervenção (Cardoso; Novaes, 2013; Callisto; Gonçalves Jr; Moreno, 2022).

O referido trabalho de pesquisa se baseia nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS 6) da Organização das Nações Unidas, onde preconiza que é necessário

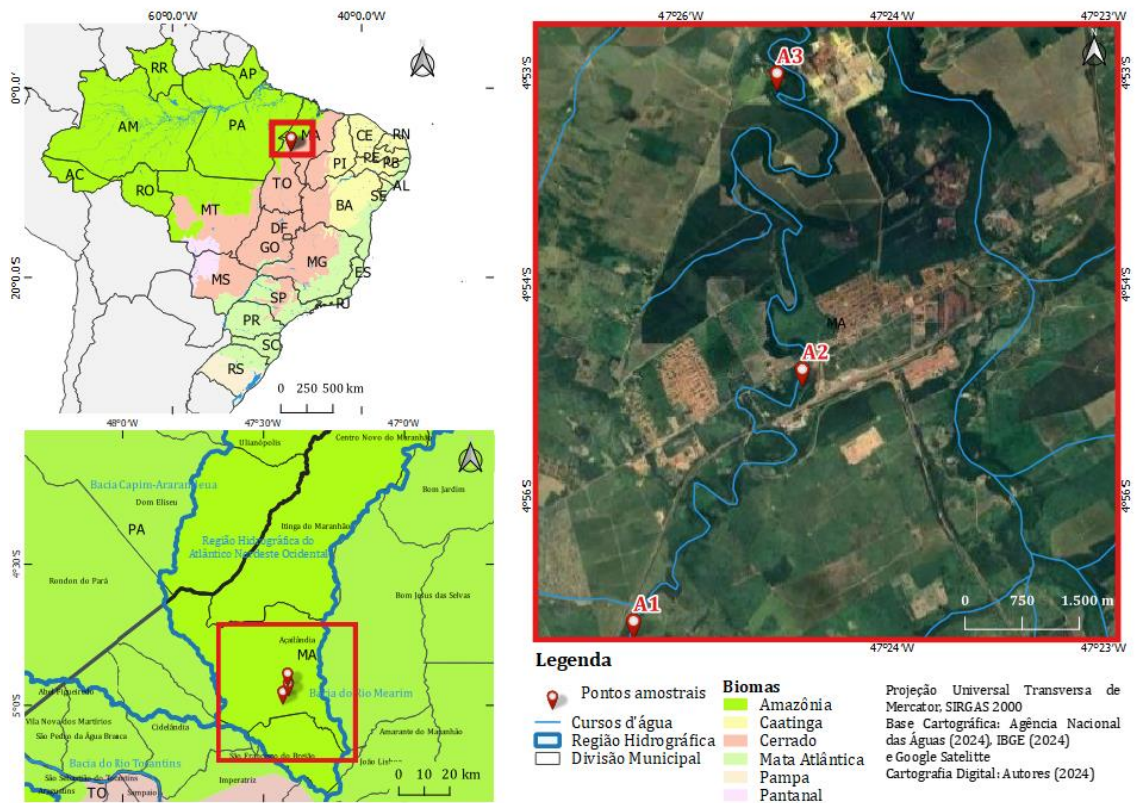
melhorar a qualidade da água do planeta a partir da redução da poluição, eliminando os despejos nos mananciais aquíferos, assim como a diminuição da liberação de produtos químicos e materiais perigosos. E no ODS 12, que se fundamenta na promoção do crescimento econômico sustentado, melhorando a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção, e no empenho na dissociação do crescimento econômico com a degradação ambiental (ONU, 2024). Assim, este trabalho teve como objetivo determinar a influência da atividade siderúrgica do polo industrial do Piquiá, no município de Açailândia-MA, na qualidade do corpo hídrico, a partir do estudo das variáveis físico-químicas e químicas dos sedimentos fluviais no rio Água Branca.

Material e métodos

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Gurupi, de domínio federal, tem parte no estado do Maranhão e também do estado do Pará, e possui uma área total de 34.860,96 km² (Nascimento, 2021). O rio Água Branca, que em seu percurso atravessa os municípios maranhenses: São Francisco do Brejão, João Lisboa, Itinga e Açailândia, deságua no rio Açailândia, que é o principal rio contribuinte na região da nascente do rio Gurupi. Os rios Água Branca e Mosquito são potenciais fontes de descarga dos efluentes industriais destas siderúrgicas (Figura 1).

Figura 1 – Localização dos pontos amostrais no rio Água Branca na região do polo industrial do Piquiá, no município de Açailândia (MA).



Fonte: os autores, 2024.

A Região hidrográfica do Atlântico Nordeste Ocidental é constituída pelas bacias hidrográficas dos rios Itapecuru, Mearim, Munim, Gurupi, Pericumã e Turiaçu, e região do Litoral do Maranhão e do Litoral do Pará, ocupando aproximadamente 268.897 Km², que se caracteriza pela presença de vários ecossistemas, dos quais os mais importantes são as florestas de transição entre os biomas Amazônico e Cerrado (ANA, 2015). O rio Água Branca está inserido na bacia do rio Gurupi, na sub-bacia do rio Açailândia, tendo sua nascente no município de São Francisco do Brejão-MA (IMESC, 2019).

O município de Açailândia, localizado na porção oeste do estado do Maranhão, possui 106.550 habitantes (IBGE, 2022), economicamente, consolidou-se como uma das mais importantes economias do estado de acordo com IBGE. Em valores, o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* de Açailândia em 2021 foi de R\$ 33.649,84, ocupando a posição 1834^o entre os municípios do Brasil e 12^o no estado do Maranhão (IBGE, 2021). A principal fonte de economia do município é a exportação de ferro gusa, produzida pelas indústrias siderúrgicas instaladas no distrito industrial do Piquiá e uma aciaria.

Coletas das amostras

As coletas foram realizadas em três pontos amostrais ao longo do percurso do rio Água Branca: Montante (A1) da área de influência do setor industrial, de coordenadas 4°56'21.3"S e 47°25'50.1"W, área de impacto direto das indústrias (A2) de coordenadas 4°54'34.1"S e 47°24'38.2"W, e Jusante (A3) da área impactada de 4°52'28.0"S e 47°24'49.0"W (Figura 1). Os pontos amostrais consecutivos têm aproximadamente 7 Km de distância.

As amostras de sedimentos foram obtidas nos meses de fevereiro, março e abril de 2022, considerando o período chuvoso da região, e os meses de julho, agosto e setembro do mesmo ano, que é o período não chuvoso (Lima *et al.*, 2017). Em cada ponto amostral (A1, A2 e A3), os sedimentos foram coletados em cinco pontos distintos, com auxílio de uma draga tipo Peterson, há uma profundidade máxima de 10 cm do leito do rio, depois homogeneizados e adicionados aos frascos de PVC, e acondicionados em caixas térmicas em temperatura média de 4°C, até o laboratório para realização das análises físico-químicas.

Determinações envolvendo amostras de sedimento

Os parâmetros físico-químicos do sedimento analisados foram baseados nos parâmetros estabelecidos pela Resolução do CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009 e o Manual de Métodos de Análise do Solo da EMBRAPA (Teixeira *et al.*, 2017). Foram determinados a capacidade de troca catiônica efetiva (CTC), pH em água e em KCl, acidez potencial, concentração de metais totais e concentração de metais biodisponíveis (Tabela 1).

Tabela 1- Análises físico-químicas realizadas nos sedimentos do rio Água Branca (MA).

Parâmetro	Métodos	Referência
Determinação da Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (CTC)	Técnica por determinação de pH dos sobrenadantes e de CH ₃ COOH 1mol/L	TEIXEIRA et al., 2017
pH em água e KCl	Técnica por suspensão. Medição do potencial hidrogeniônico por meio de água ou KCl, na proporção de 1:2,5.	TEIXEIRA et al., 2017
Acidez potencial	Extração da acidez potencial do solo com acetato de cálcio tamponado a pH 7 e determinação volumétrica com solução de NaOH em presença de fenolftaleína como indicador.	TEIXEIRA et al., 2017
Metais Potencialmente Tóxicos Biodisponíveis (Extração sequencial)	Analisado por espectrofotometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP). A amostra é tratada com uma sucessão de reagentes extratores, com a intenção específica de dissolver suas diferentes fases (ou frações) e assim determinar os metais associados.	TESSIER, 1979
Metais Potencialmente Tóxicos Totais	Analisado por ICP. A amostra previamente calcinada é adicionada à 10ml de solução digestora e processada no digestor de micro-ondas e posteriormente filtrada com água ultrapura.	TESSIER, 1979

Fonte: Os autores, 2024.

