



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Charlysson Lourival Fernandes Reis

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SEDIMENTOS FLUVIAIS DA
SUB-BACIA DO RIO MARANHÃO, MINAS GERAIS

MONOGRAFIA nº 568

Ouro Preto
Outubro de 2025

Charlysson Lourival Fernandes Reis

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SEDIMENTOS FLUVIAIS DA
SUB-BACIA DO RIO MARANHÃO, MINAS GERAIS**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso
apresentado ao Departamento de Geologia da
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito parcial para avaliação da
disciplina Projeto final de curso II – GEO144, ano
2025.

Orientador: Dr. Lucas Pereira Leão

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R375a Reis, Charlysson Lourival Fernandes.

Avaliação da qualidade dos sedimentos fluviais da sub-bacia do rio Maranhão, Minas Gerais. [manuscrito] / Charlysson Lourival Fernandes Reis. - 2025.

95 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Pereira Leão.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geoquímica ambiental. 2. Sedimentos fluviais - Contaminação. 3. Avaliação de riscos ecológicos. I. Leão, Lucas Pereira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 550.46

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Charlysson Lourival Fernandes Reis

Avaliação da qualidade dos sedimentos fluviais da sub-bacia do rio Maranhão, Minas Gerais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 10 de outubro de 2025

Membros da banca

Dr - Lucas Pereira Leão - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Hermínio Arias Nalini Júnior - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Raphael de Vicq Ferreira da Costa - Universidade do Minho

Lucas Pereira Leão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/10/2025



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Pereira Leão, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/10/2025, às 08:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1005090** e o código CRC **9F892FE4**.

AGRADECIMENTOS

Hoje, encerro a mais longa das minhas caminhadas. Foram inúmeros os obstáculos, todos superados com o apoio e a generosidade de outras pessoas. Compartilho esta vitória com minha família, especialmente meus pais, Teresinha e Lourival, pelo esforço incansável e pelos sacrifícios feitos para me motivar e me manter em Ouro Preto. Sou grato também aos muitos amigos e irmãos que a geologia me presenteou, em especial Didacio, Daniel, Batheus, Seru e Caio. Agradeço ao meu orientador, Lucas Leão, pela confiança depositada e pela disposição em contribuir para a realização deste trabalho. Por fim, um agradecimento especial aos moradores, amigos e ex-alunos da República 4 Doses, minha casa durante todos esses anos.

RESUMO

A bacia do rio Maranhão localiza-se na porção central do estado de Minas Gerais, abrangendo os municípios de Conselheiro Lafaiete, Ouro Branco e Congonhas, além de partes de Ouro Preto e Itaverava. Inserida no Quadrilátero Ferrífero, a região é fortemente impactada por atividades de mineração e siderurgia. Este trabalho avaliou a qualidade ambiental dos sedimentos de corrente da sub-bacia, com base nas concentrações de elementos traço (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn) e elementos maiores (Fe, Al e Mn), utilizando dados geoquímicos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). As amostras foram analisadas por meio de estatísticas uni e multivariadas, sendo os valores de referência (background) definidos pelo método *Tukey's Inner Fence* (TIF). Em seguida, aplicaram-se índices de contaminação, como Fator de Contaminação, Fator de Enriquecimento e Índice de Risco Ecológico Potencial, e os resultados foram comparados com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 454/2012. Os resultados indicaram que o arsênio (As) e cádmio (Cd) apresentaram os maiores valores de FE e FC, frequentemente acima dos limiares de contaminação moderada ou considerável, além de excederem o limite de efeito provável (PEC) em parte das amostras, configurando risco ecológico potencial ao meio ambiente. Essas anomalias concentram-se, principalmente, em áreas de intensa exploração mineral. Em contrapartida, Cr e Ni apresentaram valores acima da legislação em grande parte das amostras, porém os índices ambientais evidenciaram baixas contaminações. Já Ferro (Fe) e manganês (Mn) também exibiram concentrações elevadas, muitas vezes com FE superiores a 10, associados a formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero, embora possa ser intensificado por atividades minerárias. Por outro lado, chumbo (Pb), zinco (Zn) e cobre (Cu) apresentaram baixos índices de contaminação e não ultrapassaram valores de referência para efeitos adversos, indicando baixa influência antrópica. De modo geral, os sedimentos da sub-bacia refletem tanto a influência geogênica das rochas portadoras quanto impactos localizados da mineração, fornecendo subsídios para o monitoramento ambiental e a gestão dos recursos naturais da região.

Palavras-chave: Sedimentos de corrente; geoquímica ambiental; fator de enriquecimento; fator de contaminação; risco ecológico.

ABSTRACT

The Maranhão River basin is located in the central portion of Minas Gerais State, encompassing the municipalities of Conselheiro Lafaiete, Ouro Branco, and Congonhas, as well as parts of Ouro Preto and Itaverava. Situated within the Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle), the region is strongly influenced by mining and metallurgical activities. This study evaluated the environmental quality of stream sediments from the sub-basin based on the concentrations of trace elements (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) and major elements (Fe, Al, and Mn), using geochemical data provided by the Geological Survey of Brazil (CPRM). The samples were analyzed using univariate and multivariate statistical methods, and the reference (background) values were defined using the Tukey's Inner Fence (TIF) approach. Subsequently, contamination indices such as the Contamination Factor (CF), Enrichment Factor (EF), and Potential Ecological Risk Index (PERI) were applied, with the results compared to the threshold limits established by CONAMA Resolution No. 454/2012. The results indicated that arsenic (As) and cadmium (Cd) exhibited the highest EF and CF values, frequently exceeding the thresholds for moderate to considerable contamination, and surpassing the Probable Effect Concentration (PEC) in some samples, suggesting potential ecological risk. These anomalies are mainly concentrated in areas of intensive mining activity. Conversely, chromium (Cr) and nickel (Ni) showed concentrations above the legal limits in several samples; however, their environmental indices revealed low contamination levels. Iron (Fe) and manganese (Mn) also displayed elevated concentrations, often with EF values above 10, associated with the iron formations of the Quadrilátero Ferrífero, although these levels may be enhanced by mining activities. In contrast, lead (Pb), zinc (Zn), and copper (Cu) exhibited low contamination indices and did not exceed the adverse effect thresholds, indicating a low anthropogenic influence. Overall, the sediments of the Maranhão River sub-basin reflect both the geogenic influence of the host rocks and localized impacts from mining activities, providing valuable insights for environmental monitoring and natural resource management in the region.

Keywords: Stream sediments; Environmental geochemistry; Enrichment factor; Contamination factor; Ecological risk.

LISTA DE FIGURAS

Figure 2.1 - Mapa de localização da sub-bacia do rio Maranhão.....	17
Figure 2.2 - Mapa de uso e ocupação da sub-bacia do rio Maranhão.	18
Figure 2.3 - Mapa dos solos da sub-bacia do rio Maranhão.....	21
Figure 2.4 - Mapa litológico da sub-bacia rio Maranhão.	22
Figure 2.5 - Mapa da hidrografia da sub-bacia do rio Maranhão.	25
Figure 2.6 - Mapa de qualidade das águas superficiais, com contorno vermelho está delimitada a sub-bacia do rio Maranhão.	26
Figure 3.1 - Mapa dos pontos amostrados na sub-bacia do rio Maranhão.	29
Figure 3.2 - Gráfico conceito da relação entre boxplot e um histograma.	34
Figure 4.1 - Gráfico boxplot do alumínio, com o limite superior delimitado em vermelho. ...	38
Figure 4.2 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Alumínio (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	39
Figure 4.3 - Gráfico boxplot do ferro, com o limite superior delimitado em vermelho.....	40
Figure 4.4 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Ferro (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	42
Figure 4.5 - Gráfico boxplot do manganês, com o limite superior delimitado em vermelho. .	43
Figure 4.6 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Manganês (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	45
Figure 4.7 - Gráfico boxplot do arsênio, com o limite superior delimitado em vermelho.	46
Figure 4.8 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Arsênio (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	48
Figure 4.9 - Gráfico boxplot do cádmio, com o limite superior delimitado em vermelho.....	49
Figure 4.10 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Cádmio (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	50
Figure 4.11 - Gráfico boxplot do cobre, com o limite superior delimitado em vermelho.....	51
Figure 4.12 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Cobre (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão	52
Figure 4.13 - Gráfico boxplot do cromo, com o limite superior delimitado em vermelho.	53
Figure 4.14 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Cromo (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	54
Figure 4.15 - Gráfico boxplot do chumbo, com o limite superior delimitado em vermelho....	55
Figure 4.16 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Chumbo (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	57
Figure 4.17 - Gráfico boxplot do Níquel, com o limite superior delimitado em vermelho.....	58
Figure 4.18 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Níquel (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	59
Figure 4.19 - Gráfico boxplot do zinco, com o limite superior delimitado em vermelho.....	60
Figure 4.20 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Zinco (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	62
Figure 5.1 - Mapa de interpolação IDW da distribuição dos fatores de contaminação dos elementos maiores nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	63

Figure 5.2 - Mapa de interpolação IDW da distribuição dos fatores de contaminação dos elementos traços nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	64
Figure 5.3 - Mapa de interpolação IDW dos fatores de enriquecimento dos elementos Fe e Mn.	73
Figure 5.4 - Mapa de interpolação IDW dos fatores de enriquecimento dos elementos traços nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	73
Figure 5.5 - Mapa de interpolação IDW do Risco Ecológico (RI) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.	85
Figure 5.6 - Gráfico scree plot.	86
Figure 5.7 - Gráfico de loading.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Percentual de ocupação dos solos na área da bacia do rio Maranhão.	20
Tabela 3.1 - Valores do fator de enriquecimento e classificação de acordo com Sutherland (2000).	31
Tabela 3.2 - Valores de FC e classificação de acordo com Hakanson (1980).	32
Tabela 3.3 - Classificação Er e RI segundo Hakanson (1980).	33
Tabela 4.1 - Dados estatísticos da bacia do rio Maranhão.	36
Tabela 5.1 - Fator de contaminação para o Ferro.	65
Tabela 5.2 - Fator de contaminação para o Manganês.	66
Tabela 5.3 - Fator de contaminação para o Arsênio.	66
Tabela 5.4 - Fator de contaminação para o Cádmio.	68
Tabela 5.5 - Fator de contaminação para o Cobre.	68
Tabela 5.6 - Fator de contaminação para o Cromo.	69
Tabela 5.7 - Fator de contaminação para o Chumbo.	70
Tabela 5.8 - Fator de contaminação para o Níquel.	71
Tabela 5.9 - Fator de contaminação para o Zinco.	72
Tabela 5.10 - Fator de enriquecimento para o Ferro.	75
Tabela 5.11 - Fator de enriquecimento para o Manganês.	76
Tabela 5.12 - Fator de enriquecimento para o Arsênio.	78
Tabela 5.13 - Fator de enriquecimento para o Cádmio.	79
Tabela 5.14 - Fator de enriquecimento para o Cobre.	80
Tabela 5.15 - Fator de enriquecimento para o Cromo.	81
Tabela 5.16 - Fator de enriquecimento para o Chumbo.	81
Tabela 5.17 - Fator de enriquecimento para o Níquel.	82
Tabela 5.18 - Fator de enriquecimento para o Zinco.	83
Tabela 5.19 - Tabela com os componentes PCA.	87
Tabela 5.20 - Tabela com níveis de classificação do material a ser dragado em água doce segundo a resolução CONAMA 454/12.	88
Tabela 5.21 - Tabela de classificação da qualidade dos sedimentos para elementos traço segundo a resolução CONAMA 454/12.	89

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 APRESENTAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 JUSTIFICATIVA	14
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
2.1 LOCALIZAÇÃO.....	16
2.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	17
2.3 CLIMA	18
2.4 PEDOLOGIA	19
2.5 CONTEXTO GEOLÓGICO	21
2.5.1 Cinturão Mineiro	22
2.5.2 Quadrilátero Ferrífero.....	23
2.6 HIDROGRAFIA	24
2.6.1 Águas superficiais	25
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS	28
3.2.1 Base Cartográfica	28
3.2.2 Dados Geoquímicos	28
3.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS.....	29
3.3.1 Análise univariada.....	29
3.3.2 Análise multivariada.....	30
3.4 ÍNDICES DE AVALIAÇÃO	30
3.4.1 Fator de Enriquecimento (FE).....	30
3.4.2 Fator de Contaminação (FC)	31
3.4.3 Risco Ecológico (RI).....	32
3.5 CÁLCULO DOS VALORES DE REFERÊNCIA (<i>BACKGROUND</i> GEOQUÍMICO).....	33
3.5.1 Legislação Vigente	34
3.5.2 Representação espacial dos dados.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36

4.1	ELEMENTOS MAIORES	37
4.1.1	Alumínio.....	37
4.1.2	Ferro	39
4.1.3	Manganês.....	42
4.2	ELEMENTOS TRAÇO	45
4.2.1	Arsênio	45
4.2.2	Cádmio	48
4.2.3	Cobre	50
4.2.4	Cromo.....	52
4.2.5	Chumbo	54
4.2.6	Níquel	57
4.2.7	Zinco.....	59
5	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SEDIMENTOS.....	63
5.1	FATOR DE CONTAMINAÇÃO	63
5.1.1	Ferro	64
5.1.2	Manganês.....	65
5.1.3	Arsênio	66
5.1.4	Cádmio	67
5.1.5	Cobre	68
5.1.6	Cromo.....	69
5.1.7	Chumbo	70
5.1.8	Níquel	70
5.1.9	Zinco.....	71
5.2	FATOR DE ENRIQUECIMENTO.....	72
5.2.1	Ferro	74
5.2.2	Manganês.....	75
5.2.3	Arsênio	76
5.2.4	Cádmio	78
5.2.5	Cobre	79
5.2.6	Cromo.....	80
5.2.7	Chumbo	81
5.2.8	Níquel	82
5.2.9	Zinco.....	83

5.3	RISCO ECOLÓGICO POTENCIAL	84
5.4	ANÁLISE MULTIVARIADA	85
5.5	CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A CONAMA 454/12	88
6	CONCLUSÃO.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	ANEXOS	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Os mapeamentos geoquímicos são ferramentas importantes para identificar a concentração e distribuição de elementos químicos em ambientes, com aplicações na prospecção mineral e na avaliação de contaminantes em solos e recursos hídricos. Esses mapeamentos refletem a influência de fatores geológicos, biológicos e antrópicos. Realizados em escala regional em diversas partes do mundo, como Europa, Canadá e China, eles têm contribuído para a exploração mineral, o gerenciamento do uso do solo e o desenvolvimento de políticas ambientais, além de estudos relacionados à saúde humana, animal e ambiental (LARIZZATI *et al.*, 2014). No entanto, para que os dados geoquímicos identificados sejam corretamente interpretados, torna-se necessário a definição de valores de referência, *background* geoquímico, a partir destes valores é possível distinguir concentrações naturais de um elemento.

