

ANÁLISE GEOQUÍMICA E AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS NOS SEDIMENTOS DE FUNDO DA BACIA DO RIO PIAUÍ (MG), INSERIDA NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL DO BRASIL.

Geochemical analysis and evaluation of contamination by potentially toxic elements in bottom sediments of the Piauí river basin (mg), situated within Brazil's eastern pegmatite province

Lilyan de Almeida Cunha

Engenheira Geóloga e Mestranda em Geologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

lilyan.cunha@ufvjm.edu.br

Hernando Baggio Filho

Doutor em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais, Professor do Departamento de Geografia e do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

hbaggio@ufvjm.edu.br

Iago Cordeiro Godinho

Licenciado em Geografia e Mestrando em Geologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

iago.cordeiro@ufvjm.edu.br

Julielem Caroline Souza

Geógrafa e Mestre em Geologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

caroline.julielem@ufvjm.edu.br

Frank Alison de Carvalho

Mestre em Saúde, Sociedade e Ambiente, Doutorando em Ciência Florestal pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

frank.carvalho@ufvjm.edu.br

Kelviana de Cassia Ramalho

Bacharela em Ciência e Tecnologia e Graduanda em Engenharia Geológica pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

kelviana.ramalho@ufvjm.edu.br

Letícia Antunes Melo Santos

Licenciada em Geografia e Mestranda em Geologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

antunes.leticia@ufvjm.edu.br

Recebido: 05/07/2025

Aceito: 15/08/2025

Resumo

A análise geoquímica dos sedimentos de fundo fornece informações sobre a qualidade dos ecossistemas aquáticos e os impactos das atividades antrópicas nas bacias hidrográficas. A bacia do rio Piauí, localizada entre os municípios de Itaípe e Araçuaí, em Minas Gerais, encontra-se inserida na Província Pegmatítica Oriental do Brasil, onde se concentram importantes empreendimentos minerários. Este estudo teve como principal objetivo investigar as possíveis fontes de contribuição natural e antropogênica dos elementos potencialmente tóxicos (EPTs) presentes nos sedimentos de fundo. Para isso, foram realizadas duas campanhas de amostragem em 13 pontos pré-determinados, uma amostragem no período seco e outra no período úmido, nos anos de 2022 e 2023, respectivamente. A partir das técnicas analíticas de Espectrometria de Absorção Atômica (EAA) e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X por Energia Dispersiva (EDXRF), foram detectadas concentrações dos metais Pb, Cr, Cu e Zn. Os resultados foram comparados com as Resoluções CONAMA nº 420/2009, CONAMA nº 454/2012 e com a Deliberação Normativa COPAM nº 166/2011, que apontaram assinaturas geoquímicas de ordem natural, como composição litológica da bacia, intemperismo de rochas ricas em minerais metálicos e a dinâmica hidrológica associada às variações sazonais da vazão, e de ordem antropogênica, como exploração minerária, uso de fertilizantes e defensivos agrícolas.

Palavras-chave: Elementos Potencialmente Tóxicos, Geoquímica, Província Pegmatítica Oriental do Brasil, Rio Piauí, Sedimentos de fundo.

Abstract

The geochemical analysis of bottom sediments provides information on the quality of aquatic ecosystems and the impacts of anthropogenic activities on river basins. The Piauí River basin, located between the municipalities of Itaípe and Araçuaí, in the state of Minas Gerais, is part of the Eastern Pegmatitic Province of Brazil, which hosts significant mining ventures. The main objective of this study was to investigate the potential natural and anthropogenic sources contributing to the presence of potentially toxic elements (PTEs) in bottom sediments. Two sampling campaigns were conducted at 13 predetermined locations, one during the dry season and another during the wet season, in the years 2022 and 2023, respectively. Using Atomic Absorption Spectrometry (AAS) and Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF), concentrations of Pb, Cr, Cu, and Zn were detected. The results were compared with Brazilian environmental standards: CONAMA Resolutions No. 420/2009 and No. 454/2012, and COPAM Normative Deliberation No. 166/2011. The data indicated both natural geochemical signatures, such as the basin's lithological composition, weathering of metal-rich rocks, and seasonal hydrological dynamics, and anthropogenic contributions, including mining activities, and the use of fertilisers and agrochemicals.

Keywords: Potentially Toxic Elements, Geochemistry, Eastern Brazilian Pegmatitic Province, Piaui River, Bottom sediments.

1. INTRODUÇÃO

A Província Pegmatítica Oriental do Brasil, inserida no contexto do Orógeno Araçuaí e estendendo-se pelo Vale do Jequitinhonha (MG), constitui uma das mais importantes províncias mineralógicas do país, destacando-se pela concentração de corpos pegmatíticos do tipo LCT, que corresponde aos elementos lítio, cério e tântalo (Pedrosa-Soares; Chaves; Scholz, 2009). Ainda segundo os autores, essa província abriga inúmeros empreendimentos minerários com foco em exploração de gemas, como turmalina, berilo, espodumênio, topázio e variedades ornamentais de quartzo. Além dos recursos gemológicos, apresenta potencial metalogenético, com ênfase na produção de elementos estratégicos como lítio, tântalo, estanho e nióbio.

A atividade minerária no Vale do Jequitinhonha, apesar de sua relevância econômica, está associada a uma série de problemas ambientais e sociais. Ambientalmente, a mineração pode causar desmatamento, degradação do solo, poluição hídrica e alteração da fauna e flora locais. Esses desafios tornam evidente a necessidade de estudos que integrem a análise dos impactos naturais e antropogênicos sobre os recursos naturais finitos (Silva; Andrade, 2017).

Os elementos potencialmente tóxicos (EPTs) ou metais pesados, como eram designados, são classificados com base em suas propriedades químicas, toxicidade e comportamento ambiental, correspondendo a elementos de elevada massa molar e densidade superior a 5 g/cm³ (Duffus, 2002). Elementos como chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), cromo (Cr), cobre (Cu) e zinco (Zn) enquadram-se nessa classificação devido seu potencial de bioacumulação e toxicidade em organismos vivos (Alloway, 2013).

A introdução de elementos potencialmente tóxicos em sistemas aquáticos pode gerar impactos significativos, afetando a qualidade da água, dos sedimentos e dos organismos que habitam esses ecossistemas. Esses elementos podem ser transportados e acumulados nos sedimentos de fundo, que atuam como reservatórios de poluição, liberando contaminantes para a coluna d'água sob condições físico-químicas específicas e aumentando os riscos de bioacumulação na cadeia trófica (Förstner; Wittmann, 1981). Esses sedimentos, compostos predominantemente por partículas de silte e argila depositadas no leito ativo das drenagens, refletem processos de degradação natural e antrópica e constituem importantes marcadores da dinâmica hídrica ao longo do tempo (Lins, 2003).

Atividades como mineração, seja mecanizada ou manual, práticas agrícolas inadequadas e mudanças no uso e na ocupação da terra estão entre as principais fontes de impactos negativos, representando riscos significativos ao meio ambiente e à saúde pública (Brasil, 2009, 2012; Minas Gerais, 2011). Além disso, fatores climáticos, como o fenômeno *El Niño*, também podem afetar a dinâmica sedimentar (Silva, 2018). No Brasil, as Resoluções CONAMA nº 420/2009 e nº 454/2012, bem como a Deliberação Normativa COPAM nº 166/2011, estabelecem critérios e valores de referência amplamente utilizados para avaliar a qualidade do solo e dos sedimentos, como também identificar a presença de substâncias potencialmente contaminantes (Brasil, 2009, 2012; Minas Gerais, 2011). Embora essas normativas tenham sido originalmente desenvolvidas para solos, seus valores orientadores podem ser aplicados em estudos que abordam a temática de geoquímica de sedimentos fluviais, considerando-se as interações químicas.

Considerando a relevância econômica da Província Pegmatítica Oriental do Brasil no Vale do Jequitinhonha, onde a área de estudo está inserida, este artigo teve como objetivo avaliar as características geoquímicas dos sedimentos de fundo do rio Piauí, aplicando técnicas e métodos da geoquímica ambiental. A investigação buscou identificar e quantificar a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) e associá-los aos fatores naturais e antropogênicos que impactam a qualidade dos sedimentos, comparando os resultados com as normativas ambientais vigentes no Brasil e no estado de Minas Gerais.

2. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Piauí está localizada no Vale do Jequitinhonha, nordeste do estado de Minas Gerais, abrangendo os municípios de Itaípe, Caraí, Novo Cruzeiro, Araçuaí e Itinga, conforme mostra a Figura 1. Suas nascentes estão situadas em Itaípe, nos planaltos cristalinos, a uma altitude de 1.000 metros, e sua foz se encontra no rio Jequitinhonha, entre Araçuaí e Itinga, a aproximadamente 270 metros de altitude. O rio Piauí possui uma extensão de 110 km, orientado no sentido NNW – SSE, sendo um afluente do rio Jequitinhonha pela margem direita, sua bacia ocupa uma área de aproximadamente 1.172 km², com coordenadas geográficas entre 16° 42' 10.52" e 17° 21' 46.87" S, e 41° 56' 30.51" e 41° 37' 39.06" W, como mostra a Figura 1. A vazão calculada foi de 0,90 m³/s no período seco de agosto de 2022 e 0,10 m³/s no período úmido de dezembro de 2023, sendo esta diretamente afetada pelo fenômeno El Niño de 2023.

Segundo Souza (2024), o rio Piauí desempenha um papel fundamental no abastecimento de água potável para aproximadamente 105.000 habitantes, bem como para os empreendimentos agropecuários e de mineração presentes na região.