A especiação química de metais em sedimentos foi realizada operacionalmente, através do uso de sucessivos extratores, objetivando a liberação de espécies metálicas associadas aos sedimentos. Normalmente, em ecossistemas naturais, a biodisponibilidade de MPT para organismos vivos segue uma ordem decrescente, da primeira etapa para a última etapa de extração. A compreensão dos impactos ambientais de metais potencialmente tóxicos ocorre pelo estudo de sua especiação e das características dinâmicas de suas espécies químicas (Oliveira *et al.*, 2018).

A determinação quantitativa de metais potencialmente tóxicos biodisponíveis (Cu, Ni, Pb, Zn, As, Hg, Fe, Mn, Al, Cd, Co, Cr) por intermédio de extração sequencial e metais totais por extração em micro-ondas, utilizando solução digestora de HCl/HNO₃ (3:1) (Tessier, 1979). E quantificados utilizando o Espectrômetro de Plasma ICPE 9000 - Shimadzu.

Análises estatísticas

As análises estatísticas descritivas foram utilizadas para estudar o comportamento amostral do experimento, e para isso utilizou-se boxplot e o coeficiente de variação de Pearson para as análises físico-químicas, objetivando verificar a variabilidade dos dados obtidos nas coletas referentes aos meses de fevereiro, março, abril, agosto, setembro e outubro de 2022.

Nas análises estatísticas inferenciais, objetivando a extrapolação dos dados amostrais, realizaram-se análises Univariadas (Teste de normalidade de Shapiro Wilk W, Análise de variância e Tukey's pareado para dados paramétricos, e Kruskal-Wallis para dados não paramétricos) e multivariadas (Análises de agrupamentos (Dendrogramas) e análise de correlação de Pearson).

Diretrizes de qualidade de sedimentos

As diferentes diretrizes de qualidade de sedimentos consideradas nas análises (Tabela 2), foram as de concentração de efeito limite (TEC), que englobam a ERL (*Effect Range Low*) e TEL (*Threshold Effect Level*), que representam a concentração acima da qual espera-se baixos efeitos adversos e o limite de concentração de menor probabilidade de efeitos adversos a biota, respectivamente, e as de concentração de efeito provável (PEC), que inclui a ERM (*Effect Range Median*), que indica a concentração acima da qual ocorram moderados efeitos adversos, PEL (*Probable Effect Level*), que é o limite acima da qual há maior probabilidade de efeitos adversos e SEL (*Severe Effect Level*) que indica se o sedimento

está fortemente poluído, gerando efeitos adversos a maioria dos organismos (Macdonald *et al.*, 2000).

Tabela 2 – Diferentes diretrizes de qualidade dos sedimentos em relação aos MPTs.

Metais Potencialmente Tóxicos	ERL (mg/Kg)	ERM (mg/Kg)	TEL (mg/Kg)	PEL (mg/Kg)	SEL (mg/Kg)
As	33	85	5,9	17	33
Cd	5	9	0,59	3,53	10
Cr	80	145	37,3	90	110
Cu	70	390	35,7	197	110
Pb	35	110	35	91,3	250
Hg	0,15	1,3	0,174	0,486	2
Ni	30	50	18	36	75
Zn	120	270	123	315	820

Fonte: Adaptado de Macdonald et al. (2000).

Os parâmetros para MPTs utilizados pela Resolução CONAMA n° 454 são o TEL para o nível 1 e PEL para o nível 2, na classificação de sedimentos.

Resultados e discussões

O ponto amostral (A1) localiza-se próximo no perímetro urbano de Açailândia. A vegetação natural que ocupa as margens do corpo d'água é composta por árvores de porte médio e gramíneas. O ponto (A2) encontra-se no perímetro urbano, próximo à BR-222. A comunidade utiliza o local para atividades domésticas e recreação. O nível de erosão nas margens do ponto é moderado e a cobertura vegetal é parcial. A transparência da água é turva e o sedimento apresenta odor desagradável. É uma área diretamente impactada pelas siderúrgicas e tem característica lântica. O local (A3) é longe do perímetro urbano, recebe influência de atividades industriais devido ao fluxo natural do rio. As margens são cobertas em parte por uma vegetação densa e outra parte por alterações antrópicas industriais e a água tem característica turva.

Segundo a resolução n. 357, de 17 de março de 2005 do CONAMA, o rio se adequa à classe II de água doce (ao abastecimento de consumo humano após tratamento convencional e à recreação de contato primário, como a natação).

Determinação do potencial hidrogeniônico (pH) em H₂O e KCl, acidez potencial e Capacidade de Troca Iônica Efetiva (CTC) dos sedimentos do rio Água Branca-MA

Os parâmetros físico-químicos dos sedimentos são importantes para a análise da dinâmica dos metais, na fase coloidal (sedimento) e meio líquido (água do rio), tornando

indispensável na determinação da biodisponibilidade destes nos corpos hídricos, uma vez que há um equilíbrio entre as fases, na região intersticial.

Os potenciais hidrogeniônicos em H₂O e em KCl, variação do pH e acidez potencial, determinados nas coletas realizadas nos pontos a montante, local de influência direta e a jusante, estão relacionados na tabela 3. O pH do sedimento em água, na área de influência direta das indústrias de ferro gusa (A2), na região do Piquiá, do município de Açailândia-MA, apresentaram caráter ácido, nas coletas realizadas mensalmente, com exceção na sexta coleta, no mês de setembro de 2022, que registrou um caráter levemente básico. Nos pontos amostrais a montante (A1) e a jusante (A2), registraram uma menor amplitude total dos valores de pH em H₂O, quando comparado com o ponto na área de influência direta (A3). A maior variação do referido ponto amostral, é justificado devido a maior proximidade da região do Piquiá, onde estão localizadas as ferro gusas, aciaria e indústria de cimento.

O pH do sedimento em água, na área de influência direta das indústrias de ferro gusa (A2), na região do Piquiá, do município de Açailândia-MA, apresentaram caráter ácido, nas coletas realizadas mensalmente, com exceção na sexta coleta, no mês de setembro de 2022, que registrou um caráter levemente básico. Nos pontos amostrais a montante (A1) e a jusante (A2), registraram uma menor amplitude total dos valores de pH em H₂O, quando comparado com o ponto na área de influência direta (A3). A maior variação do referido ponto amostral, é justificado devido a maior proximidade da região do Piquiá, onde estão localizadas as ferro gusas, aciaria e indústria de cimento.

Tabela 3 – Dados relacionados ao pH em H₂O, pH em KCl, ΔpH e Acidez Potencial em sedimentos considerando o período chuvoso e não chuvoso no rio Água Branca (MA).