De acordo com Rodrigues *et al.* (2009), o termo “*background* geoquímico” ainda não é muito utilizado, diversos autores usam outras nomenclaturas, como “fundo de referência” ou “*background* antropogênico” entre outros, fato é que o estabelecimento de valores tem sido crucial em estudos ambientais pois possibilita distinguir as concentrações naturais de elementos químicos presente no meio. A partir desses valores gerados é possível identificar através de análises dos dados obtidos no mapeamento geoquímico regiões onde um determinado elemento tem uma concentração anômala. Nesse contexto, quando combinado ao uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o mapeamento geoquímico torna-se ainda mais poderoso, permitindo a integração de dados espaciais e geoquímicos para criar representações visuais detalhadas da distribuição de elementos químicos, além de auxiliar em políticas públicas de gestão ambiental (VICQ *et al.*, 2023).

Essa abordagem se torna ainda mais relevante em regiões como o Quadrilátero Ferrífero, devido às suas grandes reservas minerais e características geológicas. Diversos autores já produziram trabalhos em bacias dentro dos limites do QF e encontraram resultados com concentrações anômalas de diversos elementos, como As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn (LEÃO *et al.*, 2021; LARIZZATTI *et al.*, 2014; VICQ *et al.*, 2023).

Nesse Contexto, este trabalho utiliza-se desse método para analisar sedimentos da sub-bacia do rio Maranhão, região marcada pela intensa exploração mineral e pela presença de atividades siderúrgicas, fatores que podem contribuir para a elevação das concentrações de

elementos potencialmente tóxicos. Os resultados foram obtidos através do tratamento estatístico de dados públicos da CPRM, com intuito de identificar concentrações dos elementos traço (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn) e elementos maiores e menores (Fe, Al e Mn).

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar a caracterização geoquímica detalhada de sedimentos da sub-bacia do rio Maranhão (MG), com vistas a avaliar a qualidade ambiental dessa matriz e identificar possíveis fontes de contaminação. A análise buscará definir valores de referência (*background*) geoquímicos para os elementos presentes, comparando os resultados com os parâmetros estabelecidos pelas Resoluções CONAMA nº 454/2012. Essa avaliação permitirá compreender a influência da geologia, do uso e ocupação do solo nas concentrações químicas observadas, além de identificar áreas impactadas.

Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Produzir um banco de dados geoquímicos para sedimentos da sub-bacia do rio Maranhão;
- Definir valores de *background* geoquímico e produzir mapas de distribuição espacial para os elementos analisados;
- Identificar possíveis fontes das concentrações químicas, diferenciando aquelas de origem antrópica das geogênicas;
- Avaliar a extensão da contaminação ambiental e sua relação com atividades econômicas predominantes, como mineração, siderurgia e urbanização.

Com os resultados obtidos, espera-se contribuir para o entendimento do comportamento geoquímico de elementos nos sedimentos da sub-bacia, fornecendo subsídios técnicos e científicos para a gestão sustentável dos recursos naturais. Esses dados poderão ser utilizados pela comunidade acadêmica, órgãos governamentais e o setor privado para a formulação de políticas voltadas à conservação ambiental e ao planejamento territorial.

1.3 Justificativa

A sub-bacia do rio Maranhão, situada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, é historicamente reconhecida pela intensa atividade mineradora e siderúrgica, que desempenha um papel essencial na economia local e nacional. Contudo, essa relevância econômica está frequentemente associada a significativos impactos ambientais, resultantes das práticas de exploração mineral. A mineração, apesar de ser um motor do desenvolvimento, gera uma ampla

gama de poluentes, como arsênio e manganês, além de outros elementos traço, como níquel e cromo, que podem ser associados tanto às atividades humanas quanto às litologias naturais da região (KARLSSON e WESTERLUND, 2002).

O rompimento da barragem de Brumadinho, em 2019, na bacia do rio Paraopeba, da qual o rio Maranhão faz parte, exemplifica a gravidade dos danos ambientais causados por acidentes na mineração. Cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro foram despejados, resultando em sérios danos aos ecossistemas aquáticos, à qualidade dos solos e aos recursos hídricos (ROTTA *et al.*, 2020). Esse desastre destacou a urgente necessidade de monitoramento e avaliação contínua dos contaminantes potenciais na região.

Nesse contexto, a análise geoquímica de sedimentos de corrente torna-se uma ferramenta indispensável para compreender a influência da geologia e das atividades antrópicas na distribuição de elementos químicos. Além disso, permite a definição de valores de *background* geoquímico, essenciais para quantificar impactos, identificar fontes de contaminação e elaborar planos eficazes de recuperação ambiental em casos de grandes vazamentos de poluentes.

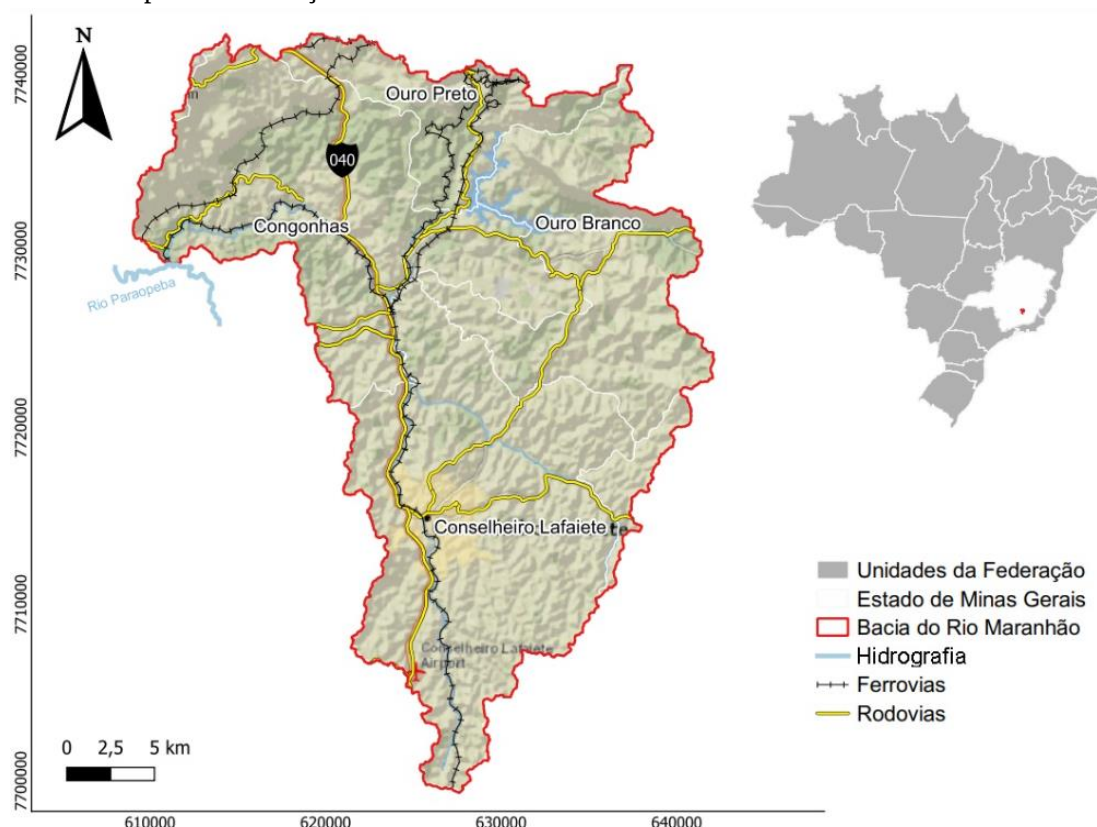
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A sub-bacia do rio Maranhão está localizada na região sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, e constitui um importante afluente da parte alta da bacia do rio Paraopeba, integrando, portanto, o sistema hidrográfico da bacia do rio São Francisco. A área de estudo tem aproximadamente 715 Km², abrangendo os municípios de Conselheiro, Lafaiete, Congonhas, Ouro Branco, além de pequenas porções de Ouro Preto e Itaverava (MATOS e DIAS, 2012; IGAM, 2003), como mostrado na Figura 2.1.

A região possui uma malha de transporte bem desenvolvida, fator de grande importância para a logística das atividades econômicas e de mineração. A principal rodovia que corta a sub-bacia é a BR-040, que conecta Brasília ao Rio de Janeiro, passando por Belo Horizonte, além do transporte rodoviário, a região também possui uma grande malha ferroviária para transporte de cargas, especialmente de minério de ferro para litoral Brasileiro (IGAM, 2003).

Figure 2.1 - Mapa de localização da sub-bacia do rio Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor através do *software* Qgis.

2.2 Uso e ocupação do solo

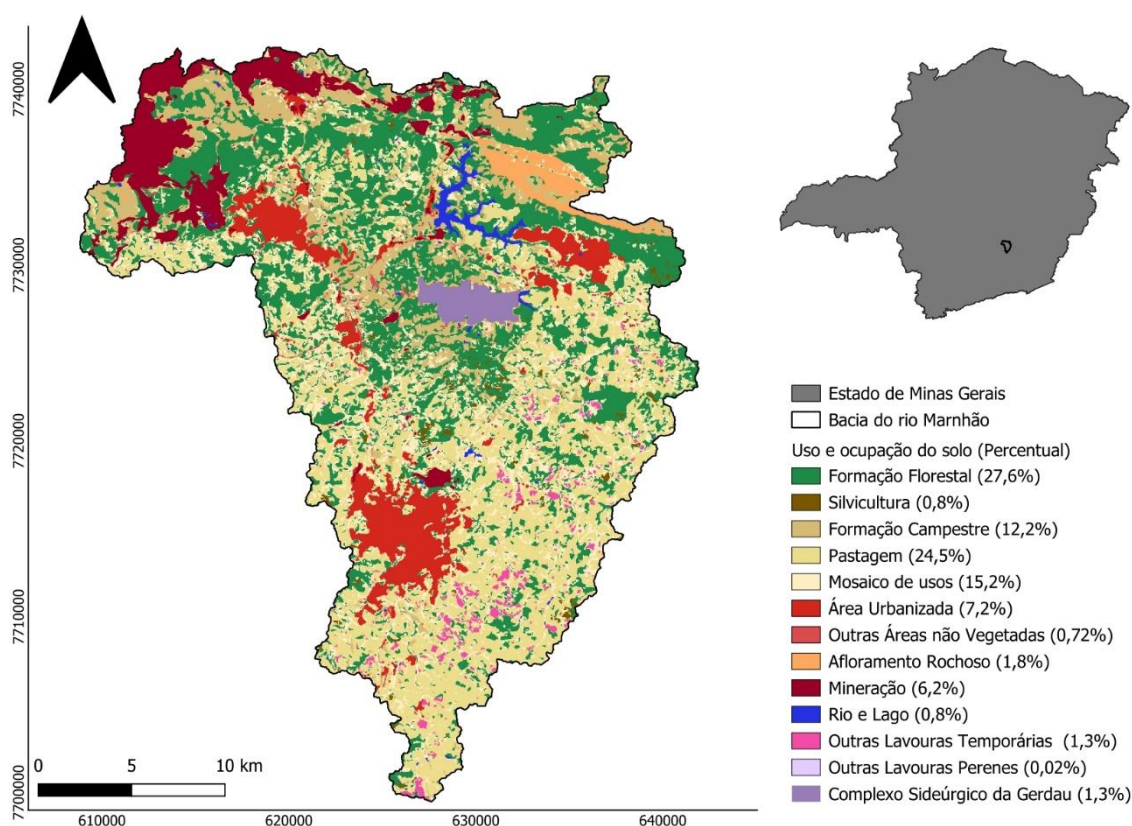
A área da sub-bacia do rio Maranhão tem uma rica história de uso e ocupação, que começou ainda no período colonial. A descoberta de ouro no século XVII atraiu muitas pessoas, resultando no surgimento de vilas, as atuais Ouro Preto, Ouro Branco e Congonhas, que se tornaram importantes centros para o ciclo do ouro. Esta intensa atividade de mineração moldou a ocupação nesta região e desempenhou um papel crucial na economia do país. Após o declínio da exploração do ouro, a mineração de ferro passou a ter um maior destaque, principalmente depois do século XX (ROESER e ROESER, 2015). Atualmente, a região do rio Maranhão abriga uma população aproximada de 230.000 habitantes, concentrando-se principalmente nas cidades de Congonhas, Conselheiro Lafaiete e Ouro Branco (IBGE, 2022), ainda com forte influência da atividade mineradora.

Segundo Matos e Dias (2012), a sub-bacia rio Maranhão é responsável por grande parte da mineração na bacia do rio Paraopeba, ocupando um pouco mais que 6% da área da bacia do rio Maranhão, além disso, a região possui grande complexo siderúrgico em Ouro Branco

(Figura 2.2). Ainda de acordo com os autores, Conselheiro Lafaiete se destaca pelas atividades industriais, sendo o município com a maior população e o polo comercial da região.

Conforme pode ser observado na Figura 2.2, quase 40% da área é dominada por formação florestal e campestre, sobretudo, ao norte da bacia. Já na região mais ao sul, o uso dominante é de pastagens ou em mosaico com outros usos, representando quase 40% da área. Apesar das grandes áreas dominadas por pastagens, a região não se destaca pela sua importância no setor agropecuário (IGAM,2003), essas atividades possuem um papel secundário na economia local, sendo voltadas principalmente para a subsistência e o mercado interno.

Figure 2.2 - Mapa de uso e ocupação da sub-bacia do rio Maranhão.



Fonte: IDE-SISEMA/Mapbiomas.