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger (1948), a bacia hidrográfica do rio Piauí apresenta três tipos climáticos: semiárido quente (BSh); clima temperado com verão quente e seco (Cwa); clima tropical com estação seca ou savana tropical (Aw). A precipitação anual varia de 700 mm a 900 mm, com chuvas concentradas entre os meses de novembro e março, sendo dezembro o mês com maior precipitação, chegando a médias de 160 mm (INMET, 2024). Na estação seca, especialmente em junho e julho, os índices de precipitação podem ficar abaixo de 5 mm. A umidade relativa média é de 75%, com uma evapotranspiração anual de cerca de 1450 mm e um déficit hídrico anual que varia de 300 a 700 mm (Oliveira; Menegasse; Duarte, 2000).

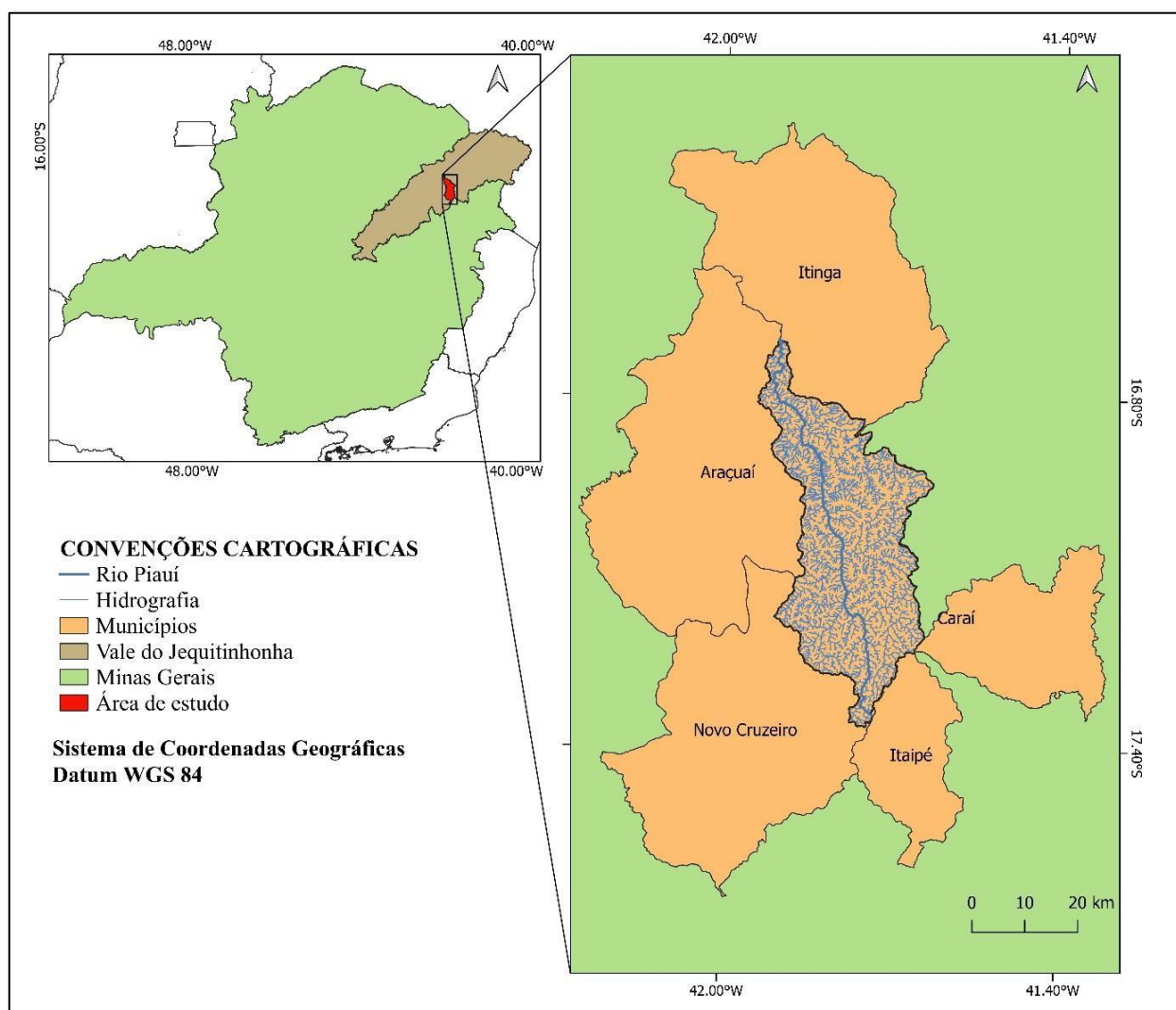


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo no contexto estadual e municipal.

Fonte: ANA e IBGE, 2023. Adaptado pelos autores.

O clima exerce impacto direto sobre a capacidade de retenção, distribuição e transporte de metais em sedimentos fluviais, segundo Baggio (2008), os padrões de precipitação e a sazonalidade controlam a vazão dos rios, o volume de escoamento superficial e a dinâmica de deposição e remobilização de partículas, o que influencia diretamente na dinâmica de transporte dos elementos químicos. Além disso, a variação na temperatura e na umidade afeta os processos de intemperismo químico, que liberam metais das rochas para os compartimentos ambientais. Portanto, a variabilidade climática é importante na compreensão da mobilidade e da distribuição espacial de elementos potencialmente tóxicos em sistemas aquáticos (Alloway, 2013).

Os municípios de Itaipé, Carai, Novo Cruzeiro, Itinga e Araçuaí, que compõem a área de estudo, apresentam uma zona de transição ecológica, ecótono, entre três importantes biomas brasileiros: a Mata Atlântica, o Cerrado e a Caatinga (Otoni, 2018). Enquanto a Mata Atlântica é predominante em áreas de maior altitude e regiões mais úmidas, o Cerrado e a Caatinga ocupam as áreas de planalto e as zonas mais secas (Embrapa, 2024).

A bacia do rio Piauí apresenta diferentes classes de solos, variando de acordo com as características geomorfológicas e litológicas da área, de acordo com Borges (2000), as principais classes de solo na região são: Latossolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Litólicos, predominantes nas chapadas; nas depressões, ocorrem Cambissolos eutróficos e nas planícies fluviais a presença de solos aluviais eutróficos.

A morfologia fluvial da bacia do rio Piauí é condicionada por fatores litológicos, geomorfológicos e antrópicos, que influenciam diretamente as características do canal e a dinâmica do escoamento fluvial (Souza, 2024). O canal principal foi dividido em três segmentos distintos, conforme mostra a Figura 2.

O primeiro, abrange as nascentes do rio Piauí e, é caracterizado por um canal fluvial único, estreito e raso, com escoamento predominantemente laminar; o segundo segmento, localiza-se no médio/baixo curso, apresentando um canal único com alternância entre as formas retilíneas e meandantes, com largura moderada e profundidade variável, o leito fluvial alterna entre rochoso e aluvial, recebendo contribuições de diversos afluentes por ambas as margens, este segmento é marcado pela presença de terraços fluviais laterais e barramentos artificiais, que interrompem o fluxo natural e afetam significativamente a velocidade do fluxo; o terceiro segmento, desenvolve-se sobre a planície aluvial até sua foz com o rio Jequitinhonha, apresenta canal único e meandrante com profundidade variada, ao longo de sua extensão.



Figura 2 – Morfologia fluvial definida para o rio Piauí. A) Nascente do rio Piauí, localizada no segmento alto curso; B) leito fluvial rochoso, localizado no segmento médio curso; C) leito fluvial arenoso, inserido no médio/baixo curso; D) confluência do Piauí, segmento baixo curso, exutório com o rio Jequitinhonha.

Fonte: Fotografias dos autores.

De acordo com Hare e Gardner (1984), o fator de assimetria da bacia é um índice que avalia a predominância preferencial do fluxo fluvial para uma das margens de um rio e oferece uma análise quantitativa sobre a assimetria da bacia e as possíveis causas de migração fluvial. Para o cálculo do FABD, adotou-se a metodologia proposta por Hare e Gardner (1984), descrita pela seguinte fórmula:

$$FABD = 100 \times \frac{Ar}{At} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde Ar é a área à direita do canal principal e At é a área total da bacia de drenagem.

O índice apresenta variação de 0 a 100, onde $FABD = 50$ indica uma bacia simétrica. $FABD > 50$ indica a ocorrência do basculamento da bacia para a direita e $FABD < 50$, tem-

se que o basculamento da bacia é para a esquerda. A partir do cálculo do fator de assimetria para a bacia hidrográfica do rio Piauí, tem-se:

$$FABD = 100 \times \frac{A_r}{A_t} \rightarrow FABD = 100 \times \frac{717,677 \text{ km}^2}{1172 \text{ km}^2} \rightarrow FABD \approx 61,23 \quad (\text{Eq. 2})$$

Os cálculos apresentados mostram que a bacia apresenta basculamento para a direita, direcionando o fluxo para este lado, como pode ser observado na Figura 4.