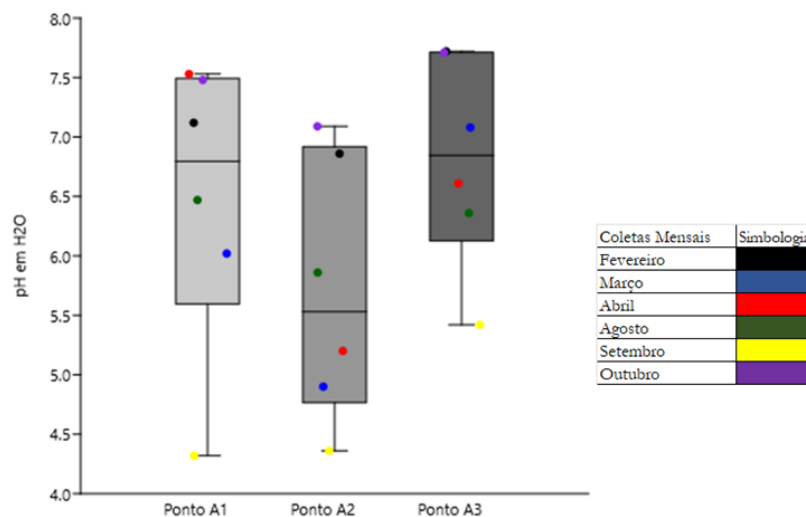
PONTOS AMOSTRAIS	Parâmetros Físico-Químicos	PERÍODO CHUVOSO			PERÍODO SECO		
		fev/22	mar/22	abr/22	ago/22	set/22	out/22
A1	pH em H ₂ O	7,12 ± 0,06	6,02 ± 0,03	7,53 ± 0,07	6,47 ± 0,02	4,32 ± 0,16	7,48 ± 0,02
	pH em KCl	6,37 ± 0,03	6,34 ± 0,18	7,29 ± 0,13	9,22 ± 0,10	6,07 ± 0,44	6,44 ± 0,01
	Δ pH	-0,75 ± 0,04	0,32 ± 0,11	-0,24 ± 0,10	2,75 ± 0,06	1,75 ± 0,29	-1,04 ± 0,01
	Acidez Potencial (cmol/Kg)	0,74 ± 0,09	0,79 ± 0,27	0,89 ± 0,18	0,53 ± 0,18	0,53 ± 0,18	0,79 ± 0,16
A2	pH em H ₂ O	6,86 ± 0,03	4,9 ± 0,09	5,2 ± 0,06	5,86 ± 0,17	4,36 ± 0,28	7,09 ± 0,46
	pH em KCl	5,04 ± 0,07	4,2 ± 0,07	4 ± 0,04	5,96 ± 0,05	5,02 ± 0,06	4,45 ± 0,06
	Δ pH	-1,82 ± 0,05	-0,7 ± 0,08	-1,19 ± 0,05	0,1 ± 0,11	0,67 ± 0,17	-2,64 ± 0,26
	Acidez Potencial (cmol/Kg)	1,85 ± 0,56	2,96 ± 0,33	2,69 ± 0,16	1,16 ± 0,24	1,32 ± 0,09	1,53 ± 0,24
A3	pH em H ₂ O	7,72 ± 0,01	7,08 ± 0,03	6,61 ± 0,07	6,36 ± 0,10	5,42 ± 0,13	7,71 ± 0,08
	pH em KCl	6,18 ± 0,03	7,25 ± 0,09	5,7 ± 0,09	9,46 ± 0,06	5,49 ± 0,05	6,51 ± 0,05
	Δ pH	-1,54 ± 0,02	0,17 ± 0,06	-0,91 ± 0,08	3,1 ± 0,09	0,07 ± 0,09	-1,2 ± 0,06
	Acidez Potencial (cmol/Kg)	4,12 ± 0,48	0,69 ± 0,09	0,74 ± 0,09	0,63 ± 0,16	1,53 ± 0,09	2,22 ± 0,16

Fonte: Os autores, 2024.

Os sedimentos que obtiveram o menor pH em água, portanto, maior caráter ácido, de todas as coletas realizadas, foi no mês de agosto de 2022, período seco na região estudada. E o de maior pH em água, foi na coleta realizada no mês de setembro de 2022. A grande variação do pH, em uma coleta sucessiva, sugere a ocorrência de um evento drástico neste período, podendo ter sido ocasionado por uma intensa ação antrópica nos locais estudados, uma vez que o índice pluviométrico médio registrado no período foi de 18,6 mm, ser muito baixo.

Os três pontos amostrais no rio Água Branca, nos seis períodos de coleta, apresentaram a medida mediana do pH na região ácida da escala de pH, sendo encontrado no ponto de influência direta, pH 5,5. Os demais pontos a jusante e montante obtiveram valores próximos a 6,7, tendo caráter levemente ácidos (Figura 2).

Figura 2 – Box plot do pH em H₂O relacionados as coletas de sedimentos nos pontos amostrais no rio Água Branca-MA.



Fonte: Os autores, 2024.

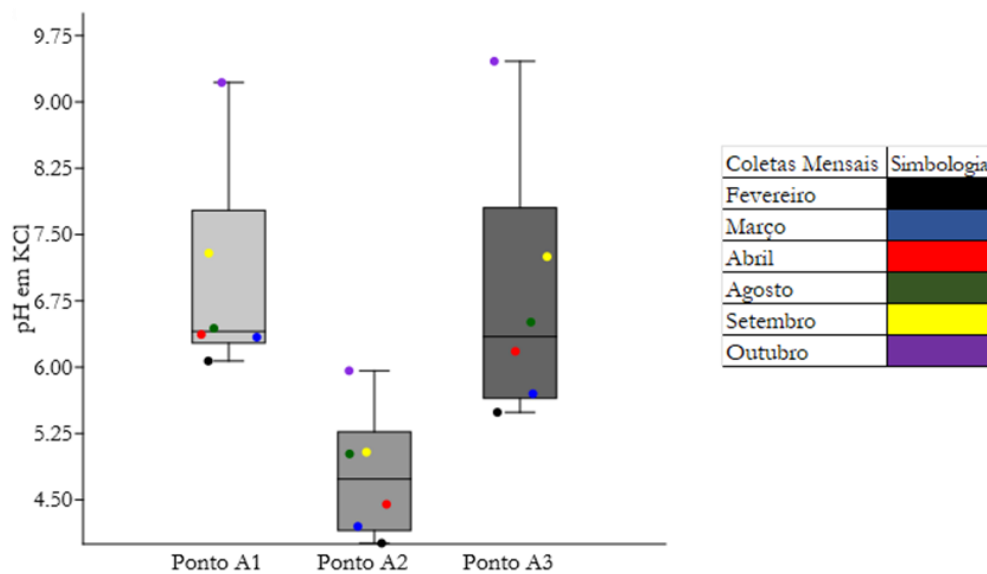
Os valores de pH em água, em relação às coletas nos pontos amostrais relacionados anteriormente, não apresentam diferenças significativas, ao nível de confiança de 0,05, segundo o teste estatístico Análise de Variância (ANOVA). Então, nas seis coletas realizadas, divididas em período chuvoso e não chuvoso, os valores determinados de pH não se alteraram significativamente. Embora os valores de pH do sedimento não variaram significativamente ($p > 0,05$), vale ressaltar que, em sua maioria, tiveram caráter ácido, o que o torna mais susceptível a biodisponibilidade dos metais potencialmente tóxicos, carregados para seu canal fluvial, por ação antrópica ou intempéries naturais.

O pH em KCl dos sedimentos coletados apresentou caráter ácido em quase todas as amostras analisadas, com exceção na coleta do mês de julho/2022, nos pontos a montante e jusante da área do Pequiá (Figura 3). Nos dados obtidos, a acidez do sedimento

na área de influência direta, em todo o período de coleta, foi elevada em nossos estudos, com média de 4,78 e desvio-padrão 0,71. Nas coletas realizadas, o ponto a jusante (A3) foi o que teve maior amplitude nos valores de pH em KCl (3,77), e o de menor variação, foi o ponto da área direta de influência, com 1,95, que sofre ação direta antrópica.

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi aplicado e atestou que, no ponto amostral A1 $p(\text{normal}) < 0.05$, os dados de pH (KCl) não seguem a distribuição normal, portanto, o teste estatístico para determinar se há diferença significativa entre os valores dos três pontos amostrais serão não paramétricos. Os valores das medianas do pH (KCl), em relação aos pontos amostrais analisados, apresentaram diferença significativa, no teste de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). O ponto amostral A2, apresentou diferença significativa entre os outros dois analisados. Ressaltando que esta área é que sofre maior influência da ação das atividades econômicas da região do Piquiá, Açailândia-MA.

Figura 3 – Box Plot do pH em KCl relacionados as coletas de sedimentos nos pontos amostrais no rio Água Branca (MA).