2.3 Clima

O clima da sub-bacia rio Maranhão é caracterizado pelo predomínio de temperaturas amenas durante todo o ano, com médias mensais sempre inferiores a 22°C. O inverno é bastante rigoroso, com médias mensais variando de 10°C a 15°C e médias mínimas da ordem de 8°C. O verão é suave, com os meses de janeiro e fevereiro apresentando temperaturas médias mais elevadas em torno de 23,5°C, estas características são representativas como clima tropical semiúmido de Köppen e de Thornthwaite (Figura 2.3), com duas estações bem definidas, uma

estação seca, que ocorre entre os meses de abril a setembro, e uma estação chuvosa, de outubro a março. Esse regime climático é comum em regiões de transição entre áreas mais úmidas e as zonas secas do interior do país. A precipitação média anual é aproximadamente 1300 mm, concentrando-se no verão, onde as temperaturas podem atingir máximas superiores a 30°C e mínimas abaixo dos 10°C (IGAM, 2003; MARTINS *et al.*, 2018).

2.4 Pedologia

A sub-bacia do rio Maranhão é caracterizada por uma transição geomorfológica que reflete a interação entre os limites do Quadrilátero Ferrífero, ao norte, e o Cinturão Mineiro, que ocupa a porção central e sul, como observado no mapa abaixo (Figura 2.4). Essa variação geológica influencia diretamente a formação e distribuição dos solos na região. A diversidade litológica do substrato, composta por rochas intensamente intemperizadas e deformadas, determina as características pedológicas ao longo da bacia, conforme as condições climáticas e topográficas.

Na porção norte da sub-bacia, predominam os Neossolos Litólicos Distróficos, associados às áreas de relevo acidentado e substrato rochoso exposto, ocupam uma área de aproximadamente 23% da bacia (Tabela 2.1). Esses solos são rasos, com profundidade inferior a 50 cm, apresentando um contato direto com a rocha consolidada. Sua formação está relacionada à degradação de rochas resistentes ao intemperismo, como quartzitos e metaconglomerados da região, e resultam em baixa capacidade de retenção de água e nutrientes. Sua drenagem é boa, mas o solo é altamente suscetível à erosão em condições de desmatamento ou uso inadequado (EMBRAPA, 2018).

Nas regiões centro norte e noroeste, a paisagem é dominada por Cambissolos Háplicos Tb Distróficos e Latossolos Vermelhos Distróficos (Figura 2.3). Segundo a classificação SiBCS (EMBRAPA, 2006), os Cambissolos representam solos jovens com horizonte B incipiente, evidenciando sinais iniciais de desenvolvimento. Sua fertilidade natural é baixa e sua ocorrência em encostas acentua os riscos de erosão. Já os Latossolos Vermelhos, encontrados em terrenos de relevo mais suave, são solos profundos, com alta concentração de óxidos de ferro que conferem sua coloração avermelhada, esses solos apresentam boa drenagem e estrutura granular estável.

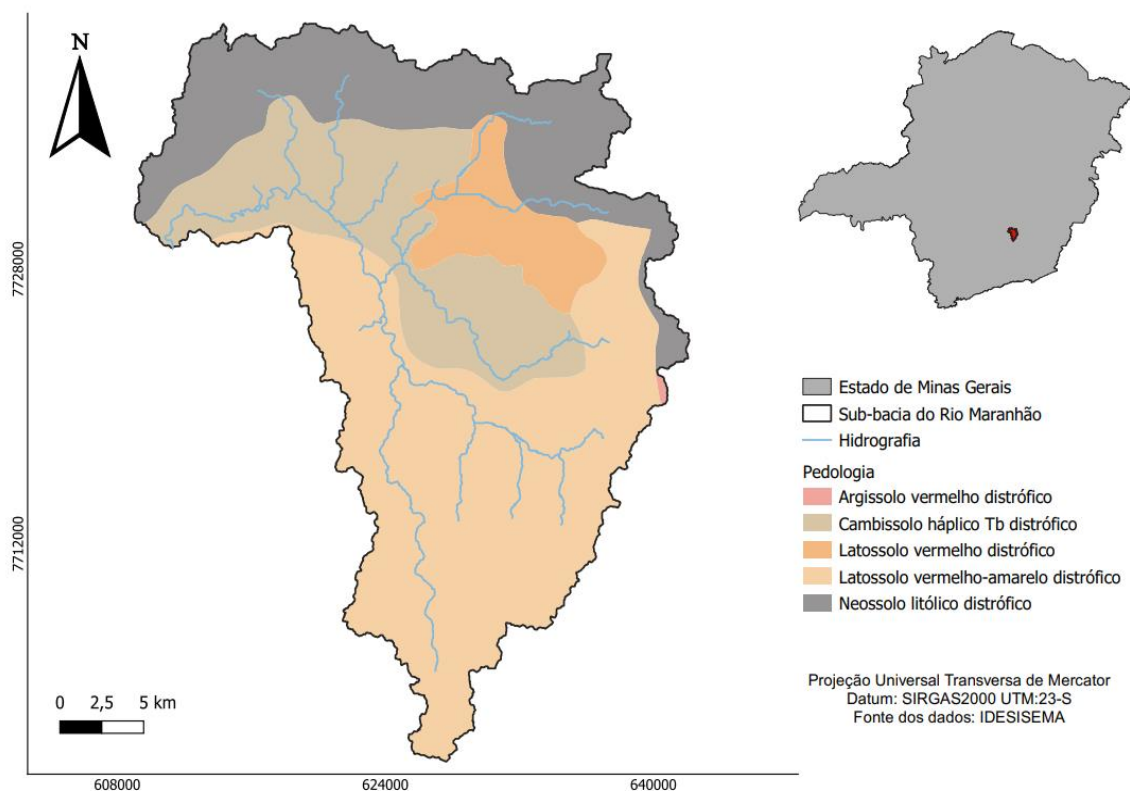
A maior parte da sub-bacia é coberta por Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, ocupando uma área de aproximadamente 47% (Tabela 2.1), sobretudo, nas regiões central e sul, onde predominam relevos mais suaves e menos acidentados. De acordo com a Embrapa (2006),

estes solos, assim como os Latossolos Vermelhos, são profundos e bem drenados, mas possuem uma coloração intermediária devido à maior proporção de óxidos de alumínio e goethita.

Tabela 2.1 - Percentual de ocupação dos solos na área da bacia do rio Maranhão.

Tipo de solo	Percentual de ocupação da área (aproximadamente)
Argissolo vermelho distrófico	0,1%
Cambissolo háplico Tb distrófico	23,3%
Latossolo vermelho distrófico	7,5%
Latossolo vermelho-amarelo distrófico	46,6%
Neossolo litólico distrófico	23,4%

Figure 2.3 -Mapa dos solos da sub-bacia do rio Maranhão.

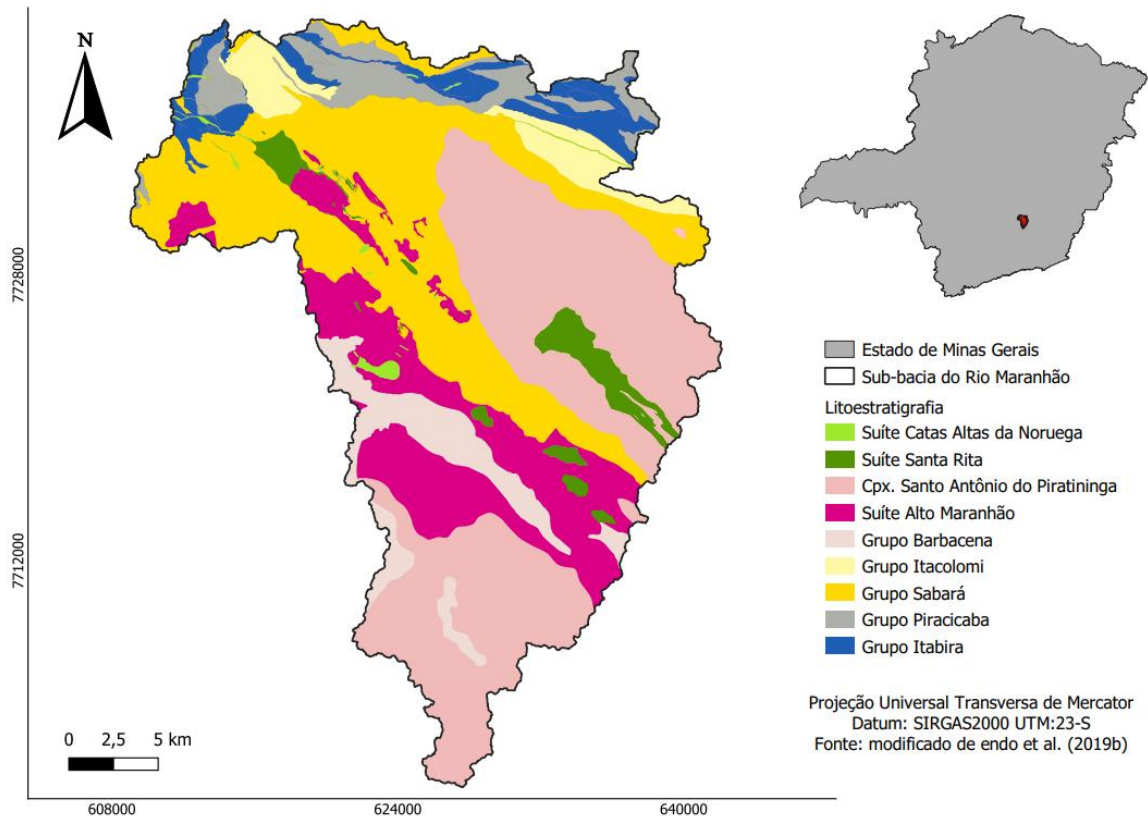


Fonte: IDE-SISEMA/Mapbiomas.

2.5 Contexto Geológico

A sub-bacia do rio Maranhão está situada na porção central de Minas Gerais, localiza-se sobre as unidades geotectônicas da borda sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (QF) em contato com as rochas do Cinturão Mineiro. Enquanto as cabeceiras situam-se sobre complexos metamórficos e granitóides do Cinturão Mineiro, rochas que constituem a parte mais a jusante pertencem ao QF (Figura 2.4). Segundo Isamu *et al.* (2019), as rochas que afloram na região fazem parte dos Grupos Itacolomi, Sabará, Barbacena, Piracicaba, Itabira, além das Suítes Santa Rita, Catas Altas da Noruega, Alto Maranhão e o Complexo Metamórfico Santo Antônio do Pirapetinga.

Figure 2.4 - Mapa litológico da sub-bacia rio Maranhão.



Fonte: Modificado: Endo et al. 2019b.

2.5.1 Cinturão Mineiro

O Cinturão Mineiro localiza-se na borda sul do Quadrilátero Ferrífero, sua formação está associada à acreção de arcos de ilha e arcos continentais durante o Paleoproterozóico, na Orogenia Riacciana, é delimitado ao norte pelo lineamento Jeceaba-Bom Sucesso e ao sul pelos terrenos de alto grau metamórfico, o Cinturão Mineiro apresenta principalmente granitóides do paleoproterozóicos, sobretudo tonalitos-trondhjemitos-granodioritos (TTGs) (TEIXEIRA *et al.*, 2015).

As principais rochas que afloram na região da sub-bacia fazem partes das unidades, Suíte Alto Maranhão, compostos por metatonalitos com autótilos dioríticos e injeções de granitoides e pegmatitos, são rochas mais novas de idades entre 2130 ± 2 Ma e 2128 ± 10 Ma, de origem crustal e retrabalhada pela orogenia Riacciana (SEIXAS *et al.*, 2013). A Suíte Santa Rita é caracterizada por rochas cálcio-alcálinas, compostas por granitoides tonalíticos a trondhjemiticos, ricas em quartzo, plagioclásio e microclina, são formadas em zonas de fusão parcial, e por vezes apresentam foliações muito bem marcadas e feições miloníticas, que indicam influência de intensos processos de deformação, sua idade é aproximadamente 2,35 Ga (TEIXEIRA *et al.*, 2015). Já a Suíte Catas Altas da Noruega que aflora em pequenas partes na

porção central e norte da sub-bacia, é formada por rochas tonalíticas e granodioríticas com características calcio-alcálicas e metaluminosas, possivelmente desenvolvidas em um contexto de arco continental, compostas por quartzo, biotita e plagioclásio, apesar de possuir algumas propriedades parecidas com a Suíte Santa Rita, segundo Ávila *et al.* (2010) sugere que são rochas mais novas, associadas a processos tectônicos de acreção juvenil.

Na porção central da sub-bacia do Maranhão, ainda se destaca o Grupo Barbacena, sequência metavulcanicassedimentar, caracterizados por rochas máficas, ultramáficas, metaultramáficas e metassedimentos. Toledo (2002), subdivide esta unidade em duas sequências, a Rio das Mortes e Nazareno, ambas de idades paleoproterozóicas, associadas a acreção de arcos magmáticos descritos por Ávila *et al.* (2010). O Complexo Santo Antônio do Pirapetinga é a unidade predominante na área de estudo. Os principais litotipos encontrados nesta unidade incluem rochas metamáficas, metaultramáficas e gnaisses de alto grau metamórfico. Essas rochas se diferenciam pelas condições metamórficas variadas, que vão das fácies xisto verde a anfibolito, refletindo uma história complexa de tectonismo e metamorfismo que afetou o embasamento ao longo de diferentes eventos do paleoproterozóico (CAVALCANTI *et al.*, 2016), os litotipos são compostos predominantemente por anfibólio e plagioclásio, além disso a unidade contém estruturas miloníticas e uma paragênese mineral que inclui actinolita e talco, indicando a recristalização das rochas sob condições de pressão e temperatura variáveis, associados a amalgamação continental. Esses processos de deformação tectônica e fusão crustal geraram a diversidade estrutural observada hoje, marcada por zonas de cisalhamento e a presença de estruturas dúcteis miloníticas, além de feições características de boudinagem e orientação mineral, essas características indicam que a suíte foi exposta a um ciclo de deformação e metamorfismo intenso, típico de ambientes onde ocorreram ciclos tectônicos prolongados e colisões crustais, o que contribuiu para a composição complexa e a evolução tectônica do Cinturão Mineiro (SEIXAS *et al.*, 2013, TEIXEIRA *et al.*, 2015).