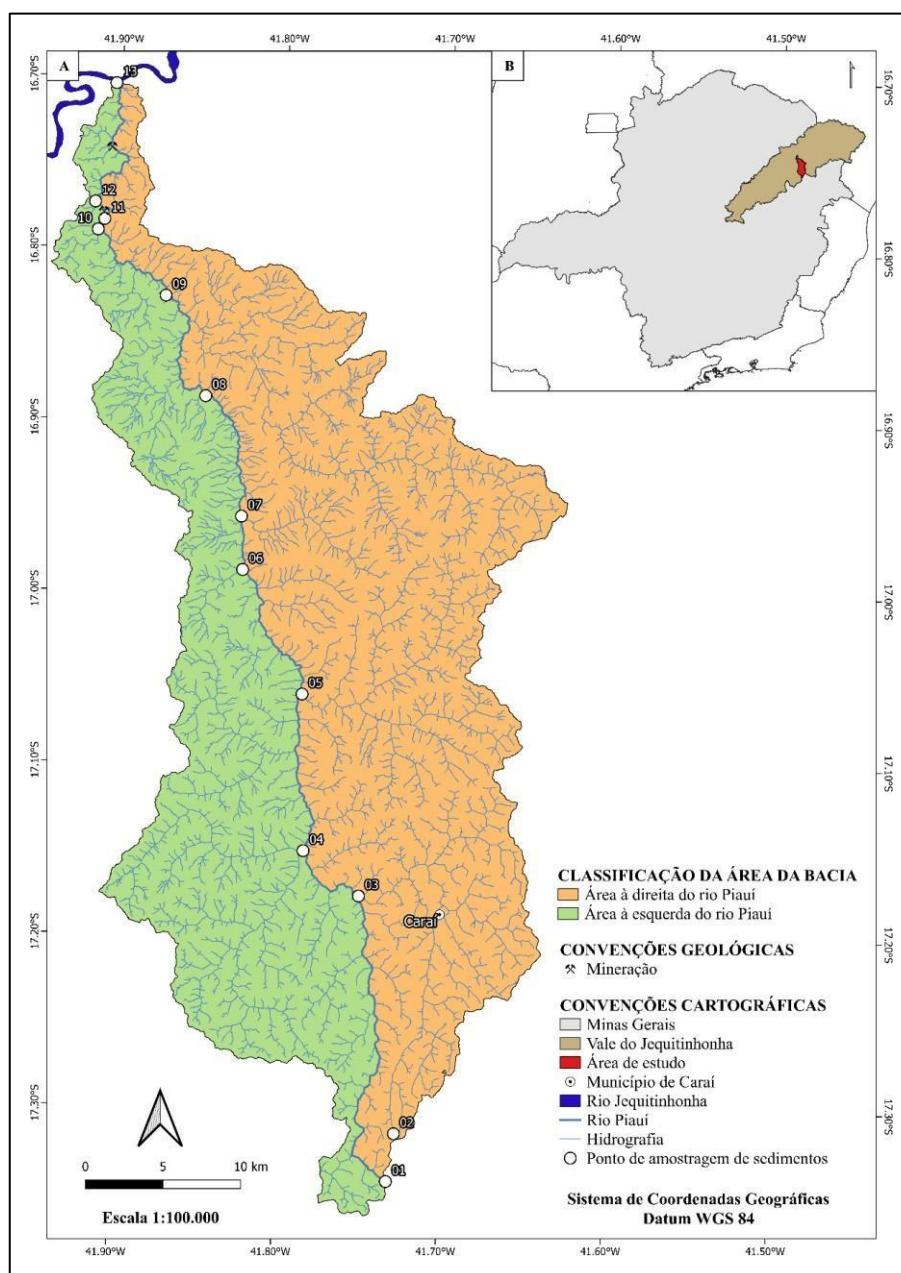


Figura 4 – Mapa de assimetria calculado para a bacia hidrográfica do rio Piauí, apontando a direção do basculamento para a direita.

Fonte: IDE Sisema, 2023. Elaborado pelos autores.

2.1. Contexto geológico regional e local

O Orógeno Araçuaí compreende um sistema orogênico confinado no Neoproterozoico-Cambriano, cuja evolução deu-se “limitada a uma reentrância do Cráton São Francisco – Congo, com a edificação do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental durante a orogenia Brasileira-Pan-Africana” (Pedrosa-Soares *et al.*, 2020).

O embasamento do Orógeno Araçuaí, segundo Noce *et al.* (2007), originou-se pela consolidação do paleocontinente São Francisco-Congo (2.2-2.0 Ga), que resultou na colisão de diferentes blocos crustais arqueanos, os quais foram posteriormente altamente retrabalhados em algumas porções durante o processo orogênico do Evento Brasileiro. As principais unidades que compõem o embasamento do Orógeno Araçuaí são: os complexos Guanhães, Gouveia e Porteirinha. As rochas que compõem o embasamento compreendem gnaisses e migmatitos TTGs (tonalito-trondhjemitó-granodiorito), plútons graníticos e sequências de greenstone belts (Noce *et al.*, 2007).

A evolução tectônica do Orógeno Araçuaí, de acordo com Pedrosa-Soares *et al.* (2007), compreende estágios distintos: (i) pré-colisional (630-580 Ga), no qual ocorreu a subducção da crosta oceânica para leste, marcada pela formação de um arco magmático (Suíte G1 e Grupo Rio Doce) e sedimentação do prisma acrescionário, com fechamento da Bacia Macaúbas; (ii) colisional (580-530 Ga), caracterizado por magmatismo sinorogênico (Suítes G2 e G3), aumento do grau metamórfico em fácies anfibolito e granulito, e deformação intensiva; e (iii) pós-colisional (530-490 Ga), associado ao colapso gravitacional do orógeno, magmatismo das supersuítes G4 e G5, e formação de zonas de cisalhamento normais na região central e norte. O estágio pós-colisional resultou em granitos e charnockitos do tipo I e A, além de estruturas crustais complexas devido à descompressão adiabática (CPRM, 2016; Pedrosa-Soares *et al.*, 2020).

Na área de estudo afloram rochas do Proterozoico, caracterizadas pelo Leucogranito Itaipé e pelas rochas das Formações Ribeirão da Folha (quartzo-mica xisto), Formação Salinas (xisto, metaconglomerado e metafilito), Formação Capelinha (xisto e quartzito), além da Formação Concórdia do Mucuri (gnaisse, quartzito e xisto). Datadas do Paleozoico, observa-se a presença das rochas Monzogranito, além dos granitos Teixeira. Do Mesozoico, tem-se a Unidade Serra do Tombo (brechas de talus sobrepostas por rochas piroclásticas). Já do Cenozoico, observam-se os Depósitos Aluvionares e as Coberturas Detrito-Lateríticas (Filho, 2014; Paes *et al.*, 2010). A Figura 5 apresenta as principais unidades litológicas identificadas na bacia hidrográfica.

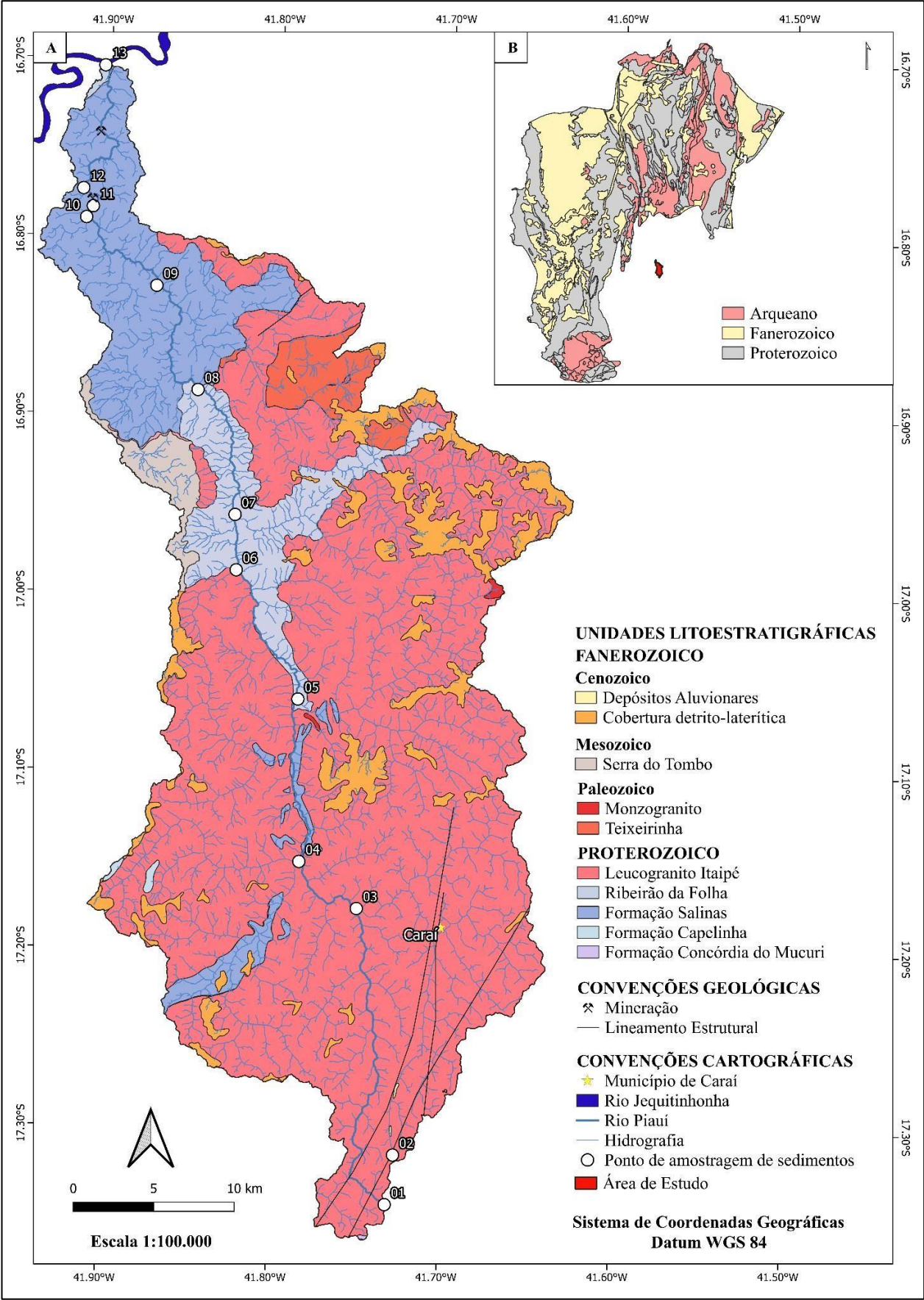


Figura 5 - Mapa litológico da área de estudo, apresentando os principais litotipos e as estações de amostragem. **Fonte:** Modificado de Filho (2014); Paes *et al.* (2010). Elaborado pelos autores.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A realização da pesquisa envolveu três etapas: planejamento, trabalhos de campo e análises laboratoriais. Primeira etapa - em gabinete, procedeu-se ao levantamento cartográfico, bibliográfico, geoprocessamento e caracterização fisiográfica da área de estudo; Segunda etapa - trabalhos de campo, foram realizadas coletas das amostras de sedimentos, além, da descrição da área, conferências das escalas e croquis; Terceira etapa - analítica, em laboratório, foi feita a preparação das amostras para análises granulométricas, mineralógicas e geoquímicas, além, do tratamento estatístico e integração dos dados.