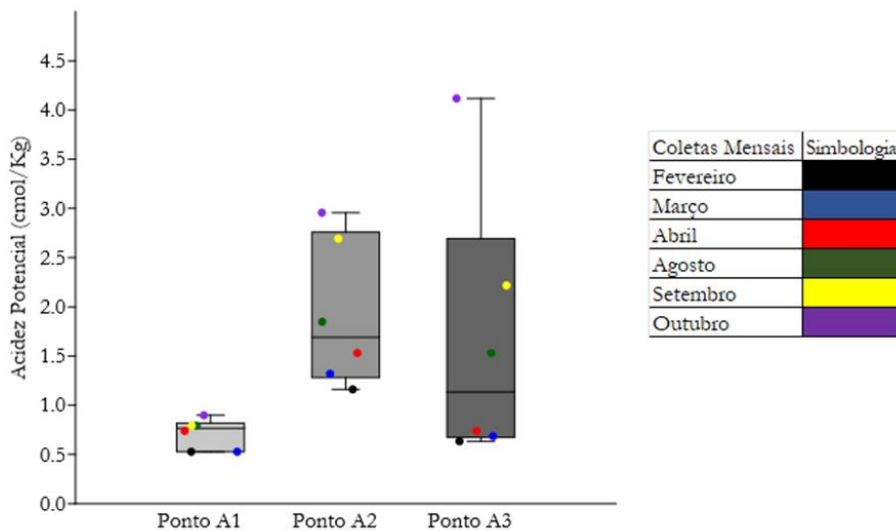


Fonte: os autores, 2024.

A variação entre os valores positivos e negativos observada nos ΔpH em um mesmo ponto amostral, denota elevada influência antrópica, oriundas de descargas de materiais com características iônicas, das indústrias de beneficiamento mineral (Fernandes *et al.*, 2008). A acidez potencial possui maior variação nos sedimentos no ponto a jusante (A3), e menor a montante do rio Água Branca (A1). O carreamento dos rejeitos minerais, oriundos das atividades antrópicas na região do Piquiá, impacta também o corpo hídrico à jusante do rio, podendo gerar esta grande variação nos dados analisados (Figura 4).

Nos pontos de coletas, considerando os períodos sazonais, apesar da divergência em seus valores, não houve diferença significativa na acidez potencial dos sedimentos analisados, uma vez que o teste de Análise de Variância obteve $p > 0,05$, após o teste de normalidade de Shapiro-Wilker $p > 0,05$.

Figura 4 – Box Plot da Acidez Potencial relacionados as coletas de sedimentos nos pontos amostrais no rio Água Branca (MA).



Fonte: Os autores, 2024.

A capacidade de troca de cátions efetiva (CTC) de um solo é um parâmetro importante no estudo da qualidade do solo, pois, varia de acordo com o pH, ajuda a determinar funções vitais como a respiração dos animais e a fotossíntese das plantas (Ferreira; Botelho, 1999). A CTC está intimamente ligada às concentrações dos íons trocáveis presentes na solução do solo e, portanto, é definida, como a capacidade máxima de retenção de cátions que o solo apresenta quando neutro ou a pH 7 e é expressa pela soma de bases mais alumínio trocável (Teixeira *et al.*, 2017).

Tabela 4 – Capacidade de Troca Catiônica efetiva dos sedimentos fluviais nos pontos amostrais no rio Água Branca (MA).

Pontos Amostrais	CTC efetiva (cmol/Kg ⁻¹)
A1	5,15 ± 0,38
A2	6,38 ± 0,65
A3	4,7 ± 0,5

Fonte: Os autores, 2024.

O ponto amostral localizado na área direta de influência das siderúrgicas (A2) possui a mais elevada capacidade de troca catiônica, indicando uma migração contínua nos sedimentos de íons positivos (cátions) provenientes de fontes externas. O CTC em todos

os sedimentos analisados possui valores elevados, indicando uma forte tendência de mobilidade dos metais entre a fase líquida e sólida que forma a suspensão coloidal do solo fluvial, potencializando a adsorção destes na interface entre os sistemas formados (Tabela 4).

O pH representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas do solo por meio da medição da presença de íons hidrogênio H^+ . O pH contribui para um maior ou menor grau de solubilidade das substâncias e define o potencial de toxicidade de vários elementos (Nogueira; Costa; Pereira, 2015). É uma das variáveis ambientais mais importantes, que tem influência na disponibilidade de nutrientes (Teixeira *et al.*, 2017).

Metais Potencialmente Tóxicos Totais

Os valores descritivos sintéticos das seis coletas de sedimentos fluviais realizadas nos meses de fevereiro, março, abril, agosto, setembro e outubro de 2022, no rio Água Branca, na região do Piquiá-MA, localizado na Amazônia Oriental Maranhense, nos três pontos amostrais (montante, área de influência direta e Jusante), relacionados aos 12 metais potencialmente tóxicos analisados, considerando a extração total destes íons (Tabela 5). As médias para Fe, Al, Cu e Mn foram as mais altas, e Hg e Cd as menores concentrações encontradas nas análises químicas, o que em estudos objetivando determinações de metais em sedimentos na Índia, obtiveram resultados idênticos, em que o Fe teve a maior média e o Cd a menor (Kumar *et al.*, 2020). Os desvios padrões amostrais maiores foram Fe, Al e Cu, e os menores Hg e Cd. O coeficiente de variação de Pearson, importante para quantificar a variabilidade das concentrações ao longo das coletas, obtiveram valores elevados devido à sazonalidade e tiveram as maiores estimativas o Zn, Ni, Cu e As, e as menores Co, Cr e Al.

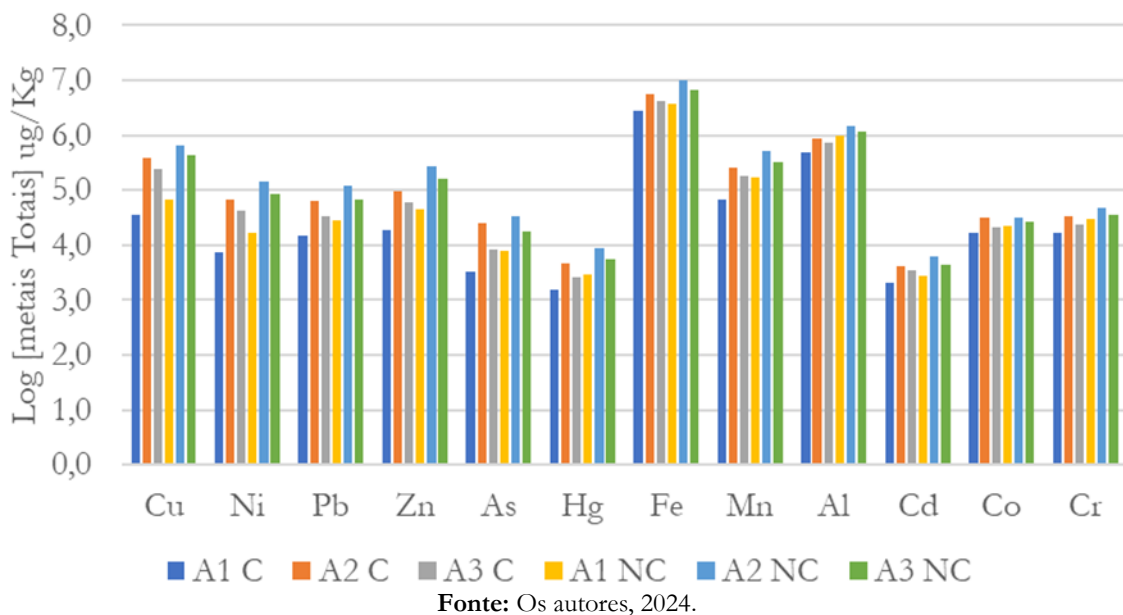
Tabela 5 – Estatística descritiva das concentrações de diferentes metais potencialmente tóxicos (MPTs) totais de amostras de sedimentos em mg/Kg do rio Água Branca- (MA).