2.5.2 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero está localizado na porção sul do Cráton São Francisco, em Minas Gerais. O QF é marcado pela presença de sequências metasedimentares e metavulcânicas que remontam ao Arqueano e Proterozóico. Essas sequências foram intensamente deformadas e metamorfizadas por eventos tectônicos ao longo do tempo, principalmente durante os eventos Transamazônico e Brasileiro, que moldaram a estrutura da região (DORR II, 1969). Ainda segundo o autor, o QF engloba formações arqueanas compostas principalmente por gnaisses e

granitos, que representam o embasamento, sobrepostas por sequências sedimentares e vulcânicas do Paleoproterozóico, como os Supergrupos Rio das Velhas e Minas. Essas rochas são intensamente deformadas e exibem uma série de estruturas tectônicas, como dobras e zonas de cisalhamento, que evidenciam os processos compressivos que atuaram na área. As formações mais jovens, compostas por conglomerados e arenitos do Grupo Itacolomi, indicam um ambiente de sedimentação continental, enquanto as rochas mais antigas, como os itabiritos do Grupo Itabira, refletem condições de deposição em plataformas marinhas rasas.

Na sub-bacia do rio Maranhão, destacam-se principalmente as unidades do Supergrupo Minas, que afloram na porção mais ao norte da área de estudo, e a sequência metassedimentar e metavulcanossedimentar do Paleoproterozóico do Grupo Itacolomi, que é representado por quartzitos e filitos, típicos de ambientes de sedimentação continental e associados a leques aluviais e sistemas fluviais, que foram depositados após a Orogenia Transamazônica, em bacias restritas durante o colapso orogênico (DORR II, 1969). O Grupo Sabará, que representa a unidade superior do Supergrupo Minas, é composto por metassedimentos variados, incluindo conglomerados, filitos e tufos vulcânicos. Esta unidade foi depositada em ambiente de bacia sin orogênica e está em discordância erosiva sobre o Grupo Piracicaba, indicando um ambiente tectônico ativo durante o final do Paleoproterozóico (COSTA, 1961; NOCE, 1995). O Grupo Piracicaba, por outro lado, exibe formações ferríferas, quartzitos ferruginosos e filitos, que indicam deposição em ambientes de plataforma marinha rasa, favorecendo o acúmulo de minerais como ferro e manganês (BALTAZAR *et al.*, 2005).

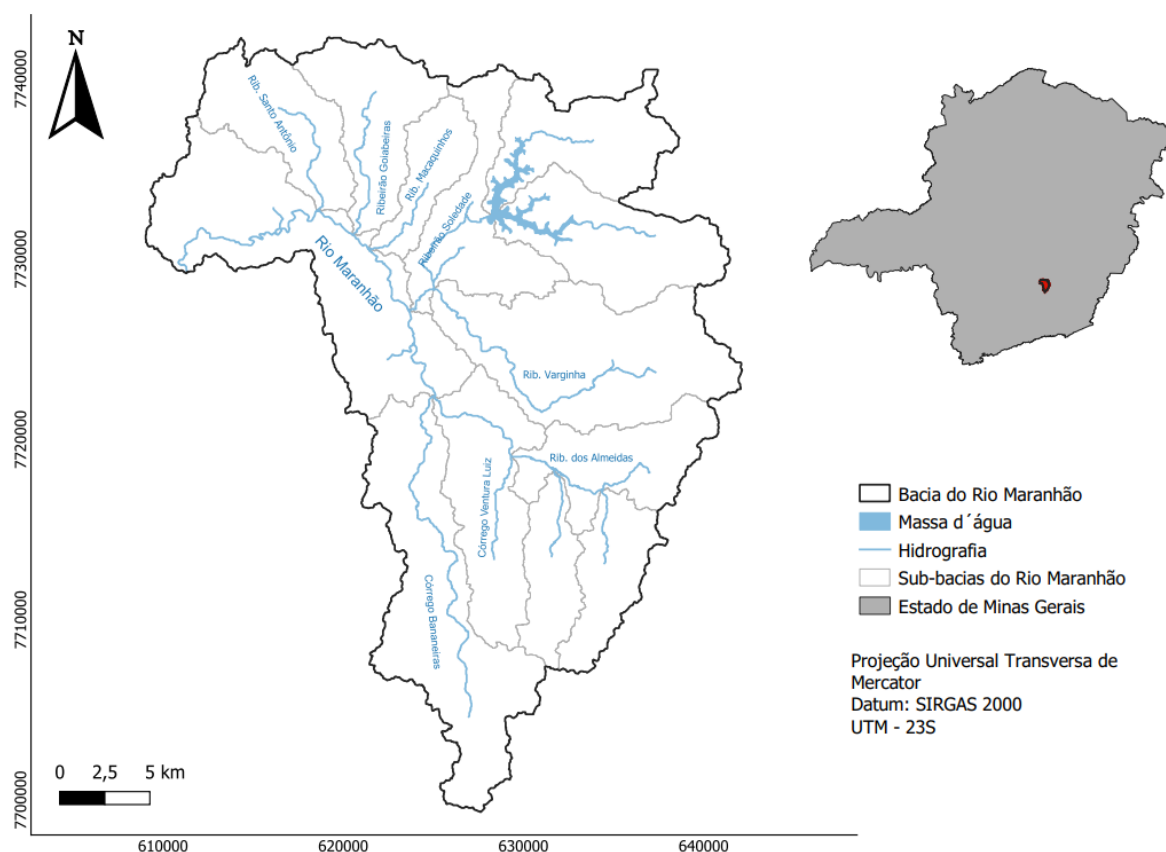
Finalmente, o Grupo Itabira é composto principalmente por Itabiritos, importantes para a formação das reservas de ferro da região. As condições deposicionais e a atividade tectônica subsequente geraram as condições para que o ferro se concentrasse nessas formações, tornando-as economicamente relevantes. Esta unidade também indica ambientes de plataforma marinha com forte influência de processos diagenéticos e supergênicos que enriqueceram o ferro presente nos itabiritos (ROSIÉRE *et al.*, 2008).

2.6 Hidrografia

A sub-bacia do rio Maranhão possui uma extensão aproximada de 715 km² e está localizada na região central de Minas Gerais, compondo a bacia do rio Paraopeba, um dos principais afluentes do rio São Francisco. Como pode ser visto na Figura 2.6, o rio Maranhão é formado pela confluência de dois cursos d'água, os ribeirões Ventura Luiz e o Bananeiras, estes nascem ao sul de Conselheiro Lafaiete e desenvolve-se no sentido norte (IGAM, 2003). Seus

principais afluentes incluem pequenos córregos e ribeirões que deságuam principalmente na margem direita, devido à proximidade com o divisor de águas do rio Paraopeba, situado a oeste.

Figure 2.5 - Mapa da hidrografia da sub-bacia do rio Maranhão.



Fonte: IDE-SISEMA.

As drenagens da região são fortemente influenciadas pela geomorfologia da área, na porção norte, onde o relevo é mais acidentado, apresenta as maiores vazões médias da bacia, aproximadamente $20 \text{ m}^3/\text{s}$, já na porção sul, onde o relevo se apresenta ondulado, a vazão é de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, próximo a Conselheiro Lafaiete. A vazão média na foz do rio Maranhão, é de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, resultando em uma vazão média específica de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, estes valores apontam para uma boa disponibilidade hídrica, mesmo em períodos de estiagem (IGAM, 2003).

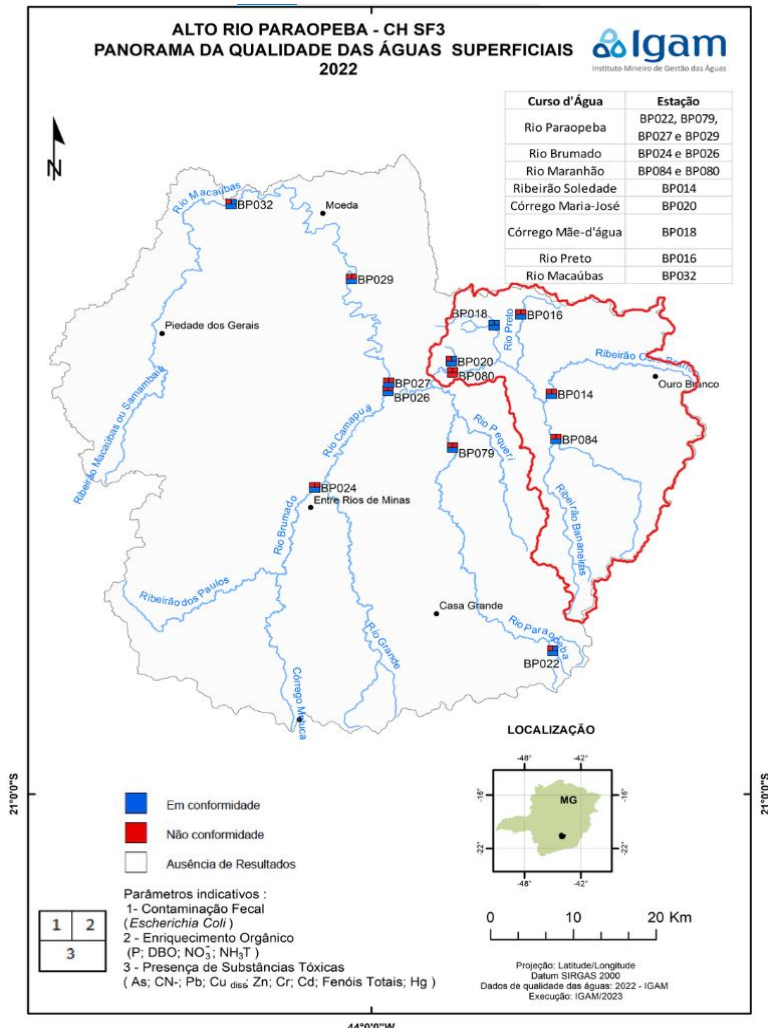
2.6.1 Águas superficiais

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, os corpos hídricos da sub-bacia do rio Maranhão, incluindo seus córregos e ribeirões, são enquadrados como classe 2. Esse enquadramento indica que suas águas podem ser utilizadas prioritariamente para abastecimento humano, desde que submetidas a tratamento convencional, além de serem adequadas para irrigação de culturas e recreação com contato secundário. Contudo, a qualidade da água em

grande parte da sub-bacia está comprometida. Conforme mostrado na figura 2.7, dos seis pontos amostrados, cinco apresentaram desconformidades com os padrões estabelecidos pela legislação vigente, como a Resolução COPAM/CERH nº 08/2022.

A contaminação é intensificada pela deposição inadequada de resíduos sólidos e pelo lançamento de efluentes não tratados diretamente nos corpos d'água. Essa prática é evidente em diversos locais ao longo da bacia, como pode ser observado nas estações de monitoramento nos rios Soledade (BP014) e Preto (BP016), além do córrego Maria José (BP020), todos afluentes do rio Maranhão (Figura 2.7). Desde sua nascente, o rio Maranhão já apresenta enriquecimento orgânico e contaminação por *Escherichia coli*, enquanto, em sua foz, são detectadas substâncias tóxicas associadas a atividades antrópicas. Esses fatores fazem com que a sub-bacia do rio Maranhão apresente um dos piores índices de qualidade da água (IQA) da bacia do Alto Paraopeba (CH-SF3), segundo dados do IGAM (2022)

Figure 2.6 - Mapa de qualidade das águas superficiais, com contorno vermelho está delimitada a sub-bacia do rio Maranhão.



Fonte: Modificado de IGAM (2022).

3 METODOLOGIA

3.1 Revisão Bibliográfica

O mapeamento de geoquímico, bem como a determinação de valores de *background* geoquímico tem se mostrado muito relevante em estudos ambientais, sobretudo ligados à contaminação de solos, sedimentos e água. Esses valores são essenciais para distinguir concentrações naturais de elementos químicos daquelas influenciadas por atividades antrópicas, permitindo uma compreensão mais precisa das interações entre os sistemas naturais e os impactos humanos (RODRIGUES et al., 2009). Ainda segundo os autores, a determinação precisa do *background* é um passo inicial indispensável para qualquer estudo de avaliação de contaminação ambiental, pois permite a elaboração de mapas geoquímicos com enfoque geoambiental, que podem servir como guias para a gestão territorial e políticas públicas.

Os valores de *background* geoquímico não necessariamente representam baixos teores de um elemento químico. Em regiões com mineralizações significativas, como as que ocorrem no Quadrilátero Ferrífero, os valores podem ser naturalmente elevados, devido aos grandes depósitos minerais e intensa atividade minerária e siderúrgica, isto torna a região um campo fértil para estudos geoquímicos ambientais, que frequentemente revelam concentrações elevadas de elementos potencialmente tóxicos nos sedimentos fluviais. Trabalho como de Vicq et al. (2023), registraram concentrações médias de As de 32,3 mg kg⁻¹ (Q3 = 20,6 mg kg⁻¹), Cd de 1,1 mg kg⁻¹ (Q3 = 1,02 mg kg⁻¹), Cr de 115 mg kg⁻¹ (Q3 = 151,3 mg kg⁻¹) e Ni de 36,3 mg kg⁻¹ (Q3 = 56,9 mg kg⁻¹), sendo aproximadamente 11 a 24% da área da bacia apresentaram valores de referência altos associados principalmente a rochas do Grupo Nova Lima. Estudos realizados no Quadrilátero Ferrífero, como produzidos por Leão (2019) e Abreu (2024) destacam a relevância do mapeamento geoquímico para identificar padrões regionais e avaliar a influência das atividades humanas na distribuição de elementos. Os autores acima citados, utilizaram metodologias parecidas e ou complementares à utilizada no presente trabalho, definindo o *background* geoquímico para os elementos (As, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb e Zn) e fazendo a distinção entre anomalias naturais e antrópicas.

A utilização de ferramentas estatísticas, como análises multivariadas e de correlações, têm se mostrado eficaz para identificar padrões de contaminação e suas fontes. Pesquisas recentes evidenciam o uso de índices como o Fator de Enriquecimento (FE) e o Fator de Contaminação (FC) para avaliar os níveis de contaminação em sedimentos, permitindo a diferenciação entre processos naturais e antrópicos (Leão, 2019). Essas metodologias também

viabilizam a comparação com padrões de qualidade ambiental estabelecidos, como os preconizados pela Resolução CONAMA nº 454/2012, que “dispõe sobre diretrizes gerais e critérios para avaliação da qualidade dos sedimentos em corpos hídricos interiores e marinhos, visando à proteção dos ecossistemas aquáticos”.