Os trabalhos de campo foram realizados nos períodos seco e úmido, correspondentes aos anos de 2023 e 2024. As amostras destinadas às análises foram coletadas com o uso de utensílios plásticos, a fim de evitar contaminação por metais. As coletas ocorreram ao longo da drenagem principal, totalizando 26 amostras de sedimentos, cada uma pesando em torno de 2 kg, etiquetadas, acondicionadas em caixas térmicas, a uma temperatura de 2°C, para posteriormente serem encaminhadas ao laboratório.

No Laboratório de Geoquímica Ambiental (LGA) do Centro de Estudos em Geociências da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (Campus JK), os sedimentos foram secos à sombra, quarteados e homogeneizados. As amostras de granulometria inferior a 0,063 mm foram encaminhadas ao Laboratório Integrado de Pesquisas Multiusuário dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (LIPEMVALE), para a realização das análises geoquímicas, incluindo Espectrometria de Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva e Espectrometria de Absorção Atômica.

Para a realização da Espectrometria de Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva (EDX), utilizou-se o equipamento EDX-720 da SHIMADZU, que operou a uma tensão de tubo de 50 kV (Ti-U) e 15 kV (Na-Sc), colimador de 10 mm e tempo real de integração de 100 s. Além disso, para garantir um melhor desempenho, o equipamento foi refrigerado com nitrogênio líquido.

Para a Espectrometria de Absorção Atômica, foi necessário preparar as amostras, que foram inicialmente pesadas, na sequência, as amostras foram digeridas em 10 ml de ácido sulfúrico, utilizando-se um bloco digestor. Posteriormente, as amostras acidificadas foram diluídas em água destilada até o volume de 100 ml e deixadas em repouso para decantação por 24h. As leituras das amostras foram feitas por meio da Espectroscopia por Absorção Atômica (EAA).

Os dados obtidos foram analisados e comparados com as legislações vigentes, resoluções CONAMA nº 420/2009, nº 454/2012 e COPAM nº 166/2011.

Por fim, os dados foram submetidos a tratamento estatístico, com o uso do Excel, com o objetivo de produzir gráficos e tabelas. A confecção dos mapas foi realizada com o uso do software QGIS LTR 13.6 – Hannover, empregando o DATUM Sirgas 2000 e coordenadas UTM para o fuso 23S. O mapa das litologias foi elaborado a partir dos shapes dos mapeamentos geológicos na escala de 1:100.000, correspondentes às Folhas de Itaobim (SE.24-V-A-IV) e Novo Cruzeiro (SE.24-V-C-I).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a primeira campanha de campo (estação seca), não foram observadas alterações significativas na velocidade do fluxo, devido à baixa variabilidade hidrológica típica desse período. Na segunda campanha (estação úmida), a influência do fenômeno *El Niño*, ocorrido no ano de 2023, caracterizado por precipitações abaixo das médias anuais, impactou drasticamente a dinâmica hídrica da bacia, apresentando escoamento fluvial do tipo subsuperficial ao longo de quase todo o canal principal e dos principais afluentes, exceto o segmento do alto curso que não foi impactado.

A relação entre o perfil longitudinal do rio e a distribuição granulométrica dos sedimentos evidencia a influência da topografia e da hidrodinâmica na sedimentação fluvial. Em trechos de maior altitude e declividade acentuada, predominam sedimentos mais grosseiros, pois a energia do fluxo é suficiente para remover partículas finas e concentrar materiais mais densos no leito. Já em áreas de menor declividade, ocorre maior deposição de areia fina e silte, caracterizando ambientes de menor energia e favorecendo a deposição progressiva de partículas menores.

Durante o período seco com condição de maior vazão (0,90 m³/s), observou-se um predomínio da fração areia média, seguida por areia fina, enquanto a presença de sedimentos mais grosseiros, como pedregulho e areia grossa, destacou-se em pontos específicos, observados principalmente nas amostras 4, 6 e 12. Esse padrão sugere que, sob alta vazão, o fluxo possui energia suficiente para manter partículas finas em suspensão, evitando sua deposição, ao mesmo tempo em que deposita partículas maiores em trechos de maior energia. A elevada concentração de sedimentos grosseiros no Ponto 12, com 32,52% de pedregulho e 11,93% de areia grossa, indica um ambiente de alta energia fluvial, entretanto, como mostra a Figura 6, as imagens obtidas em campo evidenciam que parte

desse material é proveniente de uma pilha de rejeito de mineração localizada nas proximidades do canal principal do rio, cuja erosão e transporte ocorrem principalmente durante eventos de maior intensidade hídrica. A presença de fragmentos angulares e heterogêneos no leito do rio reforça essa influência, sugerindo que o aporte de rejeitos altera a composição natural dos sedimentos fluviais. Esse fenômeno pode impactar a morfologia do leito, contribuindo para processos de assoreamento e modificações na dinâmica sedimentar local. Além disso, a potencial influência geoquímica desses rejeitos deve ser considerada, uma vez que pode comprometer a qualidade da água e dos sedimentos ao longo do curso fluvial.

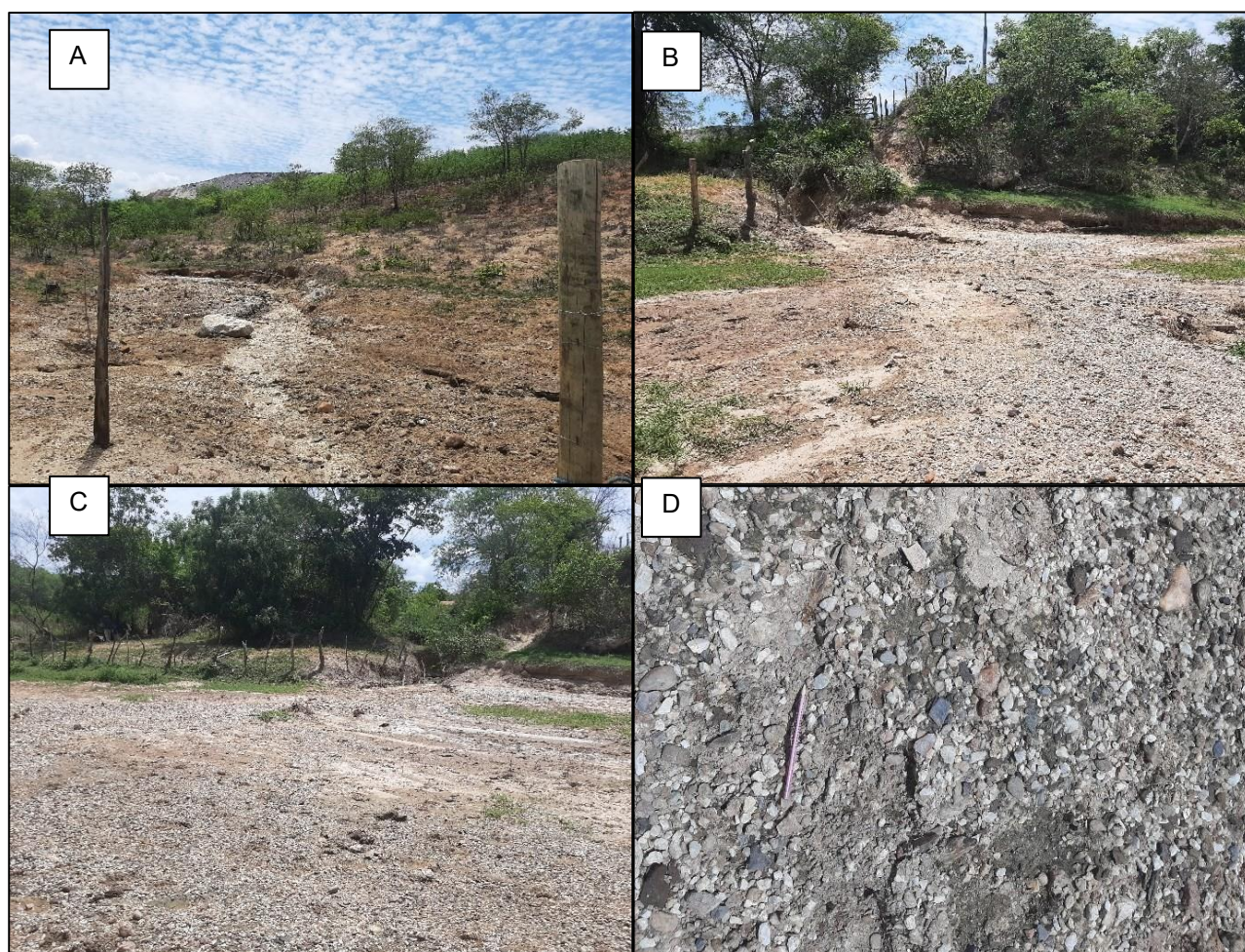


Figura 6 – Deposição de sedimentos de fração granulométrica de pedregulho no ponto 12 e influência da pilha de rejeito na dinâmica fluvial. **Legenda:** Registros fotográficos do Ponto 12, evidenciando a influência da pilha de rejeito na composição sedimentar do leito fluvial do rio Piauí. As imagens destacam a presença de sedimentos grosseiros, predominantemente pedregulho e areia grossa, em diferentes trechos do canal. Na imagem A) observa-se o curso d'água seco, com aporte de material advindo da pilha de rejeito ao fundo. A imagem B) mostra um trecho do rio onde ocorre intensa deposição sedimentar. Na imagem C) evidencia-se um setor de deposição com fragmentos heterogêneos ao longo do leito. Por fim, a imagem D) apresenta em detalhe os sedimentos, onde se notam fragmentos de diferentes granulometrias, caracterizando a interferência da pilha de rejeito na dinâmica sedimentar local. **Fonte:** Fotos dos autores.