	Min	Max	Média	Erro Padrão	Desvio Padrão	Coef. variação
Cu (n=6)	34,631	669,430	304,321	97,760	239,463	78,688
Ni (n=6)	7,313	143,662	60,097	20,505	50,226	83,576
Pb (n=6)	14,610	119,767	54,475	15,508	37,986	69,732
Zn (n=6)	19,211	271,285	109,115	38,213	93,602	85,784
As (n=6)	3,273	34,325	15,976	4,814	11,791	73,807
Hg (n=6)	1,494	8,818	4,309	1,081	2,647	61,418
Fe (n=6)	2749,392	9769,399	5506,106	1037,520	2541,394	46,156
Mn (n=6)	69,265	527,770	255,153	65,041	159,317	62,440
Al (n=6)	478,279	1456,350	953,908	140,645	344,509	36,116
Cd (n=6)	2,002	6,317	3,832	0,617	1,512	39,447
Co (n=6)	17,042	32,329	25,147	2,474	6,060	24,099
Cr (n=6)	17,171	46,657	31,184	4,151	10,167	32,605

Fonte: Os autores, 2024.

As concentrações médias de MPTs foram avaliadas em relação às coletas nos períodos chuvosos (C), referentes aos meses de fevereiro, março e abril e não chuvosos (NC), que foram os meses de agosto, setembro e outubro, após aplicação da função logarítmica, objetivando minimizar as grandes discrepâncias entre os valores obtidos (Figura 5). Os elementos metálicos analisados, todos tiveram maior concentração no período não chuvoso, devido ao menor fluxo de água no leito do rio, diminuindo assim a diluição e consequente dispersão (Zhang *et al.*, 2018). O comportamento quantitativo de todos os metais analisados, em relação aos pontos amostrais, a montante (A1) e jusante (A3), tiveram valores maiores na área de influência direta (A2), intermediários a jusante (A3) e menores a montante (A1), demonstrando que as atividades industriais e o desenvolvimento econômico geram poluentes que são introduzidos nos sistemas aquáticos através de diversas formas (erosão, lixiviação, produção de material particulados, aerossóis) poluindo os sedimentos fluviais (Parsons *et al.*, 2015).

Figura 5 – Concentração dos metais potencialmente tóxicos (MPTs) totais, em logaritmo, dos pontos amostrais no período chuvoso e não chuvoso do rio Água Branca (MA).



A classificação dos sedimentos com base nas diretrizes de qualidade expressos na Tabela 2, em relação as concentrações médias dos Metais Potencialmente Tóxicos (MPTs) na Tabela 3, do rio Água Branca, que excederam os parâmetros utilizados foram: ERL (Cu, Ni, Pb e Hg), ERM (Ni e Hg), TEL (Cu, Ni, Pb, As, Hg e Cd), PEL (Cu, Ni, Hg e Cd) e SEL (Cu e Hg). No trabalho realizado por Kumar *et al.* (2020), em sedimentos na Índia, encontrou para o ERL (Cu, Cd, Zn, Ni, Pb e Cr), o ERM (Cd, Ni e Cr), o TEL e PEL (Cd,

Pb, As e Cr). Valores similares aos encontrados, sendo diferente quando relacionado ao Hg e Cu no PEL.

A análise de correlação de Pearson foi utilizada para os diferentes MPTs analisados nos sedimentos (Tabela 6). Esta ferramenta estatística é importante para compreender a relação entre os MPTs presente nos sedimentos (Shirneshan *et al.*, 2013) e com isso identificar a origem da fonte geradora do poluente. O Fe, um dos principais elementos indicadores de poluição por atividade antrópica da região, devido à forte industrialização, objetivando a redução química para a produção de material para o mercado externo, demonstrou forte correlação positiva significativa ($p < 0,05$) com praticamente todos os metais analisados, com exceção do Al. Este comportamento indica que o tipo de fonte destes elementos é semelhante em relação a sua origem, proveniente da atividade industrial, e no caso do Alumínio, originário do próprio solo da região (Bai *et al.*, 2011). A alta correlação positiva significativa ($p < 0,05$) ocorreu entre todos os outros elementos, sendo assim originários de uma mesma fonte, com exceção do Alumínio, que mostrou menor correlação com os elementos analisados.

Tabela 6 – Análise de correlação de Pearson ($p < 0,05$) entre os metais potencialmente tóxicos totais em sedimentos superficiais do rio Água Branca- (MA).

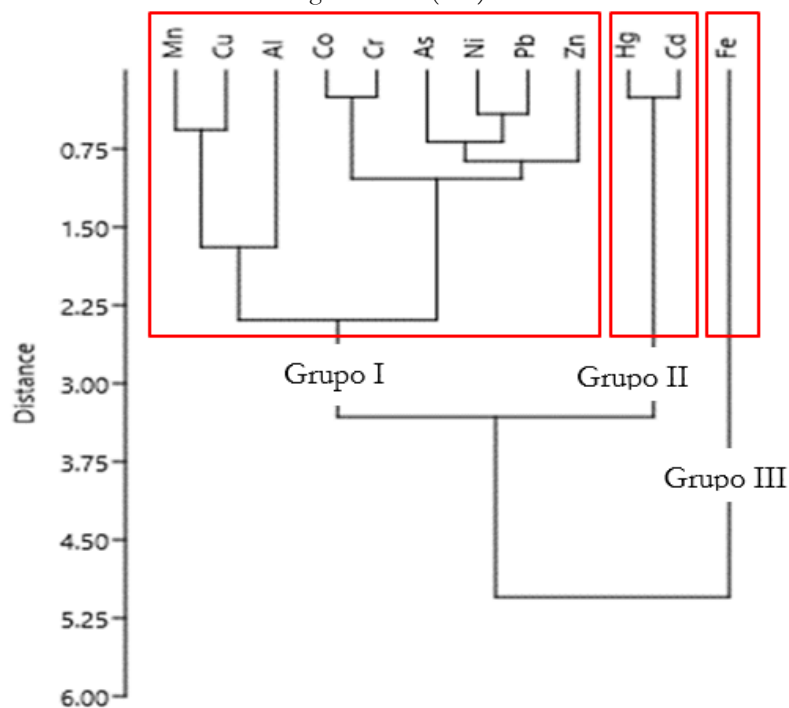
	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	Fe	Mn	Al	Cd	Co	Cr
Cu	1,000											
Ni	0,995	1,000										
Pb	0,952	0,974	1,000									
Zn	0,950	0,975	0,983	1,000								
As	0,997	0,999	0,969	0,968	1,000							
Hg	0,904	0,939	0,988	0,983	0,930	1,000						
Fe	0,940	0,966	0,988	0,992	0,962	0,986	1,000					
Mn	0,926	0,957	0,980	0,987	0,943	0,984	0,974	1,000				
Al	0,768	0,821	0,880	0,911	0,796	0,929	0,882	0,948	1,000			
Cd	0,970	0,986	0,989	0,982	0,983	0,965	0,987	0,971	0,849	1,000		
Co	0,901	0,916	0,963	0,905	0,913	0,941	0,916	0,921	0,812	0,927	1,000	
Cr	0,836	0,881	0,949	0,943	0,863	0,977	0,933	0,976	0,974	0,912	0,920	1,000

Fonte: Os autores, 2024.

A análise de agrupamento (cluster) dos metais potencialmente tóxicos dos sedimentos superficiais em relação aos pontos amostrais (montante, área de influência direta e jusante) englobam o período chuvoso e não chuvoso (Figura 6). Essa gerou três grupos bem definidos, que apresentam distribuições semelhantes, ao longo do rio, que são: Grupo I (Mn, Cu, Al, Co, Cr, As, Ni, Pb e Zn); Grupo II (Hg e Cd) e Grupo III (Fe). Elementos pertencentes ao mesmo grupo possuem características e fontes de poluição semelhantes (Voza *et al.*, 2015). O Fe apresenta esta diferença em relação aos demais,

devido a sua elevada concentração, por isso está somente ele no Grupo III. O Grupo I engloba a maior parte dos MPTs estudado e Cd e Hg estão no Grupo II. A comparação entre índices de poluição relacionados a MPTs em sedimentos no rio Brisbane, na Austrália, o dendrograma formado classificou em 3 grupos, sendo que os elementos analisados no Grupo I (Cr, As), Grupo II (Mn, Al, Co, Ni, Fe), Grupo III (Cu, Pb, Zn, Hg, Cd), considerando que as características das atividades antrópicas ao longo do rio, são distintas em relação ao rio Água Branca, assim como a densidade demográfica (Duodo *et al.*, 2016).