3.2 Levantamento de dados

O levantamento de dados realizado neste trabalho foi baseado na utilização de informações públicas amplamente reconhecidas por sua qualidade e abrangência. Como principal referência, foi empregado o mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno, produzido por Larizzatti *et al.* (2014), com apoio da Serviço Geológico do Brasil (CPRM), que fornece dados detalhados sobre a distribuição de elementos químicos em sedimentos. Além disso, as bases cartográficas disponibilizadas pela Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-SISEMA) foram essenciais para a representação espacial das informações e a delimitação precisa da área de estudo.

3.2.1 Base Cartográfica

Como dito anteriormente, as principais bases foram obtidas por meio da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-SISEMA/MapBiomias), empregadas para a confecção de mapas temáticos sobre uso e ocupação do solo, vegetação, clima e pedologia. Esses mapas serviram como base para a interpretação integrada da área de estudo.

Para a elaboração do mapa geológico da região, foi utilizada a base cartográfica do Quadrilátero Ferrífero, conforme dados disponibilizados por Endo *et al.* (2019; 2019b), que apresenta um detalhamento preciso das unidades geológicas presentes. Além disso, a imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), obtida por meio do portal Open Topography, foi essencial para a extração de curvas de nível, mapas de declividade, drenagem e delimitação da bacia do rio Maranhão e de suas sub-bacias hidrográficas.

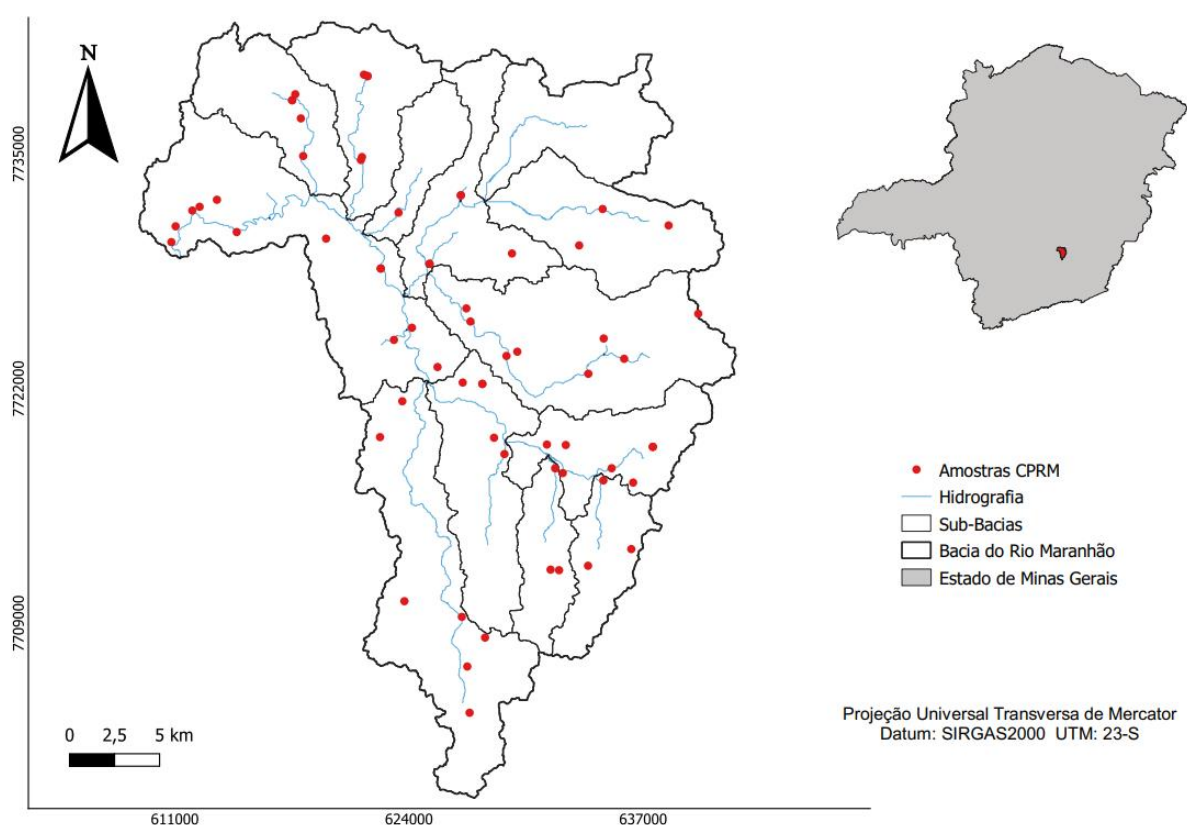
3.2.2 Dados Geoquímicos

Neste trabalho, foram utilizados dados provenientes de campanhas de amostragem de sedimentos realizadas no Quadrilátero Ferrífero por Larizzatti *et al.* (2014). As amostras foram coletadas nos anos de 2008 e 2009 com o apoio da Companhia de Pesquisa de Recursos

Minerais (CPRM). De acordo com os autores, as amostras foram coletadas, secas em temperatura ambiente e peneiradas na fração fina (<80 mesh). Posteriormente, foram analisados 53 elementos químicos utilizando espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS).

Dessas amostras, 64 estão localizadas dentro dos limites da sub-bacia do rio Maranhão (Figura 3.1), com uma densidade amostral de aproximadamente 1 amostra a cada 11 km². As amostras estão distribuídas por toda a área de estudo, com maior concentração em regiões associadas à exploração mineral e à atividade siderúrgica.

Figure 3.1 - Mapa dos pontos amostrados na sub-bacia do rio Maranhão.



Fonte: Larizzatti (2014).

3.3 Tratamento estatístico dos dados

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software MiniTab 18.

3.3.1 Análise univariada

A análise univariada é utilizada para identificar as distribuições normais de variáveis individuais dentro do conjunto de dados, que auxiliam a entender as características de cada

elemento químico analisado. Além de permitir o cálculo de parâmetros estatísticos importantes, como medidas de tendência central (média e mediana), dispersão (variância e desvio padrão) e os quartis, a partir desses dados é possível identificar valores anômalos (outliers) e valores de referência (MAPA *et al.*, 2015), essa abordagem auxilia na compreensão dos valores de *background* geoquímico para cada elemento analisado, contribuindo para identificar concentrações anômalas que possam estar associadas a fontes antrópicas ou a processos geológicos específicos.

3.3.2 Análise multivariada

A análise multivariada é utilizada para explorar as relações e interações entre várias variáveis simultaneamente. Isso é especialmente relevante na geoquímica, onde vários elementos podem apresentar interdependência, influenciando-se mutuamente (MAPA *et al.* 2015). Dentre os vários métodos para análise multivariada, neste trabalho utilizou-se a análise de componentes principais (PCA) e análise de agrupamento hierárquico (Cluster Analysis).

Como Mapa *et al.* (2015) descrevem, no método de agrupamento hierárquico utiliza-se uma matriz de similaridade, que quantifica o quão semelhantes ou diferentes as amostras são entre si, a partir desses resultados, agrupa-se de forma hierárquica pares de casos que exibem maior semelhança, em seguida as amostras são mescladas progressivamente em grupos maiores. Ainda segundo os autores, o método de análise de componentes principais (PCA) é o mais aplicado nas áreas de geociências, utilizado para simplificar conjunto de dados complexos, reduzindo sua dimensionalidade e mantendo a maior variância possível, para isso calcula-se a matriz de covariância para entender como as amostras variam em conjunto, identificando relações entre elas. Em seguida, são determinados os valores próprios, que indicam a quantidade de variação explicada por cada componente principal, e os vetores próprios, que definem a direção desses componentes no espaço das amostras. Os componentes principais com valores próprios maiores que 1 são selecionados, pois explicam a maior parte da variância. As amostras originais são então transformadas em novas variáveis não correlacionadas, chamadas componentes principais, que representam a estrutura essencial dos dados.

3.4 Índices de avaliação

3.4.1 Fator de Enriquecimento (FE)

O FE é calculado para avaliar o grau de enriquecimento de elementos químicos específicos em relação a valores já conhecidos da área de estudo. Neste trabalho utilizou-se a

metodologia descrita por Leão *et al.* (2021), que utiliza um elemento referência estável, como alumínio (Al), para normalizar as concentrações de outros.

O fator de enriquecimento é calculado pela seguinte equação:

$$FE = \frac{(X/Al)_{amostra}}{(X/Al)_{background}} \quad (1)$$

Onde:

- X é elemento químico analisado;
- Al (Alumínio) é o elemento de referência.

Os resultados encontrados vão ser interpretados de acordo com a Tabela 3.1 descrita por Sutherland (2000).

Tabela 3.1 - Valores do fator de enriquecimento e classificação de acordo com Sutherland (2000).

Valores de FE	Enriquecimento
$FE < 2$	Sem contaminação
$2 < FE < 5$	Moderado
$5 < FE < 20$	Significativo
$20 < FE < 40$	Muito alto
$FE > 40$	Extremamente alto

3.4.2 Fator de Contaminação (FC)

A partir do fator de concentração avalia-se a extensão da contaminação de um metal alvo em relação a metal de referência, por ser calculado de forma simples, é amplamente utilizado para determinação de contaminação do ambiente (LEÃO *et al.*, 2021), este índice permite uma análise direta do grau de impacto ambiental.

O FC é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$FC = \frac{Mx}{My} \quad (2)$$

Onde:

- Mx é a concentração do metal alvo
- My é a concentração do metal de referência

A interpretação dos resultados baseia-se na metodologia descrita por Hakanson (1980), seguindo os critérios da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores de FC e classificação de acordo com Hakanson (1980).

Valores de FC	Nível de contaminação
$FC < 1$	Baixo
$1 < FC < 3$	Moderado
$3 < FC < 6$	Considerável
$FC > 6$	Muito alto

3.4.3 Risco Ecológico (RI)

O índice do risco ecológico (RI) é uma ferramenta utilizada para avaliar o impacto potencial de elementos químicos tóxicos nos ecossistemas. Ele combina níveis de contaminação com a toxicidade de cada elemento, permitindo uma análise integrada dos riscos ambientais. O cálculo segue a metodologia proposta por Hakanson (1980), descrita também por Leão *et al.* (2021), utilizando-se duas equações:

$$Er = Ti \times \frac{Ci}{Bi} \quad (3)$$

Onde:

- Ti fator de toxicidade do elemento alvo, que reflete sua capacidade de causar danos ao meio ambiente, valores tabelados (Ex: Cd = 30, As = 10, Cr = 2, Ni = 2, Pb = 5, Zn = 1);

- Ci concentração do elemento alvo na amostra;
- Bi valor de *background* geoquímico do elemento alvo;

- Er é risco potencial individual.

O valor de Er indica o risco ecológico potencial de cada elemento isoladamente.

$$RI = \sum_{i=1}^n Er \quad (4)$$

Onde:

- RI é o risco ecológico.

O valor total do RI reflete o impacto cumulativo de todos os elementos químicos presentes nas amostras, a partir dos resultados utiliza-se a Tabela 3.3 descrita por Hakanson (1980).

Tabela 3.3 - Classificação Er e RI segundo Hakanson (1980).

Er	Potencial de risco ecológico	RI	Risco Ecológico
$Er < 40$	Baixo	$RI < 150$	Baixo
$40 < Er < 80$	Moderado	$150 < RI < 300$	Moderado
$80 < Er < 160$	Considerável	$300 < RI < 600$	Considerável
$160 < Er < 320$	Alto	$RI > 600$	Muito alto
$Er > 320$	Muito alto	--	--

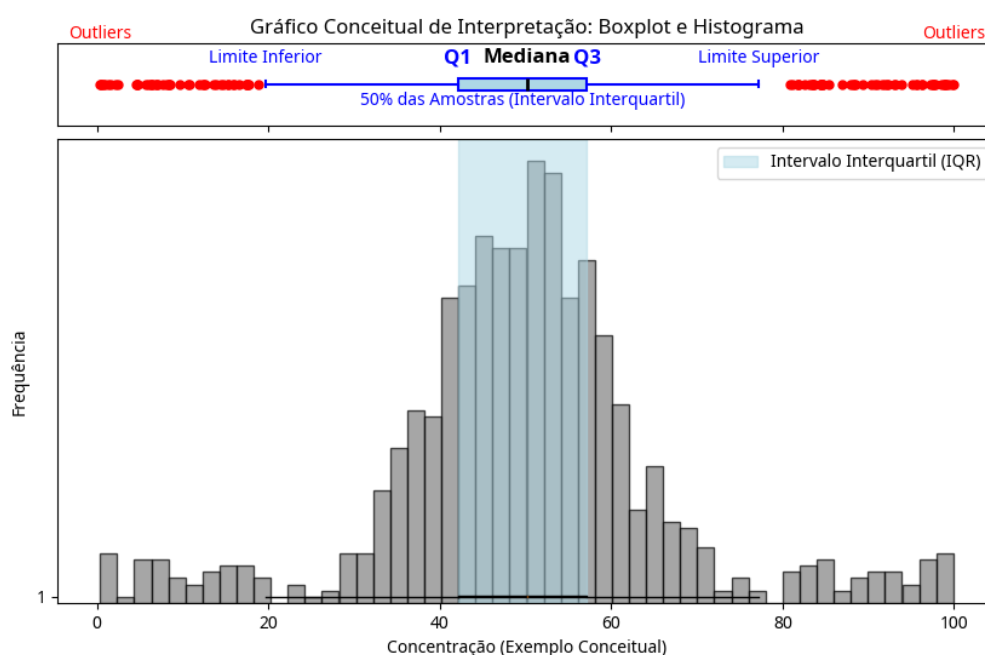
3.5 Cálculo dos valores de referência (*Background* geoquímico)

Os valores de referência ou *background* geoquímico, são fundamentais nos estudos ambientais para diferenciar as concentrações naturais de elementos químicos daquelas influenciadas por atividades antrópicas, a análise desses valores é essencial para avaliar a extensão da poluição em uma área e os impactos causados (MATSCHULLAT *et al.*, 2000; REIMANN *et al.*, 2005).