Por outro lado, na condição de baixa vazão ($0,10 \text{ m}^3/\text{s}$), período úmido, observou-se um aumento expressivo da fração de areia fina, além da deposição de partículas de silte e argila em algumas amostras, como 5 e 6. Esse comportamento indica uma redução da capacidade de transporte do fluxo, favorecendo a deposição de partículas finas em locais de menor energia. A amostra 5, por exemplo, apresentou 67,38% de areia fina, um valor significativamente superior ao registrado sob alta vazão. Isso sugere que, em condições de menor escoamento, há uma deposição progressiva de sedimentos finos, especialmente em trechos de menor declividade, conforme evidenciado nos perfis longitudinais. Além disso, ficou evidente a diminuição dos processos erosivos e, conseqüentemente, o transporte da fração pedregulho.

As frações de silte e argila apresentaram baixos teores em ambas as estações, com uma leve redução durante o período úmido. A amostra 12, por exemplo, registrou uma concentração de 0,71% no período seco, enquanto no período úmido esse valor foi reduzido para 0,17%. Durante esse intervalo, especialmente sob a influência do evento *El Niño*, esses sedimentos finos foram transportados predominantemente por processos eólicos. Em determinados segmentos do rio, observou-se que o transporte eólico teve maior eficácia em comparação ao transporte pluvial.

Comparando ambas as condições hidrodinâmicas, percebeu-se que a maior vazão atua de forma mais intensa na mobilização e redistribuição dos sedimentos, enquanto a menor vazão propicia um ambiente mais estável para deposição de partículas finas. Essa dinâmica influencia diretamente a morfologia do leito fluvial, contribuindo para a formação de barras de areia, bancos sedimentares e possíveis processos de assoreamento em trechos de baixa energia.

A composição mineralógica dos sedimentos de fundo do rio Piauí está diretamente relacionada à geologia da bacia hidrográfica e à distribuição litológica das unidades estratigráficas presentes na área. A composição litológica mostra que a bacia é dominada pelo Leucogranito Itaipé, que ocupa 75,41% da área, seguido pelas Formações Salinas (13,07%) e Ribeirão da Folha (7,96%), que possuem grande influência no aporte de sedimentos fluviais. Outras unidades, como a Formação Capelinha, a Formação Concórdia do Mucuri e os granitos Teixeira, possuem áreas menores, mas também contribuem para a diversidade mineralógica identificada nas amostras.

A partir do tratamento dos dados, observou-se que a mineralogia que constitui os sedimentos de fundo do rio Piauí é composta essencialmente por quartzo, feldspato (microclina, ortoclásio e albita), biotita, muscovita, espodumênio, óxidos, turmalina e

argilominerais (caulinita). Além disso, foram identificados fragmentos de granito e xisto. Ressalta-se que a presença desses materiais varia entre os diferentes pontos amostrados e em função da estação climática. As variações sazonais na composição mineralógica dos sedimentos refletem a interação entre o regime hidrológico e as litologias da bacia. No período seco (0,90 m³/s), a maior energia do fluxo permitiu a deposição de minerais mais densos e resistentes, como turmalina, espodumênio, titanita, zircão e ouro, evidenciando a contribuição de fontes pegmatíticas e graníticas. Já no período úmido (0,10 m³/s), a menor capacidade de transporte favoreceu a deposição de outros minerais, como caulinita e óxidos, indicando a influência da cobertura superficial e do intemperismo químico sobre os sedimentos.

Após a aplicação das técnicas de Espectrometria de Fluorescência de Raio-X e Espectrometria de Absorção Atômica, foram obtidos dados referentes à composição elementar (Tabela 1) e às concentrações dos elementos potencialmente tóxicos presentes nas amostras, identificando-se a presença de Pb, Cr, Cu e Zn (Figura 6).

Tabela 1 – Resultados da presença dos elementos potencialmente tóxicos em seus respectivos pontos de amostragem.

Amostra	Período	X (UTM)	Y (UTM)	Altitude (metros)	Elementos Potencialmente Tóxicos
1	Seco	209761	8080465	1001	Pb, Cu, Zn
	Úmido	209599	8080584	995	Pb, Cu, Zn
2	Seco	207457	8098836	903	Pb, Cu, Zn
	Úmido	210092	8083518	903	Cu, Zn
3	Seco	207551	8098845	657	-
	Úmido	207551	8098845	650	Zn
4	Seco	203833	8101757	610	Cu, Zn
	Úmido	203833	8101757	609	-
5	Seco	203420	8111760	510	Zn
	Úmido	203542	8111590	509	Zn
6	Seco	199397	8119712	408	Cu, Zn
	Úmido	199397	8119712	408	-
7	Seco	199182	8122619	385	Zn
	Úmido	199182	8122619	385	Cu, Zn
8	Seco	196623	8130831	322	Zn
	Úmido	196618	8131089	322	Zn
9	Seco	194036	8137358	306	Pb
	Úmido	194036	8137358	306	Cu, Zn
10	Seco	189366	8141384	286	Cu, Zn
	Úmido	189527	8141464	286	Zn
11	Seco	189825	8142772	283	Cu, Cr, Zn
	Úmido	189825	8142772	283	Zn
12	Seco	189233	8143129	281	Cu, Zn
	Úmido	189233	8143129	281	Zn
13	Seco	190282	8150865	271	-
	Úmido	190797	8148509	271	Zn

Fonte: Dados da pesquisa.

Além disso, a comparação dos dados geoquímicos com as resoluções ambientais vigentes (CONAMA 420/2009, 454/2012 e COPAM 166/2011) revelou que, em algumas estações de amostragem, os limites estabelecidos foram excedidos para estes elementos, indicando possível contaminação do sistema hídrico.

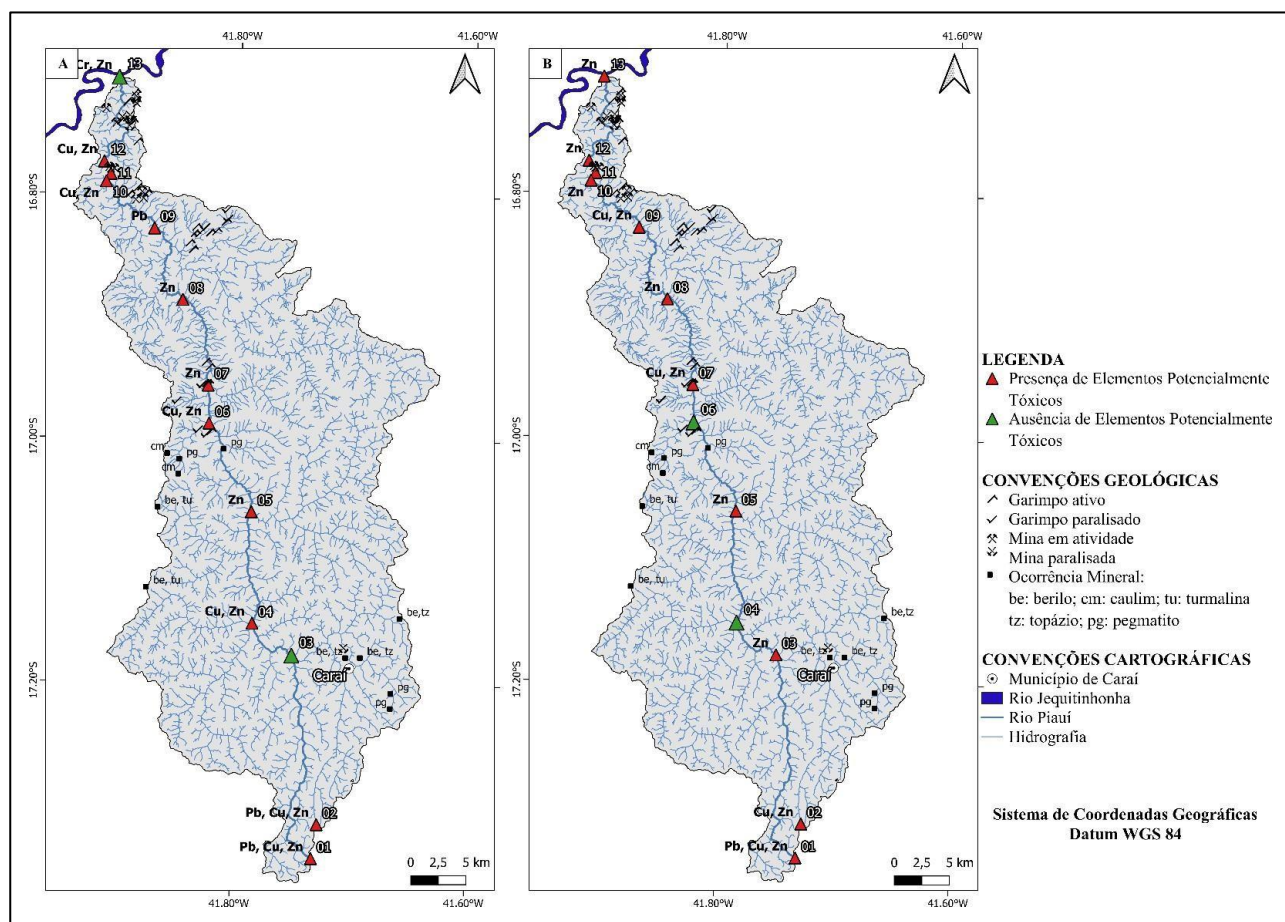


Figura 6 - Mapas apresentando a presença de (EPTs), de acordo com os pontos amostrados. A) Período Seco; B) Período Úmido. **Fonte:** IDE Sisema, 2025. Adaptado pelos autores.