Figura 6 – A análise de agrupamento dos metais potencial tóxicos totais dos sedimentos superficiais do rio Água Branca (MA).



Fonte: Os autores, 2024.

Metais Potencialmente Tóxicos Biodisponíveis

A estatística descritiva foi utilizada para sintetizar os valores das concentrações de Metais Potencialmente Tóxicos (MPTs) Biodisponíveis em relação as seis coletas realizadas (Tabela 7). O teor de Fe, Mn e Al, nos sedimentos analisados, foram os maiores e, Cd e Hg, os menores valores encontrados. Os metais que obtiveram maior Coeficiente de Variação de Pearson, indicando maiores alterações durante o tempo em que as coletas foram sendo realizadas, proveniente da sazonalidade amostral, sendo o Zn e o Hg com maiores valores, e os que menos variaram foi o Cd e o Cr.

Os teores de Fe e Mn em sedimentos fluviais são bastante elevados na bacia do rio Paraopeba, na região de Brumadinho-MG (Terêncio *et al.*, 2023) e, após o rompimento da

barragem, um levantamento toxicogênico nos sedimentos constatou uma elevada concentração de metais, causadores de efeitos citogênicos (Souza *et al.*, 2021), como os encontrados no rio Água Branca.

Tabela 7 – Estatística descritiva das concentrações de diferentes metais potencialmente tóxicos (MPTs) biodisponíveis (mg/Kg) em amostras de sedimentos em do rio Água Branca (MA).

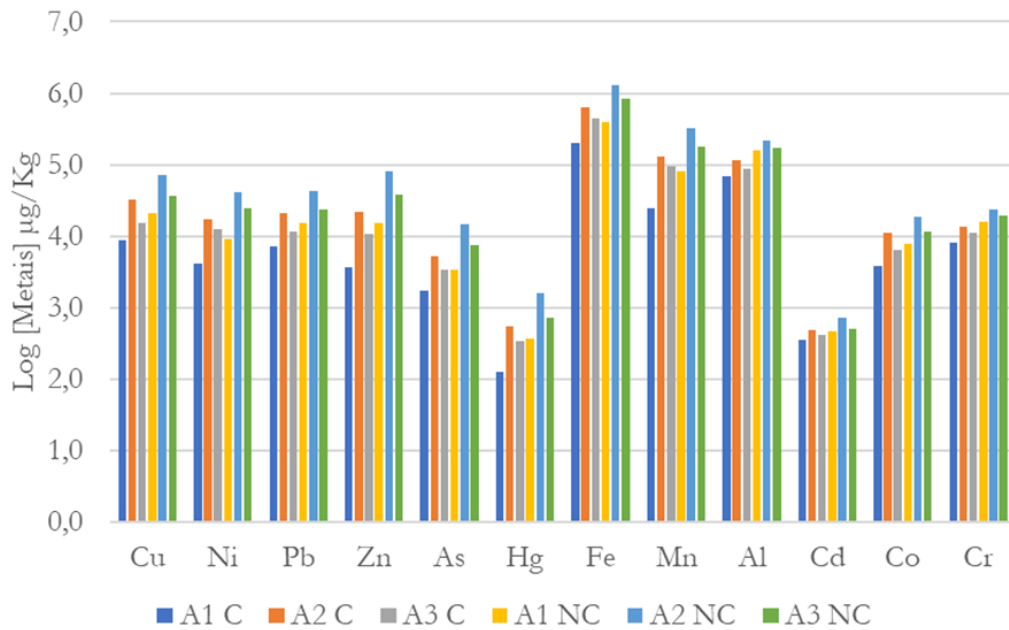
Metais Potencialmente Tóxicos	Min	Max	Média	Erro Padrão	Desvio Padrão	Coef. variação
Cu (n=6)	8,858	71,113	30,884	9,116	22,331	72,305
Ni (n=6)	4,044	41,172	18,187	5,426	13,291	73,077
Pb (n=6)	7,061	43,124	20,172	5,185	12,7	62,957
Zn (n=6)	3,591	79,171	28,039	11,27	27,606	98,456
As (n=6)	1,704	14,438	5,92	1,879	4,602	77,731
Hg (n=6)	0,126	1,577	0,612	0,21	0,514	83,929
Fe (n=6)	204,38	1308,53	638,966	161,155	394,748	61,779
Mn (n=6)	24,955	327,265	139,22	43,163	105,727	75,943
Al (n=6)	67,734	213,626	135,129	22,579	55,308	40,93
Cd (n=6)	0,353	0,716	0,487	0,051	0,124	25,416
Co (n=6)	3,855	18,776	9,907	2,14	5,242	52,909
Cr (n=6)	8,211	23,991	15,362	2,349	5,754	37,455

Fonte: Os autores, 2024.

As concentrações dos metais biodisponíveis analisados com a utilização da função logarítmica, para que não houvesse intensa disparidade, devido há alguns valores serem bem diferentes em ordem de grandeza, estão representadas na Figura 7. Nos pontos amostrais considerados (A1C, A2 C, A3 C, A1 NC, A2 NC e A3 NC), onde C representa período chuvoso e NC período não chuvoso, o teor dos metais são maiores no período seco, por causa da menor quantidade de água e da alteração da dinâmica do fluido. Considerando os locais de coleta, as concentrações dos metais foram maiores na área de influência direta, e a jusante, estando a montante os de menores teores.

Na análise de sedimentos do rio Eufrates, por exemplo, as concentrações dos metais investigados tiveram comportamento semelhante, pois, no período chuvoso, o teor diminuiu em comparação com o período não chuvoso (Salah *et al.*, 2012). Na região de Brumadinho, as concentrações de Al, Fe e Mn, foram geralmente menores no período chuvoso em relação à estação seca, assim como, registrou declínio de montante à jusante (Pacheco *et al.*, 2022).

Figura 7 – Concentração dos metais potencialmente tóxicos (MPTs) biodisponíveis, em Logaritmo, dos pontos amostrais no período chuvoso e não chuvoso do rio Água Branca (MA).



Fonte: Os autores, 2024.

A análise de correlação de Pearson para os metais potencialmente tóxicos (MPTs) biodisponíveis, em sedimentos do rio Água Branca-MA (Tabela 8), demonstrou forte interação positiva significativa ($p < 0,05$) para a maioria dos elementos, com exceção do Al, que apresentou a mais baixa correlação. O Fe, elemento com maior percentual quantitativo na Hematita (Fe_2O_3), oriundo de Carajás-PA, apresentou correlação forte com Cu, Ni, Pb, Zn, As, Hg, Mn, Cd, Co e Cr, com a exceção do Al.

Tabela 8- Análise de correlação de Pearson ($p < 0,05$) entre os metais potencialmente tóxicos biodisponíveis em amostras de sedimentos superficiais do rio Água Branca (MA).