Segundo Rodrigues *et al.* (2009), os valores de *background* podem ser obtidos por diferentes métodos, que incluem abordagens geoquímicas e estatísticas. Os métodos geoquímicos são baseados na análise de amostras coletadas em áreas presumivelmente não afetadas por atividades humanas, como amostras de núcleos profundos ou locais afastados de fontes de contaminação (LEÃO *et al.*, 2021). Dentre as abordagens estatísticas, destaca-se o método *Tukey Inner Fence* (TIF), originalmente proposto por Tukey (1977) e recomendado por MATSCHULLAT *et al.*, 2000; REIMANN *et al.*, 2005) para determinação de valores de *background* geoquímico. O método TIF é baseado exclusivamente na distribuição dos dados e permite definir valores de *background* mesmo na ausência de valores nitidamente anômalos, sendo útil, por exemplo, quando o valor limite superior (threshold) ultrapassa o valor máximo observado. A metodologia consiste na aplicação do boxplot, onde o intervalo

interquartil (IQR), correspondente à diferença entre o terceiro quartil (Q3) e o primeiro quartil (Q1), compreende 50% dos dados centrais. O limite interno (*Inner Fence*) é definido estendendo esse intervalo entre quartis a 1,5 vezes, sendo que os “whiskers” (ou bigodes) do boxplot correspondem as observações mais distantes dentro dessa cerca em cada extremidade da caixa. O limite inferior (LIB) e superior (LSB ou threshold) do background geoquímico são definidos a partir da transformação logarítmica (base 10) para lidar com assimetria das distribuições, onde $LIB = 10^{(Q1 - 1,5 \times AIQ)}$ e $LSB = 10^{(Q3 + 1,5 \times AIQ)}$, a figura 3.2 exemplifica esses valores calculados em um gráfico boxplot relacionado com um histograma, é possível observar que a grande maioria dos dados é encontrada entre LIB e LSB.

Figure 3.2 - Gráfico conceito da relação entre boxplot e um histograma.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.1 Legislação Vigente

Os resultados das análises geoquímicas serão comparados com os parâmetros estabelecidos pela resolução CONAMA 454/12, que estabelece diretrizes gerais e critérios para o gerenciamento de materiais dragados em corpos hídricos sob jurisdição nacional, incluindo valores de referência para avaliar o impacto de elementos químicos nos sedimentos e seu potencial de toxicidade para organismos aquáticos.

Ao comparar os dados obtidos com esses parâmetros, será possível classificar os sedimentos da sub-bacia do rio Maranhão em relação ao nível de contaminação e identificar

áreas que necessitam de ações de mitigação. Essa análise assegura que o estudo esteja alinhado com as normas ambientais vigentes e contribui para o planejamento de estratégias sustentáveis de manejo ambiental.

3.5.2 Representação espacial dos dados

A representação espacial dos dados geoquímicos foi realizada por meio de mapas temáticos, elaborados com auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Estes mapas são essenciais para a visualização da distribuição espacial das concentrações dos elementos analisados. Os dados obtidos foram organizados em tabelas no Microsoft Excel e exportados como arquivos CSV para o software QGis Desktop 3.40, onde realizou-se a interpolação espacial das concentrações dos elementos selecionados, para isso utilizou-se o método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighting) que estima valores em locais não amostrados com base nos valores de pontos amostrados próximos, atribuindo maior peso as amostras mais próximas do ponto ser estimado, enquanto os pontos mais distantes têm menor influência. Essa relação inversa é calculada com base na distância, tornando os valores estimados dependentes da proximidade e da densidade dos pontos amostrados (LANDIM, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da análise estatística descritiva das concentrações dos elementos químicos nos sedimentos de corrente da sub-bacia do rio Maranhão. A abordagem adotada foi unielementar, permitindo avaliar individualmente o comportamento geoquímico de cada elemento, bem como identificar locais com concentrações elevadas e possíveis anomalias geoquímicas.

A identificação dessas anomalias foi realizada por meio do método estatístico proposto por Tukey (1977), como explicado no capítulo anterior. O limite superior de referência, calculado por $Q3 + 1,5 \times IQR$, foi adotado como critério para definição de anomalias. Concentrações que ultrapassam esse valor são interpretadas como anomalias, podendo estar associadas tanto a processos naturais quanto à influência antrópica.

A Tabela 4.1 apresenta os principais parâmetros estatísticos para os elementos analisados, como média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, valores mínimos e máximos, além do limite superior de referência para anomalias. Observa-se que alguns elementos exibem altos coeficientes de variação, o que reflete a heterogeneidade das amostras e a complexidade geológica da bacia, marcada pela presença de unidades ricas em minerais metálicos e por áreas impactadas por atividades mineradoras e siderúrgicas.

Dessa forma, os resultados obtidos serão discutidos em função de suas características estatísticas e de sua distribuição espacial, com apoio de mapas temáticos elaborados por interpolação IDW. Serão abordados tanto os elementos maiores, como alumínio (Al), ferro (Fe) e manganês (Mn), quanto os elementos traço arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn). A análise buscará interpretar os padrões observados à luz das litologias predominantes, da dinâmica fluvial e dos potenciais impactos antrópicos presentes na região, com destaque para o papel da geologia local na distribuição natural dos elementos e os efeitos das atividades econômicas sobre os níveis de contaminação.

Tabela 4.1 - Dados estatísticos da bacia do rio Maranhão.

Variável	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Alto valor de referência	Anomalia
Cu (PPM)	40,39	31,39	0,01	18,24	37,94	54,78	196,13	109,59	> 109,59
Pb (PPM)	15,13	8,99	0,01	10,39	13,54	17,89	55,42	29,14	> 29,14
Zn (PPM)	46,91	58,76	0,09	20,60	30,30	50,28	387,40	94,79	> 94,79
Ni (PPM)	30,33	24,83	0,09	11,40	25,95	38,53	122,60	79,21	> 79,21
As (PPM)	19,22	24,94	0,40	5,35	10,75	23,68	137,70	51,16	> 51,16
Cd (PPM)	0,08	0,19	0,01	0,03	0,05	0,07	1,34	0,13	> 0,13

Cr (PPM)	112,59	76,23	0,50	52,20	106,45	147,83	308,70	291,26	> 291,26
Al (PPM)	23149,80	15995,60	85,00	10425,00	20850,00	32350,00	80100,00	65237,50	> 65237,50
Fe (PPM)	86584,70	71145,90	100,00	39275	67100,00	106425	310200,00	207150,00	>:207150,00
Mn (PPM)	1367,02	2535,80	21,00	498,5	763,50	1563	20000,00	3159,75	> 3159,75

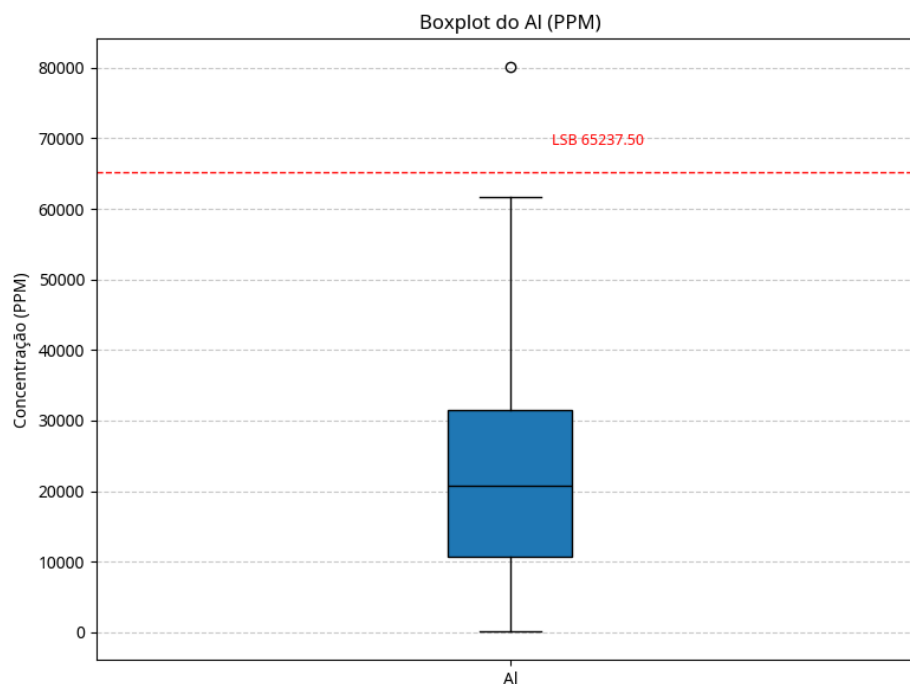
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Elementos maiores

4.1.1 Alumínio

As concentrações de alumínio (Al) na sub-bacia do rio Maranhão, normalizadas pelo teor de ferro (Fe), apresentaram variabilidade significativa, com valores entre 85,00 ppm (mínimo) e 80.100,00 ppm (máximo). A média foi de 23.149,80 ppm, com mediana de 20.850,00 ppm, indicando uma distribuição assimétrica positiva devido à presença de valores elevados. O desvio padrão de 15.995,60 ppm confirma a ampla dispersão dos dados. A partir dos quartis (Q1 = 10.425,00 ppm; Q3 = 32.350,00 ppm), calculou-se o alto valor de referência de 65237,50, os valores superiores a este foram identificados como anomalias, estes valores podem ser visualizados na figura 4.1, a caixa azul é o intervalo entre quartis, o traço ao meio do box é a média e em vermelho o alto valor de referência.

Figure 4.1 - Gráfico boxplot do alumínio, com o limite superior delimitado em vermelho.

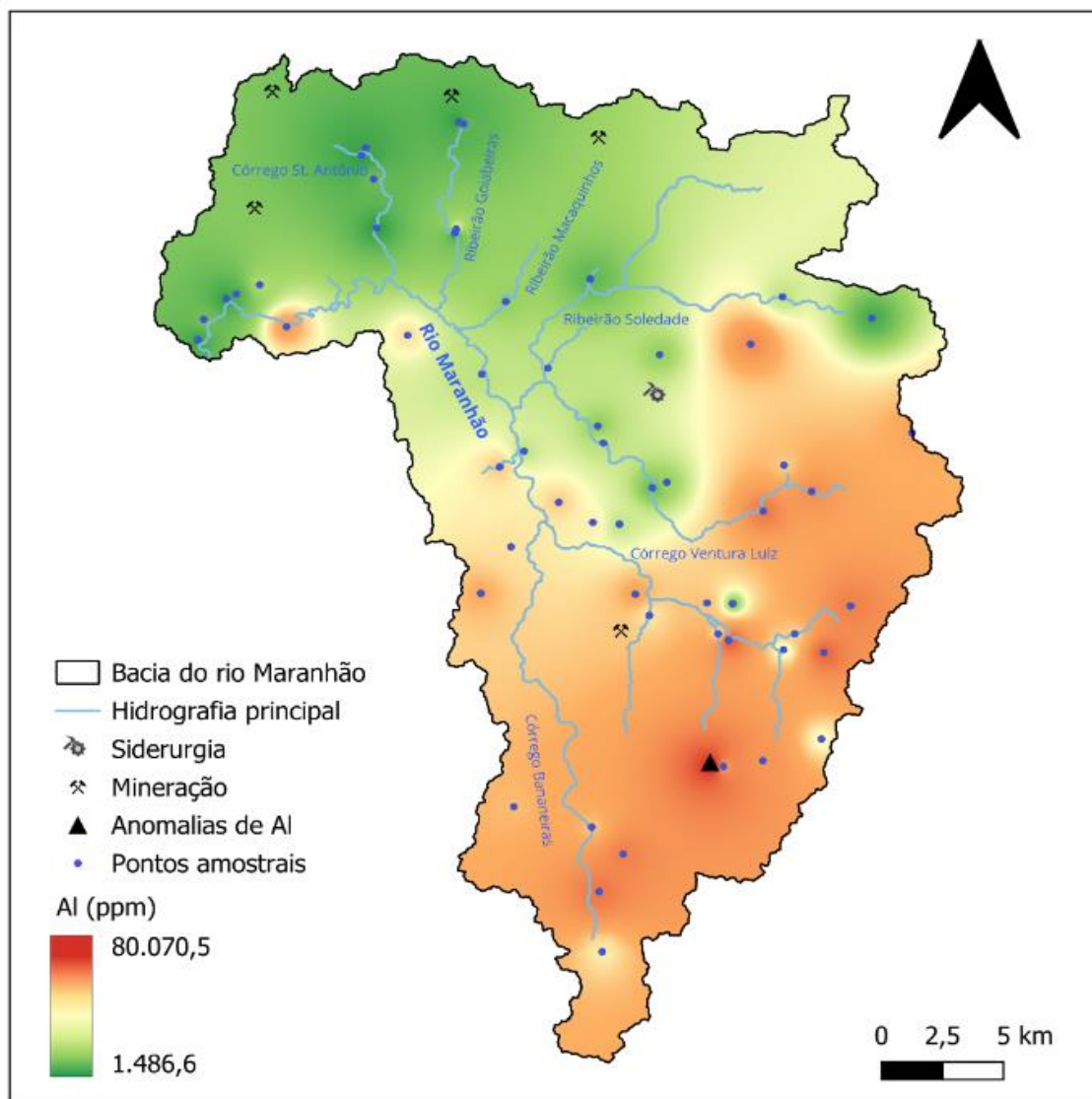


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os maiores teores de alumínio (Al) foram registrados nas porções centro-leste, sudoeste e sul da sub-bacia (Figura 4.2), em áreas dominadas pelas rochas da Suíte Alto Maranhão (granitóides e tonalitos) e do Complexo Santo Antônio do Pirapetinga (rochas máficas e ultramáficas). Essas unidades geológicas são compostas por minerais como feldspatos, feldspatóides, micas e anfibólios, que apresentam quantidades significativas de alumínio em sua estrutura. Sob condições de intemperismo químico intenso, comuns na região, esses minerais liberam Al para os solos e sedimentos superficiais (PARRA, 2006).