4.1. Chumbo

O chumbo (Pb) é um EPTs de elevada toxicidade, amplamente reconhecido por seus impactos ambientais e pela extensa utilização em processos industriais. Na natureza, ocorre predominantemente sob a forma de minerais como galena (PbS), cerussita ($PbCO_3$) e anglesita ($PbSO_4$), sendo liberado para o ambiente por meio do intemperismo de rochas e minerais ricos no elemento, além de fontes secundárias como emissões vulcânicas (ATSDR, 2007). No entanto, as principais contribuições de Pb aos compartimentos ambientais são antrópicas, associadas à mineração, fundição, fabricação de baterias e tintas, uso de gasolina aditivada com chumbo e descarte inadequado de resíduos industriais e urbanos (World Health Organization, 2011; Alloway, 2013).

Em um estudo realizado por Baggio (2008) na bacia do rio Formoso - MG, verificou-se que, mesmo que os valores de Pb nos sedimentos de corrente do rio do Formoso não tenham ultrapassado os limites orientadores da Resolução CONAMA 344/2004, a concentração do metal em certos pontos se aproximou criticamente dos valores de TEL (35 mg/kg), indicando enriquecimento geoquímico. O autor associou essa presença aos litotipos como, arenitos, e ao intemperismo químico e físico dessas rochas, além da influência de resíduos provenientes de práticas agrícolas, como o uso de agrotóxicos à base de compostos de chumbo. Esses fatores combinados contribuem para a liberação e acumulação de Pb nos sedimentos de fundo.

Conforme estabelecido nas legislações CONAMA 420/2009 e COPAM 166/2011, os limites de qualidade e prevenção para o chumbo são, respectivamente, 19,5 mg/kg e 72 mg/kg, sendo os valores máximos permitidos condicionados ao uso do solo: 180 mg/kg para uso agrícola, 300 mg/kg para uso residencial e 900 mg/kg para uso industrial. Para a resolução CONAMA 454/2012 tem-se os valores de referência do nível 1 correspondendo a 35 mg/kg e nível 2, 91,3 mg/kg. Dessa forma, a análise das concentrações de chumbo nos sedimentos, aliada aos critérios estabelecidos pela legislação ambiental vigente, permite avaliar o grau de contaminação do rio Piauí, como mostra a Tabela 3.

No ponto 9, observou-se a maior concentração de chumbo (250 mg/kg), que excedeu todos os limites normativos analisados, quando comparada ao valor de qualidade da Deliberação Normativa COPAM nº 166/2011 (19,5 mg/kg), a concentração foi aproximadamente de 1.181% maior, ou 12,8 vezes o limite. Em relação ao valor de prevenção da Resolução CONAMA nº 420/2009 (72 mg/kg), observou-se um excesso de 247%, que corresponde a 3,5 vezes mais do que o valor estabelecido pela resolução. Já em relação ao Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 (35 mg/kg), o valor encontrado foi 614% superior, representando 7,14 vezes o limite estipulado.

A análise geoquímica do Pb nos sedimentos da bacia do rio Piauí mostrou que sua distribuição espacial está fortemente associada à composição litológica local, especialmente ao predomínio do Leucogranito Itaipé, além das formações Ribeirão da Folha e Salinas, que contribuem com minerais potencialmente portadores de Pb, como pirita, ilmenita, magnetita e hematita. A presença de garimpos e minas ativas sugere a influência de fontes antrópicas na elevação dos teores do metal em determinados pontos de amostragem. A comparação entre os períodos seco e úmido apresentou variações sazonais nas concentrações de Pb, com maiores valores no período seco (vazão 0,90m³/s), possivelmente devido à menor diluição e maior deposição de partículas finas quando

comparado ao período úmido (vazão 0,10m³/s). A baixa mobilidade do chumbo, aliada à sua forte adsorção a óxidos de ferro e matéria orgânica, condiciona sua permanência nos sedimentos, podendo representar riscos ambientais relevantes, incluindo bioacumulação em organismos aquáticos e potencial contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Tabela 3 – Resultados do elemento químico chumbo (Pb) nas duas campanhas de campo associados à legislação vigente.

Pontos amostrados por período climático	Resolução CONAMA nº 420/2009					Resolução COPAM nº 454/2012					Resolução CONAMA nº 420/2009	
	Ref.	Prev.	Inv. Agr.	Inv. Res.	Inv. Ind.	Ref.	Prev.	Inv. Agr.	Inv. Res.	Inv. Ind.	Nível 1	Nível 2
	E	72	180	300	900	19,5	72	180	300	900	35	91,3
1	Seco	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
	Úmido	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
2	Seco	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Seco	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Legenda: Ref. – Referência de qualidade; Prev. – Prevenção; Inv. Agr. – Investigação para uso agrícola; Inv. Res. – Investigação para uso residencial; Inv. Ind. – Investigação para uso industrial; E – Valor a ser definido pelo ente estadual competente; Nível 1 – corresponde a concentrações abaixo das quais o material é considerado de baixo risco potencial ao meio ambiente e, portanto, pode ser manejado com menor restrição; Nível 2 – representa os limites superiores, indicando concentrações que, quando excedidas, requerem avaliação adicional de risco e possíveis medidas de mitigação antes do descarte ou reutilização do material dragado. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2025.

4.2. Cobre

O cobre (Cu) é um metal de transição amplamente distribuído na crosta terrestre, com ocorrência frequente em minerais como calcopirita (CuFeS_2), cuprita (Cu_2O), malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) e azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), que constituem suas principais fontes naturais (Kabata-Pendias; Mukherjee, 2007). Devido à sua abundância natural e à ampla aplicação industrial, o cobre está frequentemente presente em diversos compartimentos ambientais, incluindo solos, sedimentos, águas superficiais e subterrâneas. Sua liberação natural decorre principalmente do intemperismo de rochas e minerais, erosão e atividade vulcânica (Alloway, 2013). Contudo, as fontes antrópicas são as principais responsáveis pela elevação das concentrações ambientais de Cu, destacando-se atividades de mineração e metalurgia, produção de cabos e fios condutores, uso agrícola de fungicidas e fertilizantes, além de indústrias de tintas, madeira tratada, curtumes e descarte inadequado de resíduos (Atsdr, 2004; Kabata-Pendias, 2011).

Conforme estabelecido nas legislações CONAMA 420/2009 e COPAM 166/2011, os limites de qualidade e prevenção para o cobre são, respectivamente, 49 mg/kg e 60 mg/kg, sendo os valores máximos permitidos condicionados ao uso do solo: 200 mg/kg para uso agrícola, 400 mg/kg para uso residencial e 600 mg/kg para uso industrial. Para a resolução CONAMA 454/2012 tem-se os valores de referência do nível 1 correspondendo a 35,7 mg/kg e nível 2, 197 mg/kg. Dessa forma, a análise das concentrações de cobre nos sedimentos, aliada aos critérios estabelecidos pela legislação ambiental vigente, como mostra a Tabela 4, permite avaliar o grau de contaminação do rio Piauí.

A maior concentração de Cu (170 mg/kg) observada no ponto 11, e ultrapassou significativamente os limites estabelecidos pelas legislações ambientais brasileiras. Comparado ao valor de qualidade da Deliberação Normativa COPAM nº 166/2011 (49 mg/kg), o teor foi aproximadamente 247% superior, o que equivale a 3,47 vezes o limite. Em relação ao valor de prevenção definido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 (60 mg/kg), o excedente foi de 183%, ou 2,83 vezes acima do estipulado pela legislação. Ao comparar-se ao valor de referência do Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 (35,7 mg/kg), o excesso atingiu 376%, ou seja, uma concentração 4,76 vezes maior, indicando possível risco ambiental relevante.

Tabela 4 – Resultados do elemento químico cobre (Cu) nas duas campanhas de campo associados à legislação vigente.

Pontos amostrados por período climático	Resolução CONAMA n° 420/2009					Resolução COPAM n° 454/2012					Resolução CONAMA n° 420/2009	
	Ref.	Prev.	Inv. Agr.	Inv. Res.	Inv. Ind.	Ref.	Prev.	Inv. Agr.	Inv. Res.	Inv. Ind.	Nível 1	Nível 2
	E	60	200	400	600	49	60	200	400	600	35,7	197
1	Seco	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	Úmido	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
2	Seco	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	Úmido	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
3	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Seco	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Seco	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
8	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
10	Seco	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Seco	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Seco	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Legenda: Ref. – Referência de qualidade; Prev. – Prevenção; Inv. Agr. – Investigação para uso agrícola; Inv. Res. – Investigação para uso residencial; Inv. Ind. – Investigação para uso industrial; E – Valor a ser definido pelo ente estadual competente; Nível 1 – corresponde a concentrações abaixo das quais o material é considerado de baixo risco potencial ao meio ambiente e, portanto, pode ser manejado com menor restrição; Nível 2 – representa os limites superiores, indicando concentrações que, quando excedidas, requerem avaliação adicional de risco e possíveis medidas de mitigação antes do descarte ou reutilização do material dragado. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2025.