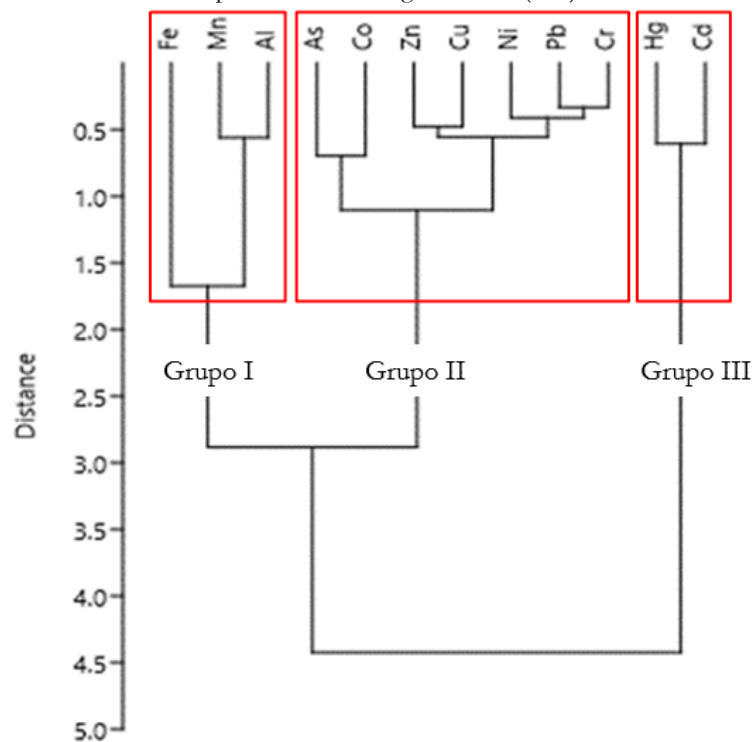
	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	Fe	Mn	Al	Cd	Co	Cr
Cu	1,000											
Ni	0,978	1,000										
Pb	0,999	0,977	1,000									
Zn	0,987	0,981	0,988	1,000								
As	0,981	0,989	0,979	0,989	1,000							
Hg	0,992	0,983	0,993	0,995	0,993	1,000						
Fe	0,984	0,998	0,982	0,980	0,983	0,981	1,000					
Mn	0,985	0,997	0,987	0,989	0,991	0,992	0,995	1,000				
Al	0,862	0,831	0,876	0,875	0,803	0,851	0,849	0,856	1,000			
Cd	0,984	0,951	0,990	0,977	0,960	0,985	0,956	0,971	0,893	1,000		
Co	0,993	0,974	0,993	0,967	0,962	0,975	0,985	0,979	0,864	0,974	1,000	
Cr	0,918	0,913	0,927	0,930	0,881	0,911	0,925	0,926	0,983	0,926	0,922	1,000

Fonte: Os autores, 2024.

A avaliação da contaminação de metais em sedimentos no lago de Itaipu, encontrou correlações positivas significativa ($p < 0,05$) para Cu-Mn, Fe-Mn, Cu-Ni, Cr-Pb, Fe-Pb e baixa correlação para Cr-Zn, Mn-Zn (Belo; Quináia, 2010). Na determinação da concentração de metais pesados no lago Água Preta-PA, a correlação positiva mais forte entre os metais foi para Cu-Cd, Pb-Cd, Cr-Ni, Pb-Cu (Oliveira *et al.*, 2018).

A resolução nº 420, do CONAMA, foi utilizada como diretriz da qualidade dos sedimentos em relação aos Metais Potencialmente Tóxicos Biodegradáveis. A concentração referente ao Hg para prevenção requer que seja maior que 0,5 mg/Kg, e a média encontrada nas análises do sedimento superficial do rio Água Branca-MA foi superior a este valor de referência, indicando que a disposição de resíduos ultrapassou o limite que a legislação permite, sendo por isso classificado como classe II, requerendo assim avaliação do órgão ambiental do estado.

Figura 8 - A análise de agrupamento dos metais potencial tóxicos biodisponíveis em amostras de sedimentos superficiais do rio Água Branca (MA)



Fonte: Os autores, 2024.

A análise de agrupamento dos metais biodisponíveis demonstrou a formação de 3 grupos distintos, sendo o Grupo I (Fe, Mn e Al), o Grupo II (As, Co, Zn, Cu, Ni, Pb e Cr) e Grupo III (Hg e Cd), representado na Figura 8. As diferenças das concentrações encontradas entre os metais, suas características físico-químicas (solubilidade em meio aquoso, afinidades químicas com o sedimento e potenciais de óxido-redução) e químicas

(reatividade dos diferentes sais e hidróxidos formados e cargas formais) tiveram papel importante na distribuição dos grupos.

Considerações Finais

As variáveis físico-químicas analisadas nos sedimentos mostraram variações durante o período de coleta. O pH em H₂O apresentaram em sua maioria caráter ácido, sendo no ponto de ação direta das ferro-gusa, os de maiores acidez, favorecendo a biodisponibilidade dos metais no meio hídrico, aumentando sua toxicidade. O comportamento do pH em KCl apresentou padrão similar ao determinado em água. A acidez potencial foi maior na área de influência e a jusante das atividades industriais instaladas na região, devido à área mais impactada pelo carreamento de efluentes e material particulado pelas indústrias. As capacidades de troca iônica apresentaram valores elevados, indicando susceptibilidade ao fluxo de íons metálicos entre o meio sólido e aquoso.

As concentrações dos metais potencialmente tóxicos totais tiveram coeficientes de variações de Pearson elevadas, indicando forte influência da sazonalidade das coletas relacionadas ao período chuvoso e não chuvoso, e as diferenças entre os locais de coleta. Em relação às diretrizes de qualidade, foram encontradas concentrações dos elementos metálicos Cu, Ni, Hg e Cd acima dos limites preconizados, podendo ter elevado impacto no ecossistema aquático. Os resultados das análises de correlação entre os metais demonstram relação forte praticamente entre todos os elementos químicos estudados, indicando a mesma fonte de poluição, que é oriunda do beneficiamento do minério de ferro, na região do Piquiá.

O rio Água Branca é utilizado pela população do entorno para recreação e pesca de subsistência, e possui em seu sedimento uma elevada carga de metais potencialmente tóxicos, que potencializa a contaminação do corpo hídrico, podendo acarretar problemas ao ecossistema aquático e à saúde da população, através da contaminação pelo contato com a pele, ingestão de água ou alimentos.

Agradecimentos

Ao DINTER da Universidade do Vale do Itajaí-UNIVALI/Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão/UEMASUL.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Conjecturas dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**. Brasília: ANA, 2015.

AHMED, Fahad [et al.]. Spatial distribution and source identification of heavy metal pollution in roadside surface soil: a study of Dhaka Aricha highway, Bangladesh.

Ecological processes, v. 5, p. 1-16, 2016. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1186/s13717-016-0045-5>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ALIZADEH, Mohamad Javad [et al.]. Toward multi-day-ahead forecasting of suspended sediment concentration using ensemble models. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 28017-28025, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0405-4>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

BAI, Junhong [et al.]. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China. **Ecological modelling**, v. 222, n. 2, p. 301-306, 2011. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.12.002>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

BASSO, Luis Alberto; SILVA, Mariluci Wegner da. A qualidade da água na bacia hidrográfica do arroio do Salso e sua relação com a pluviometria. **Boletim Gaúcho de Geografia**, Porto Alegre, v. 40, n. 1-2, p. 254-267, 2013.

BELO, Andressa; QUINÁIA, Sueli Pércio; PLETSCHE, Adelmo Lowe. Avaliação da contaminação de metais em sedimentos superficiais das praias do lago de Itaipu. **Química Nova**, v. 33, p. 613-617, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000300024>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA** n° 454, de 01/11/2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA** n° 420, de 28/12/2009.

CALLISTO, Marcos; GONÇALVES JR, José Francisco; MORENO, Pablo. Invertebrados aquáticos como bioindicadores. **Navegando o Rio das velhas das Minas aos Gerais**, v. 1, p. 1-12, 2005.

DOS SANTOS CARDOSO, Renata; NOVAES, Camila Pontin. Variáveis limnológicas e macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores de qualidade da água. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 1, n. 5, 2013. Disponível em:

<<https://doi.org/10.17271/23188472152013510>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

COIMBRA, Keyla Thayrinne Oliveira; ALCÂNTARA, Enner; DE SOUZA FILHO, Carlos Roberto. Satellite evidence for pervasive water eutrophication in the Doce River reservoirs following the collapse of the Fundao dam in Brazil. **Environmental Pollution**, v. 272, p. 116014, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116014>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

CORAZZA, Rosana; PEREIRA FILHO, Waterloo; BASSO, Luis Alberto. Influência da precipitação pluviométrica nas características espectrais e limnológicas do reservatório Dona Francisca e do Lago Guaíba, Rio Grande do Sul. **Para onde?**, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 1-11, ago./dez. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.22456/1982-0003.49925>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

DUODU, Godfred Odame; GOONETILLEKE, Ashantha; AYOKO, Godwin A. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment. **Environmental pollution**, v. 219, p. 1077-1091, 2016.