Vale ressaltar que, na sub-bacia do rio Maranhão, a distribuição do alumínio também acompanha a ocorrência de latossolos, desenvolvidos em ambientes tropicais úmidos sobre terrenos planos ou suavemente ondulados. Esses solos são altamente lixiviados e caracterizados por uma acumulação relativa de minerais de alumínio e ferro, o que contribui para a elevação natural dos teores de Al nos sedimentos finos transportados pelos cursos d'água. Além disso, por sua relativa estabilidade geoquímica e ampla distribuição, o alumínio é amplamente utilizado como elemento de normalização em estudos de contaminação, especialmente em índices como o Fator de Enriquecimento (FE), como utilizado neste trabalho.

Figure 4.2 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Alumínio (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



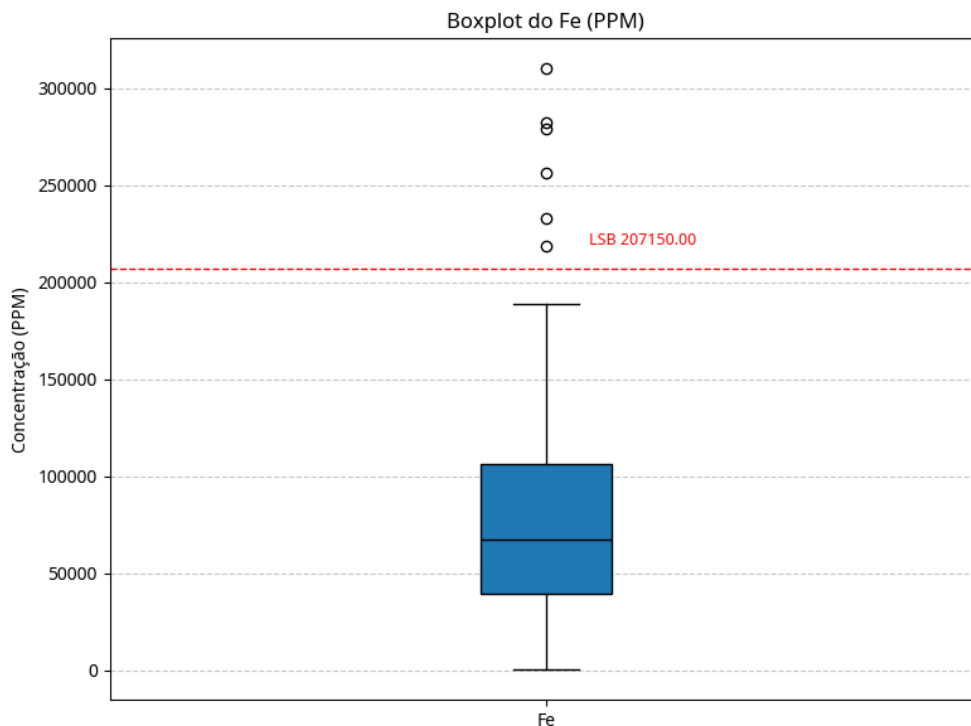
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Ferro

O ferro (Fe) nos sedimentos de corrente da sub-bacia do rio Maranhão apresentou ampla variabilidade, com concentrações variando entre 100,00 e 310.200,00 ppm, média de 86.584,70 ppm, mediana de 67.100,00 ppm e desvio padrão de 71.14 5,90 ppm. O primeiro quartil (Q1) foi de 39.275 ppm, e o terceiro quartil (Q3), de 106.425 ppm, com valores acima de 207.150,00 ppm considerados anomalias, como é possível observar na figura 4.3. As maiores concentrações foram observadas nas regiões norte e noroeste, como mostrado evidenciado na figura 4.4, em áreas onde afloram unidades do Supergrupo Minas, em especial os Itabiritos do Grupo Itabira

e Piracicaba, além de regiões próximas, com rochas ricas em minerais ferrosos, como anfíbolitos e filitos ferruginosos.

Figure 4.3 - Gráfico boxplot do ferro, com o limite superior delimitado em vermelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A origem desses altos teores de ferro está fortemente associada à litologia local, composta por formações ferríferas bandadas (BIFs) ricas em hematita, magnetita, goethita, greenalita, siderita, entre outros minerais. De acordo com Justo (2018), essas formações resultam da deposição de precipitados marinhos ferruginosos em ambientes anóxicos do Arqueano e paleoproterozóico, sendo marcadores importantes de eventos paleoambientais e comumente submetidas a processos de martitização, transformação metamórfica e enriquecimento supergênico. No contexto da sub-bacia do rio Maranhão, esses minerais ocorrem tanto em forma primária, quanto em formas secundárias, oriundas de processos de intemperismo e lateritização das BIFs.

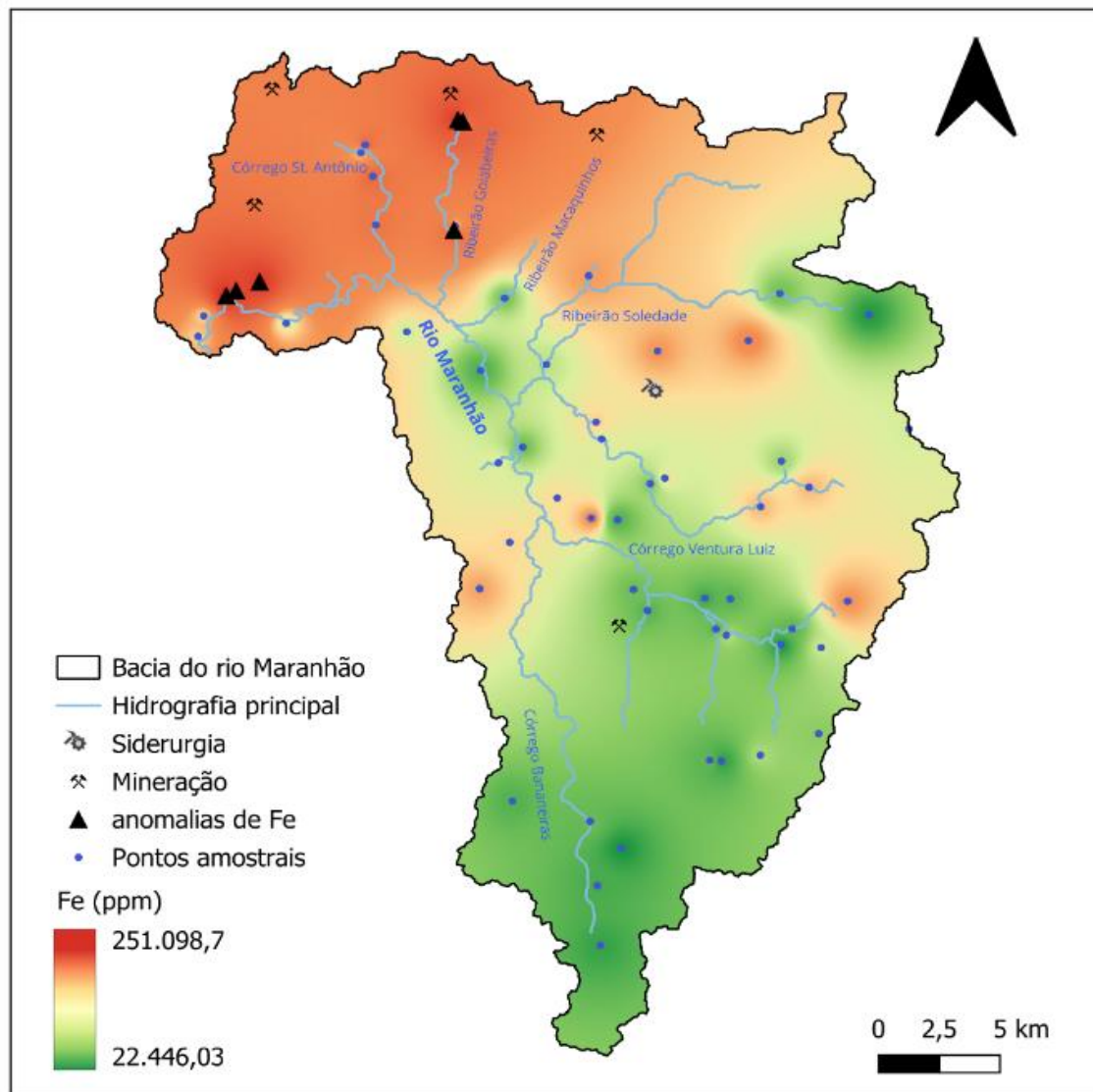
A distribuição espacial do Fe na bacia do rio Maranhão possivelmente possui forte controle litoestratigráfico, conforme observado também por Costa (2015). O Supergrupo Minas, especialmente nas formações ferríferas, representa um dos principais reservatórios naturais de ferro do Quadrilátero Ferrífero, frequentemente associado a processos mineralizantes de origem sedimentar-exalativa e metamórfica. Tais formações são também reconhecidas como importantes “filtros geoquímicos”, devido à elevada capacidade de

adsorção e coprecipitação de metais traço pelos óxidos e oxihidróxidos de ferro, como destacado por Costa *et al.* (2015).

O ferro (Fe), por ser um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, configura-se como o principal constituinte dos sedimentos analisados. Para além de sua abundância natural, o Fe desempenha um papel fundamental na geoquímica ambiental, atuando como modulador da mobilidade de elementos potencialmente tóxicos, como arsênio (As), chumbo (Pb), zinco (Zn) e cádmio (Cd). A presença de goethita e hematita de granulação fina contribui para a retenção desses metais na matriz sedimentar, controlando seu transporte no ambiente fluvial (Nascimento *et al.*, 2018). Além disso, em áreas com solos lateríticos desenvolvidos sobre anfibolitos e itabiritos, o Fe tende a permanecer em teores elevados mesmo sob intemperismo intenso, sendo um dos principais constituintes da fração residual dos sedimentos, tanto em partículas detríticas quanto em formações secundárias (PARRA, 2006).

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que as elevadas concentrações de ferro nos sedimentos da sub-bacia do rio Maranhão possuem origem predominantemente geogênica, embora não se descarte completamente a possibilidade de contribuição antrópica pontual, os padrões observados são consistentes com a geologia da região, sugerindo que os teores de ferro são, majoritariamente, resultado de processos naturais de intemperismo, erosão e aporte detrítico das rochas fonte.

Figure 4.4 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Ferro (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



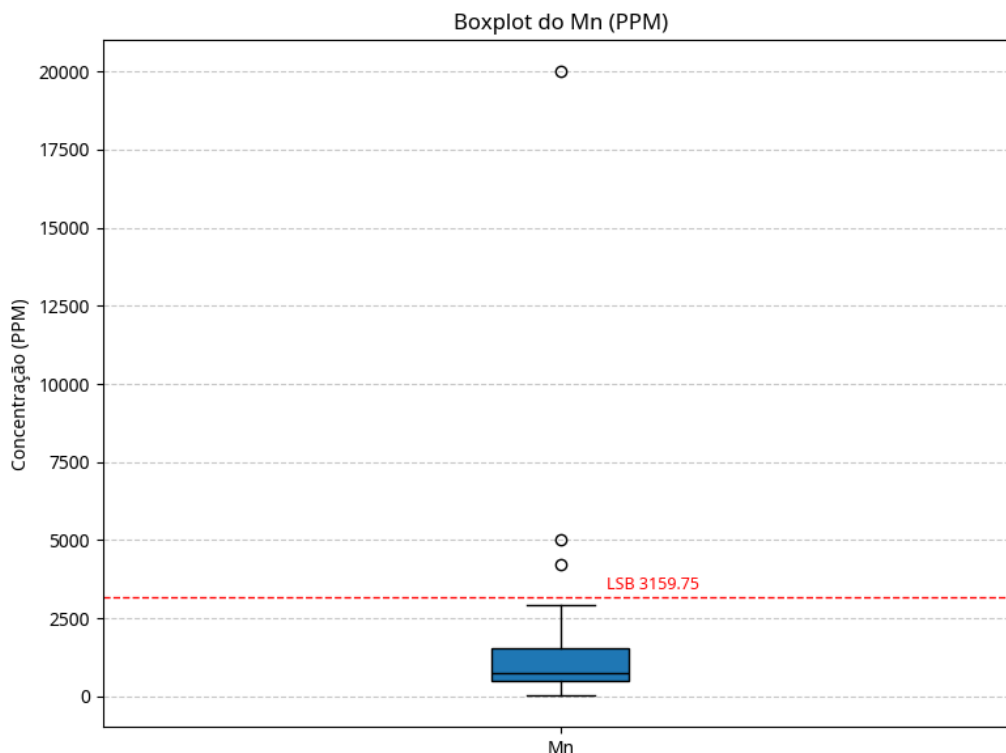
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Manganês

As concentrações de manganês (Mn) nos sedimentos de corrente da bacia do rio Maranhão apresentaram ampla variabilidade, com valores oscilando entre 21 e 20.000 ppm. A média foi de 1.367,02 ppm e o desvio padrão elevado (2.535,80 ppm) revela forte dispersão dos dados, influenciada por alguns pontos com teores excepcionalmente altos, estes outliers são mostrados no gráfico boxplot, presente na figura 4.5. A distribuição espacial, conforme evidenciado no mapa da figura 4.6, destaca concentrações elevadas na porção noroeste da bacia,

com destaque para áreas sob domínio do supergrupo Minas, da Suíte Alto Maranhão e na região central, próximas à jazida de Morro da Mina.

Figure 4.5 - Gráfico boxplot do manganês, com o limite superior delimitado em vermelho.