A distribuição do cobre nos sedimentos da bacia do rio Piauí está relacionada principalmente ao intemperismo das litologias locais, observando-se a presença de óxidos de ferro e turmalina, minerais que podem atuar como fontes naturais de Cu. A adsorção do metal em hematita e hidróxidos de ferro influencia sua fixação nos sedimentos e sua mobilidade na coluna d'água. O pH se mostrou um fator determinante na disponibilidade do

cobre, com maiores concentrações nos pontos 1 e 2, onde predominam condições ácidas e presença de cultivos de eucalipto, atividade que pode estar associada ao uso de insumos agrícolas com sais de cobre. Já o ponto 11, que apresentou o maior teor de Cu (170 mg/kg) no período seco, está situado próximo a uma área minerada, sugerindo contribuição antrópica. As variações sazonais foram discretas, indicando estabilidade relativa na distribuição do Cu, possivelmente influenciada por processos de transporte e deposição de sedimentos finos ao longo dos diferentes regimes de vazão.

Resultados semelhantes foram observados por Mortatti *et al.* (2010), que investigaram a distribuição de EPTs nos sedimentos de fundo ao longo da bacia do rio Tietê. Os autores identificaram concentrações de cobre superiores a 200 mg/kg na parte média da bacia, associadas a aportes de efluentes domésticos, industriais e agrícolas. Esses resultados reforçam a hipótese de que a presença significativa de Cu nos sedimentos analisados neste estudo pode estar relacionada tanto à contribuição antrópica, neste caso, proveniente de práticas agrícolas e uso de corretivos, quanto à origem natural, vinculada à mineralogia local.

4.3. Cromo

O cromo (Cr) é um metal de transição presente na crosta terrestre principalmente na forma do mineral cromita (FeCr_2O_4), sua principal fonte natural (ATSDR, 2012). No ambiente, o cromo ocorre predominantemente nos estados de oxidação trivalente Cr (III) e hexavalente Cr(VI). O Cr (III) é considerado um micronutriente essencial em baixas concentrações, enquanto o Cr(VI) apresenta elevada toxicidade, com propriedades mutagênicas e carcinogênicas (Alloway, 2013). A liberação natural do Cr ocorre por meio do intemperismo de rochas ultramáficas, como peridotitos e serpentinitos, além da degradação de minerais ricos em ferro e cromo. Entretanto, as principais fontes de contaminação ambiental são antrópicas, relacionadas a atividades industriais como curtumes, produção de ligas metálicas, pigmentos, madeira tratada, fabricação de cimento e refino de petróleo (Kabata-Pendias, 2011; World Health Organization, 2003).

Conforme estabelecido nas legislações CONAMA 420/2009 e COPAM 166/2011, os limites de qualidade e prevenção para o cromo são de 75 mg/kg, sendo os valores máximos permitidos condicionados ao uso do solo: 150 mg/kg para uso agrícola, 300 mg/kg para uso residencial e 400 mg/kg para uso industrial. Para a resolução CONAMA 454/2012 tem-se os valores de referência do nível 1 correspondendo a 37,3 mg/kg e nível 2, 90 mg/kg. Dessa forma, a análise das concentrações de cromo nos sedimentos, aliada aos critérios

estabelecidos pela legislação ambiental vigente, como mostra a Tabela 5, permite avaliar o grau de contaminação do rio Piauí.

Tabela 5 – Resultados do elemento químico cromo (Cr) nas duas campanhas de campo associados à legislação vigente.

Pontos amostrados por período climático	Resolução CONAMA n° 420/2009					Resolução COPAM n° 454/2012					Resolução CONAMA n° 420/2009	
	Ref.	Prev.	Inv. Agr.	Inv. Res.	Inv. Ind.	Ref.	Prev.	Inv. Agr.	Inv. Res.	Inv. Ind.	Nível 1	Nível 2
	E	75	150	300	400	75	75	150	300	400	37,3	90
1	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Seco	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Legenda: Ref. – Referência de qualidade; Prev. – Prevenção; Inv. Agr. – Investigação para uso agrícola; Inv. Res. – Investigação para uso residencial; Inv. Ind. – Investigação para uso industrial; E – Valor a ser definido pelo ente estadual competente; Nível 1 – corresponde a concentrações abaixo das quais o material é considerado de baixo risco potencial ao meio ambiente e, portanto, pode ser manejado com menor restrição; Nível 2 – representa os limites superiores, indicando concentrações que, quando excedidas, requerem avaliação adicional de risco e possíveis medidas de mitigação antes do descarte ou reutilização do material dragado. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2025.

A partir dos resultados obtidos pela análise geoquímica dos sedimentos de fundo do rio Piauí observou-se a presença de Cr apenas no período seco, no ponto de amostragem 11, que indica uma contaminação pontual. Dessa forma, a concentração de cromo (700 mg/kg) excedeu em aproximadamente 833% o limite de 75 mg/kg estabelecido pelas Resoluções CONAMA nº 420/2009 e COPAM nº166/2011 para prevenção. Esse valor representa um excedente de 625 mg/kg, ou 9,33 vezes acima do limite estipulado. Quanto a Resolução CONAMA nº454/2012, esse valor torna-se ainda mais elevado, representando um excedente de 662,7 mg/kg, ou seja, aproximadamente de 18,8 vezes superior ao Nível 1 de referência. Ressalta-se que o ponto 11 encontra-se próximo a um empreendimento mineral, o que infere na possibilidade do empreendimento ser a área fonte para a presença do Cr.

A presença isolada desse elemento em níveis elevados sugere uma anomalia geoquímica para Cr, com forte influência antrópica, possivelmente relacionada a atividades minerárias na região. A mobilidade do cromo pode estar associada às condições hidrogeoquímicas da bacia, com influência do pH e da vazão do rio.

Resultados similares foram obtidos por Baggio (2008) em seu estudo desenvolvido na bacia do rio Formoso, município de Buritizeiro (MG), cujas concentrações de Cr em sedimentos ultrapassaram os valores de referência ambiental (CONAMA 344/04), especialmente em pontos localizados em áreas com intensa atividade agrícola. O autor atribuiu os teores elevados tanto à contribuição natural dada pela litologia da área (como os argilitos da Formação Três Marias) quanto ao uso de compostos contendo cromo em defensivos agrícolas que contém anidrito crômico, ácido crômico, óxido crômico e trióxido de cromo.

4.4. Zinco

O zinco (Zn) é um metal de transição amplamente e ocorre naturalmente em minerais como esfalerita (ZnS), hemimorfita ($\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), smithsonita (ZnCO_3) e willemita (Zn_2SiO_4), estando associado a rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (ATSDR, 2005). As fontes naturais de zinco incluem o intemperismo de rochas e solos ricos em minerais de zinco, enquanto as principais fontes antrópicas estão relacionadas a atividades industriais, como mineração e fundição de metais, galvanização, fabricação de ligas metálicas, indústria de baterias, fertilizantes, pesticidas, aditivos em ração animal, em pigmentos e na indústria farmacêutica (Alloway, 2013; World Health Organization, 2001).

Estudos realizados por Trindade *et al.* (2012) em uma seção do rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora, Minas Gerais, revelaram concentrações elevadas de zinco (5974,16 mg/kg) nos sedimentos, especialmente na área urbano-industrial de Três Marias. Essas concentrações, segundo o autor, foram atribuídas às atividades industriais, como o beneficiamento do zinco e atividades agrícolas na região.

Conforme estabelecido nas legislações CONAMA 420/2009 e COPAM 166/2011, os limites de qualidade e prevenção para o zinco são, respectivamente, 46,5 mg/kg e 300 mg/kg, sendo os valores máximos permitidos condicionados ao uso do solo: 450 mg/kg para uso agrícola, 1000 mg/kg para uso residencial e 2000 mg/kg para uso industrial. Para a resolução CONAMA 454/2012 tem-se os valores de referência do nível 1 correspondendo a 123 mg/kg e nível 2, 315 mg/kg. Dessa forma, a análise das concentrações de zinco nos sedimentos, aliada aos critérios estabelecidos pela legislação ambiental vigente, como mostra a Tabela 6, permite avaliar o grau de contaminação do rio Piauí.

A concentração máxima de zinco observada no ponto 11 (180 mg/kg) ultrapassou em aproximadamente 288% o valor de qualidade de 46,4 mg/kg estabelecido pela Deliberação Normativa COPAM nº 166/2011, sendo aproximadamente 4 vezes maior. Quando comparado ao Nível 1 de 123 mg/kg definido pela Resolução CONAMA nº 454/2012, o excesso foi de 46,3%, o que corresponde a uma concentração 1,46 vezes superior ao limite. Esses resultados indicam a possibilidade de contaminação relevante ao ambiente aquático.

A presença de Zn nos sedimentos da bacia do rio Piauí pode ser atribuída, em grande parte, ao intemperismo das litologias predominantes, como o Leucogranito Itaipé e as Formações Ribeirão da Folha e Salinas, cujos minerais constituintes, como biotita, magnetita, ilmenita e turmalina podem conter zinco como elemento-traço. O metal é liberado naturalmente durante a alteração dessas rochas e se fixa temporariamente nos sedimentos por meio da adsorção em óxidos de ferro e matéria orgânica. O pH da água também influencia diretamente sua mobilidade: nos pontos 1 e 2, onde predominaram condições ácidas, a solubilização do zinco foi favorecida, o que pode justificar as maiores concentrações nesses locais. Já em ambientes neutros ou levemente alcalinos, o metal tende a precipitar-se na forma de compostos pouco solúveis. Atividades antrópicas, como o uso de fertilizantes e defensivos agrícolas nas plantações de eucalipto próximas aos pontos 1 e 2, bem como a mineração próxima ao ponto 11, também podem estar contribuindo para o enriquecimento de Zn nos sedimentos. A variação sazonal demonstrou que, durante o período seco, o aumento da concentração em pontos específicos pode estar relacionado ao menor volume de água, maior carga de partículas finas e à intensificação

da adsorção; no período úmido, as concentrações tenderam à estabilização, refletindo menor mobilidade e deposição de sedimentos finos.