FERNANDES, Josely D. et al. Ponto de efeito salino nulo e cargas elétricas de solos do estado da Paraíba. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 2, n. 2, p. 147-155, 2008.

FERREIRA, Frederico Fernandes et al. Impacts of the Samarco tailing dam collapse on metals and arsenic concentration in freshwater fish muscle from Doce River, southeastern Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 622-630, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ieam.4289>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

FERREIRA, W. de A.; BOTELHO, S. M. Capacidade de troca de cátions das principais classes de solos da Amazônia, determinada a diferentes valores de pH. **Embrapa Amazônia Oriental**, Belém, p. 22, 1999.

FIKET, Željka [et al.]. Pour water geochemistry and diagenesis of estuary sediments—an example of the Zrmanja River estuary (Adriatic coast, Croatia). **Journal of soils and sediments**, v. 19, p. 2048-2060, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11368-018-2179-9>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

FISCHER, Sandra [et al.]. Microbial Sulfate Reduction (MSR) as a Nature-Based Solution (NBS) to Mine Drainage: Contrasting Spatiotemporal Conditions in Northern Europe. **Water Resources Research**, v. 58, n. 4, p. e2021WR031777, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2021WR031777>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

HAMILTON, Andrew K. [et al.]. Seasonal turbidity linked to physical dynamics in a deep lake following the catastrophic 2014 Mount Polley mine tailings spill. **Water Resources Research**, v. 56, n. 8, p. e2019WR025790, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2019WR025790>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

IBGE. **População no último censo 2022**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/acailandia/panorama>>. Acessado em: 13/01/2023.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS CARTOGRÁFICOS. **Relatório Técnico de Recursos Hídricos Superficiais**: hidrografia e hidrologia do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Maranhão (ZEE) – Etapa Bioma Amazônico. São Luis: IMESC, 2019.

KORMOKER, Tapos [et al.]. Toxic metals in agricultural soils near the industrial areas of Bangladesh: ecological and human health risk assessment. **Toxin reviews**, v. 40, n. 4, p. 1135-1154, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15569543.2019.1650777>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

KÜKRER, Serkan [et al.]. Historical record of metals in Lake Küçükçekmece and Lake Terkos (Istanbul, Turkey) based on anthropogenic impacts and ecological risk assessment. **Environmental Forensics**, v. 20, n. 4, p. 385-401, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15275922.2019.1657985>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

KUMAR, Vinod [et al.]. A review of ecological risk assessment and associated health risks with heavy metals in sediment from India. **International Journal of Sediment Research**, v. 35, n. 5, p. 516-526, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.03.012>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LI, Qiang [et al.]. Effects of sediment dredging on heavy metal removal in dianchi lake, China. **Advanced Materials Research**, v. 726, p. 1654-1658, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.726-731.1654>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LIMA, Isabela Farias [et al.]. de Análise Da Paisagem Aplicada a Bacia Do Rio Gurupi Pa/Ma. **Proceedings of the XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, Brazil, 2017. p. 1-8.

LIU, Yang [et al.]. Role of biodiversity in the biogeochemical processes at the water-sediment interface of macroporous river bed: An experimental approach. **Ecological Engineering**, v. 103, p. 385-393, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.049>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MACDONALD, Donald D.; INGERSOLL, C. G.; BERGER, T. A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. **Archives of environmental contamination and toxicology**, v. 39, p. 20-31, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s002440010075>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MANCINI, Roberto Martins; CARNEIRO, Marcelo Sampaio. Desenvolvimento industrial e mercado de trabalho: contestação social e transformações recentes na produção siderúrgica na Amazônia Oriental. **Caderno CRH**, v. 31, p. 373-387, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-49792018000200013>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

NASCIMENTO, R. L. X. Bacias hidrográficas Gurupi. **Codevasf**. 2021. Disponível em: <<https://www.codevasf.gov.br/area-de-atuacao/bacia-hidrografica/gurupi>>. Acesso em: 8 dez. 2023.

NASCIMENTO, Alana Rayza Vidal Jerônimo do; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo do; CUNHA, Karina Patrícia Vieira da. Solos de minas de scheelita como fontes de contaminação por metais pesados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, p. 555-556, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522020179736>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

NOGUEIRA, Fábio F.; COSTA, Isabella A.; PEREIRA, Uendel A. Análise de parâmetros físico-químicos da água e do uso e ocupação do solo na sub-bacia do Córrego da Água Branca no município de Nerópolis–Goiás. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

OLIVEIRA, Gilmar Maureline Teles Silva de et al. Concentrações de metais pesados nos sedimentos do lago Água Preta (Pará, Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23,

p. 599-605, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522018152875>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ONU. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 25 jan. 2024.

PACHECO, Fernando António Leal [et al.]. Prognosis of metal concentrations in sediments and water of Paraopeba River following the collapse of B1 tailings dam in Brumadinho (Minas Gerais, Brazil). **Science of The Total Environment**, v. 809, p. 151157, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151157>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

PARSONS, Anthony J. [et al.]. Introduction to special issue on connectivity in water and sediment dynamics. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 9, p. 1275-1277, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/esp.3714>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SALAH, Emad A. Mohammad [et al.]. Assessment of heavy metals pollution in the sediments of Euphrates River, Iraq. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 4, n. 12, p. 1009, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2012.412117>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SHIRNESHAN, Golshan [et al.]. Significant correlation of Cd, Cu, Pb and Zn in sediments and oysters (*Saccostrea cucullata*) collected from Qeshm Island, Persian Gulf, Iran. **Chemical Speciation & Bioavailability**, v. 25, n. 4, p. 291-302, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.3184/095422913X13841829469785>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

DA SILVA SOUZA, Tatiana [et al.]. Cytogenotoxicity of the water and sediment of the Paraopeba River immediately after the iron ore mining dam disaster (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 775, p. 145193, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145193>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TAŞ, B. [et al.]. Benthic algal diversity and water quality evaluation by biological approach of Turnasuyu Creek, NE Turkey. **Desalination and water treatment**, v. 155, p. 402-415, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2019.24225>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise do Solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: **Embrapa**, 2017. 574 p. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TERÊNCIO, Daniela Patrícia Salgado et al. The Igarapé Weir decelerated transport of contaminated sediment in the Paraopeba River after the failure of the B1 tailings dam (Brumadinho). **International Journal of Sediment Research**, v. 38, n. 5, p. 673-697, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2023.06.004>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TESSIER, A. P. G. C.; CAMPBELL, Peter GC; BISSON, M. J. A. C. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. **Analytical chemistry**, v. 51, n. 7,

p. 844-851, 1979. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ac50043a017>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

VAROL, Memet; ŞEN, Bülent. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey. **Catena**, v. 92, p. 1-10, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.011>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

VOZA, Danijela [et al.]. Application of multivariate statistical techniques in the water quality assessment of Danube river, Serbia. **Archives of Environmental Protection**, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1515/aep-2015-0044>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ZHANG, Zhaoxue [et al.]. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China. **Science of the Total Environment**, v. 645, p. 235-243, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.026>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

Como citar:

ABNT

ALMEIDA JÚNIOR, J. P. de [et al.]. Distribuição de metais potencialmente tóxicos nos sedimentos do rio Água Branca: influência da atividade antrópica no Pólo Industrial de Piquiá, Açailândia-MA, no leste da Amazônia brasileira. **Interespaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 12, n. 01, e23171, 2026. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18764/2446-6549.e23171>>. Acesso em: 28 jun. 2026.

APA

Almeida Júnior, J. P. de [et al.]. Distribuição de metais potencialmente tóxicos nos sedimentos do rio Água Branca: influência da atividade antrópica no Pólo Industrial de Piquiá, Açailândia-MA, no leste da Amazônia brasileira. *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, v. 12, n. 01, e23171, 2026. Recuperado em 28 junho, 2026, de <http://dx.doi.org/10.18764/2446-6549.e23171>



This is an open access article under the CC BY Creative Commons 4.0 license.
Copyright © 2026, Universidade Federal do Maranhão.