Tabela 6 – Resultados do elemento químico zinco (Zn) nas duas campanhas de campo associados à legislação vigente.

Pontos amostrados por período climático	Resolução CONAMA n° 420/2009					Resolução COPAM n° 454/2012					Resolução CONAMA n° 420/2009	
	Ref.	Prev.	Inv. Agr.	Inv. Res.	Inv. Ind.	Ref.	Prev.	Inv. Agr.	Inv. Res.	Inv. Ind.	Nível 1	Nível 2
	E	300	450	1000	2000	46,5	300	450	1000	2000	123	315
1	Seco	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Úmido	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
2	Seco	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Úmido	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
3	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
4	Seco	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Seco	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	Úmido	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
6	Seco	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	Úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Seco	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	Úmido	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
8	Seco	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	Úmido	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
9	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10	Seco	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Úmido	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
11	Seco	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
	Úmido	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
12	Seco	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Úmido	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
13	Seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Úmido	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Legenda: Ref. – Referência de qualidade; Prev. – Prevenção; Inv. Agr. – Investigação para uso agrícola; Inv. Res. – Investigação para uso residencial; Inv. Ind. – Investigação para uso industrial; E – Valor a ser definido pelo ente estadual competente; Nível 1 – corresponde a concentrações abaixo das quais o material é considerado de baixo risco potencial ao meio ambiente e, portanto, pode ser manejado com menor restrição; Nível 2 – representa os limites superiores, indicando concentrações que, quando excedidas, requerem avaliação adicional de risco e possíveis medidas de mitigação antes do descarte ou reutilização do material dragado. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2025.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, evidenciou-se que a presença de elementos potencialmente tóxicos nos sedimentos de fundo da bacia do rio Piauí resultam da interação entre fatores naturais, como a composição litológica da bacia, marcada principalmente pela presença do Leucogranito Itaipé e pelas Formações Ribeirão da Folha e Salinas, e fatores antrópicos, como a exploração mineral e a atividade agrícola. As concentrações de chumbo, cobre e zinco apresentaram variações sazonais associadas à dinâmica hídrica, destacando-se a influência do pH e da vazão do rio na mobilidade e na biodisponibilidade dos metais. Pontos próximos a áreas de mineração e cultivo de eucalipto registraram os maiores teores, indicando possível contribuição direta de fontes difusas e pontuais.

Verificou-se que, em todos os pontos onde foi detectado Cu, também houve a presença de zinco Zn, o que sugere uma possível correlação entre esses dois elementos. Essa associação pode ser atribuída a uma origem geoquímica natural, em que ambos podem ocorrer como elementos-traço em minerais presentes nas litologias da área, como turmalina, biotita e ilmenita. Além disso, Cu e Zn apresentam comportamento geoquímico semelhante, com afinidade por partículas finas, silte e argila, favorecendo sua adsorção nos sedimentos de fundo. Quanto ao fator antropogênico, destaca-se que o uso simultâneo desses elementos em práticas agrícolas, como em fertilizantes e corretivos do solo, pode contribuir para sua ocorrência conjunta na bacia do rio Piauí.

A comparação dos resultados com os limites estabelecidos pelas Resoluções CONAMA nº 420/2009, nº 454/2012 e pela Deliberação Normativa COPAM nº 166/2011 permitiu identificar teores que, em alguns casos, ultrapassam valores de prevenção e qualidade, representando potenciais riscos à saúde dos organismos aquáticos e à qualidade ambiental da bacia.

Dessa forma, ressalta-se a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade dos sedimentos e estudos geoquímicos na área da bacia do rio Piauí, com o objetivo de subsidiar políticas públicas voltadas à proteção dos recursos hídricos do Vale do Jequitinhonha, principalmente em regiões impactadas por atividades minerárias e uso intensivo de insumos agrícolas.

REFERÊNCIAS

ALLOWAY, B. J. **Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability**. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2013.

ATSDR. **Toxicological profile for copper**. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2004. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp132.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2024.

ATSDR. **Toxicological profile for zinc**. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2005. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp60.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2024.

ATSDR. **Toxicological profile for chromium**. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2012a. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp7.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2024.

BAGGIO, H. **Contribuições Naturais e Antropogênicas para a Concentração e Distribuição de Metais Pesados em Água Superficial e Sedimento de Corrente na Bacia do Rio Formoso, Município de Buritizeiro, MG**. 2008. 210 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Belo Horizonte, 2008.

BORGES, H. Q. **Avaliação do SISDA (Sistema de suporte à decisão agrícola) para manejo de irrigação na região de Araçuaí-MG**. 2000.

BRASIL. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 454, de 1º de novembro de 2012**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 6 nov. 2012.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Avaliação do Potencial do Lítio no Brasil: Área do Médio Rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2016.

DUFFUS, J. H. "Heavy metals" — a meaningless term? **Pure and Applied Chemistry**, v. 74, n. 5, p. 793–807, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Bioma Cerrado**. Brasília: EMBRAPA, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cerrados/colecao-entomologica/bioma-cerrado>. Acesso em: nov. 2024.

FILHO, J. C. M. **Mapa Geológico - Folha Novo Cruzeiro - SE.24-V-C-1**. CODEMIG, 2014. Disponível em: http://www.portageologia.com.br/wp-content/uploads/2013/09/relatorio_novo_cruzeiro.zip. Acesso em: 8 jul. 2023.

FÖRSTNER, U.; WITTMANN, G. T. W. **Metal Pollution in the Aquatic Environment**. Berlin: Springer, 1981.

HARE, P. W.; GARDNER, T. W. Geomorphic Indicators of Vertical Neotectonism along Converging Plate Margins, Nicoya Peninsula Costa Rica. In: MORISAWA, M.; HACK, J. T. **Tectonic Geomorphology**. Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium. 15. ed. Boston: Allen and Unwin, 1985. p. 123-134.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Portal do INMET**. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 14 nov. 2024.

KABATA-PENDIAS, A. Trace elements in soils and plants. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

KÖPPEN-GEIGER, W. **Climatologia: com un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948.

LINS, A. S. C. **Manual técnico da área de Geoquímica – Versão 5.0**. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2003. Disponível em: <https://encurtador.com.br/lryS9>. Acesso em: 20 set. 2022.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011**. Estabelece diretrizes para licenciamento ambiental no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>. Acesso em: 19 nov. 2024.

MORTATTI, J.; HISSLER, C.; PROBST, J.-L. Distribuição de metais pesados nos sedimentos de fundo ao longo da bacia do rio Tietê. Geologia USP. Série Científica, v.10, n.2, p.3–11, 2010. Disponível em: <https://papegeo.igc.usp.br/portal/wp-content/uploads/tainacan-items/13065/48229/3230-3761-1-PB.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2024.

NOCE, C. M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; SILVA, L. C.; ALKMIN, F. F. O embasamento arqueano e paleoproterozoico do orógeno Araçuaí. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 17-23, 2007.

OLIVEIRA, F. R.; MENEGASSE, L. N.; DUARTE, U. Hidrogeologia da região de Araçuaí, no médio vale do Rio Jequitinhonha-MG. **Águas Subterrâneas**, 2000. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24129>. Acesso em: 14 nov. 2024.

OTONI, T. C. O. **Levantamento etnobotânico de plantas utilizadas com fins medicinais e cosméticos em comunidades tradicionais do município do Araçuaí, Minas Gerais**. 2018. 140 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

PAES, V. J. C.; RAPOSO, F. O.; PINTO, C. P.; OLIVEIRA, F. A. R. **Projeto Jequitinhonha, Estados de Minas Gerais e Bahia: texto explicativo**. Belo Horizonte: CPRM-BH, 2010. Disponível em: https://minerva.ufrrj.br/F/?func=direct&doc_number=000771422&local_base=UFR01. Acesso em: 8 jul. 2023.

PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; ALKMIN, F.; SILVA, L.C.; BABINSKI, M.; CORDANI, U.; CASTAÑEDA, C. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 15-30, 2007.

PEDROSA-SOARES, A. C.; CHAVES, M. L. S. C.; SCHOLZ, R. Eastern Brazilian Pegmatite Province – Field Trip Guidebook. Recife: PEG 2009 – 4th **International Symposium on Granitic Pegmatites**, 2009. 60 p.

PEDROSA-SOARES, A. C. O Orógeno Araçuaí à luz da Geocronologia: um tributo a Umberto Cordani. In: BARTORELLI, A.; TEIXEIRA, W.; NEVES, B. B. de B. (org.). **Geocronologia e Evolução Tectônica do Continente Sul-Americano**. 1. ed. São Paulo: Solaris Edições Culturais, 2020. p. 250-272.

SILVA, M. L.; ANDRADE, M. C. K. Os impactos ambientais da atividade mineradora. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v.11, n.6, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324213012_Os_impactos_ambientais_da_atividade_mineradora. Acesso em: 28 abr. 2025.

SOUZA, J. C. **Análise geoquímica da água superficial e de abastecimento da bacia hidrográfica do rio Piauí, localizada na província litinífera do estado de Minas Gerais**. 2024. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2024.

TRINDADE, W. M.; HORN, A. H.; RIBEIRO, E. V. Concentrações de metais pesados em sedimentos do rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora-MG: geoquímica e classificação de risco ambiental. **Geonomos**, v. 20, n. 1, p. 64–75, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11729> Acesso em: 14 maio 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Chromium in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality**. Geneva: WHO, 2003. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-WSH-03.04-CR>. Acesso em: 07 mar. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Zinc in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality**. Geneva: WHO, 2001. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9241545046>. Acesso em: 7 mar. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Lead in drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality**. Geneva: WHO, 2011. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-WSH-03.04-09>. Acesso em: 07 mar. 2024.

Recebido: 05/07/2025

Aceito: 15/08/2025