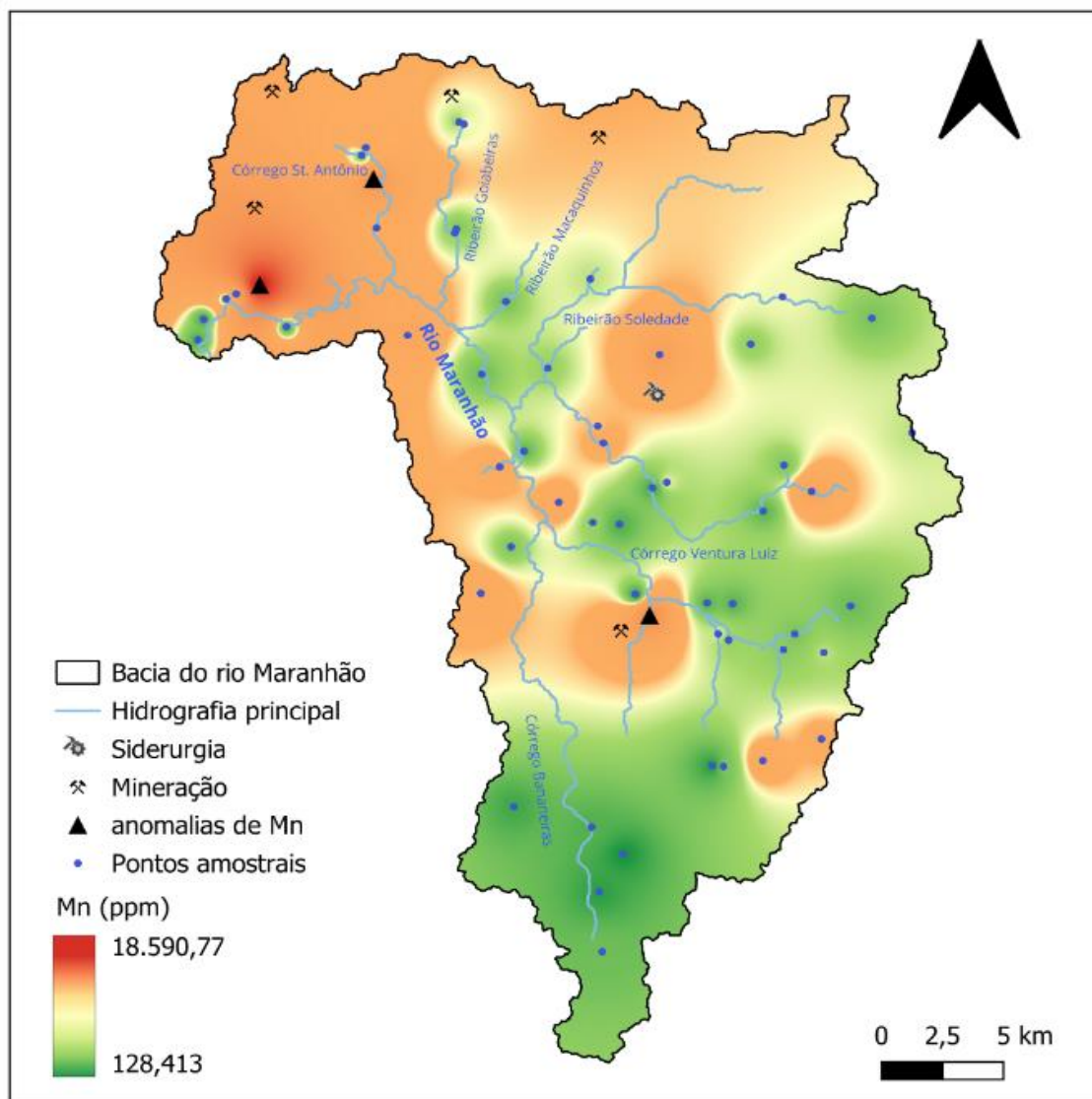
Fonte: Elaborado pelo autor.

O manganês geralmente está associado ao ferro, isso pode ser observado pela semelhança na distribuição das concentrações de Mn e Fe, onde as maiores concentrações ocorrem onde afloram as rochas do supergrupo Minas, especialmente em unidades como os filitos ferruginosos e itabiritos, apresenta condições mais favoráveis à presença de minerais manganésíferos, dado seu histórico de deposição em ambiente químico e influência de processos metamórficos regionais.

Na porção central da bacia, destaca-se a área da jazida de Morro da Mina, situada dentro dos limites da sub-bacia, onde ocorre o mais expressivo depósito de manganês do Quadrilátero Ferrífero. Segundo Candia & Girardi (1979), a mineralogia do protominério sílico-carbonático da Formação Lafaiete é dominada por rodocrosita (MnCO_3), espessartita (granada manganésífera) e tefroita (Mn_2SiO_4), em associação com grafita, pirofanita, apatita e sulfetos. Essas unidades sofreram metamorfismo de fácies anfibolito, com recristalização de minerais primários e desenvolvimento de fases retrógradadas, como Mn-cummingtonita e óxidos de Mn de origem supergênica.

O manganês apresenta alta reatividade em ambientes aquáticos, especialmente sob variações do potencial redox, o que favorece sua mobilização em zonas redutoras e sua posterior formação de óxidos e hidróxidos. Esses compostos atuam como superfícies adsorventes altamente eficientes, capazes de reter elementos-traço como Zn, Ni, Cu e Pb, o que reforça o papel do Mn como componente chave na geoquímica ambiental dos sedimentos (PARRA, 2006; PEIXOTO, 2022). Logo, os resultados obtidos apontam para um controle geoquímico dominado pela geologia local. O manganês, além de marcador da contribuição dessas unidades, atua também como agente secundário na retenção de metais potencialmente tóxicos, evidenciando sua importância tanto na caracterização natural dos sedimentos quanto na compreensão de seus processos de transporte e enriquecimento.

Figure 4.6 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Manganês (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

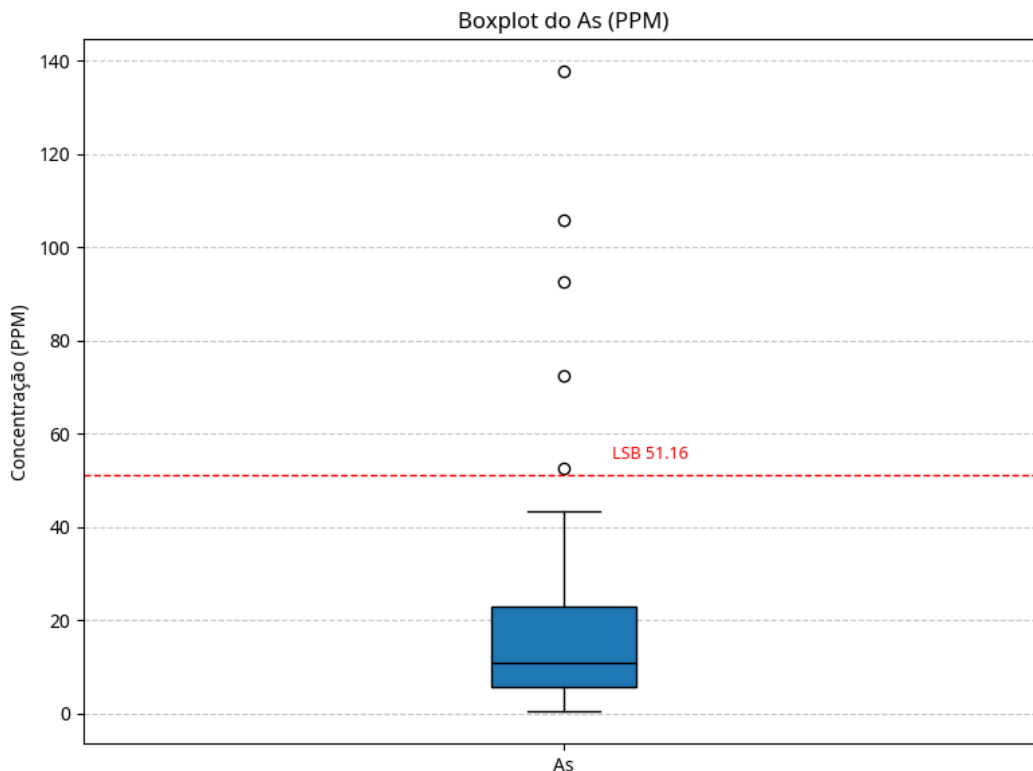
4.2 Elementos traço

4.2.1 Arsênio

Na bacia do rio Maranhão foram determinadas concentrações de arsênio que variaram entre 0,40 e 137,70 ppm, média de 19,22 ppm e o desvio padrão 24,94 ppm. Além disso, calculou-se os valores de Q1 (5,35 ppm) e Q3 (23,68 ppm), e a partir deles determinou-se o alto valor de referência, aproximadamente 51,16 ppm, valores superiores a esse foram considerados anomalias (figura 4.7), identificadas sobretudo nas porções noroeste, centro-norte e leste da

bacia, ao todo 5 amostras apresentaram valores anômalos, mas grande parte da bacia exibe enriquecimento em arsênio, como mostrado na figura 4.8.

Figure 4.7 - Gráfico boxplot do arsênio, com o limite superior delimitado em vermelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

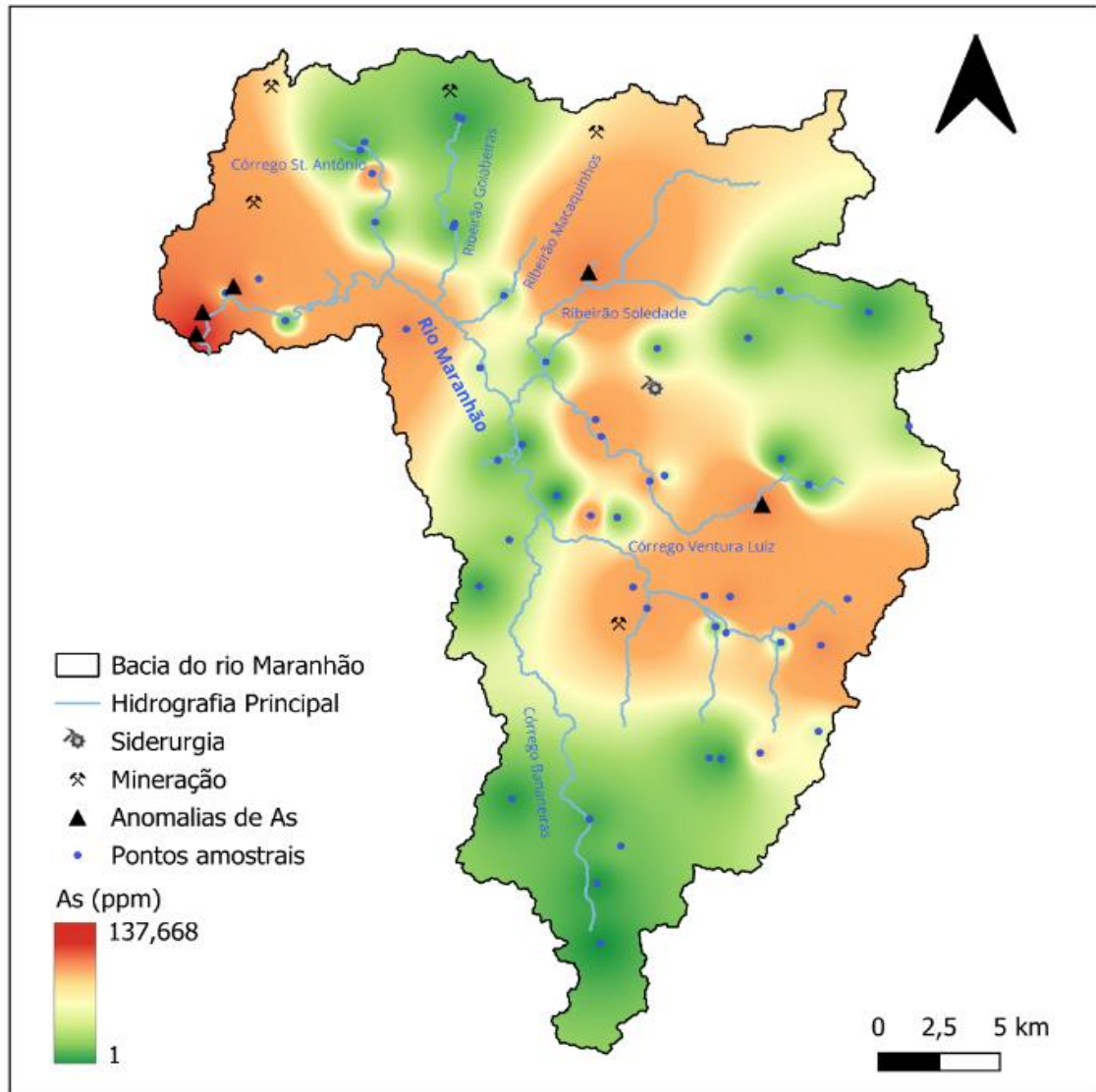
Na região noroeste, as anomalias ocorrem no contato da Suíte Alto Maranhão, composta por tonalitos e granodioritos e rochas metassedimentares do Grupo Sabará. Segundo Borba et al (2003), a liberação de Arsênio nessas áreas ocorre principalmente por processos de oxidação mineral em ambientes aeróbicos, sobretudo em sulfetos, como a arsenopirita e pirita, muito comuns em veios e minerais acessórios do embasamento, além disso, ocorre adsorção de As por óxidos de ferro e em argilo minerais, comuns na mineralogia das rochas do Grupo Sabará.

Nas áreas central, norte e leste da bacia, as anomalias estão associadas ao Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, onde predominam rochas metamórficas máficas e ultramáficas, nestes casos o Arsênio pode estar associado a minerais muito comuns nestas rochas, como anfibólio e clorita, também ocorre a mobilização de As por sulfetos e processos hidrotermais.

Embora a origem do arsênio na sub-bacia do rio Maranhão esteja fortemente associada a fontes geogênicas, a influência antrópica não pode ser desconsiderada. De acordo com Borba et al. (2003), municípios com histórico de mineração aurífera, como Congonhas, contribuíram significativamente para a intensificação da liberação e dispersão de arsênio no ambiente, sobretudo em decorrência do descarte inadequado de rejeitos contendo minerais sulfetados. Os

resultados apresentados são consistentes com outros estudos conduzidos no QF. Na bacia do rio Piranga, Peixoto (2022) observou uma concentração média de 9,98 ppm, com os maiores valores associados a Suíte Alto Maranhão e ao Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, resultados coerentes com o do presente trabalho, apesar dos valores médios da bacia do rio Maranhão e as anomalias apresentaram-se elevados, sobretudo próximos às áreas de intensa atividade minerária, como apresentado por Leão (2019), onde as anomalias com valores próximos a 90 ppm estão relacionados a mineração. Dessa forma, a presença de anomalias geoquímicas na região de estudo reflete um cenário influenciado tanto por processos naturais de intemperismo de rochas portadoras de arsênio quanto por atividades humanas historicamente desenvolvidas na região.

Figure 4.8 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Arsênio (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.

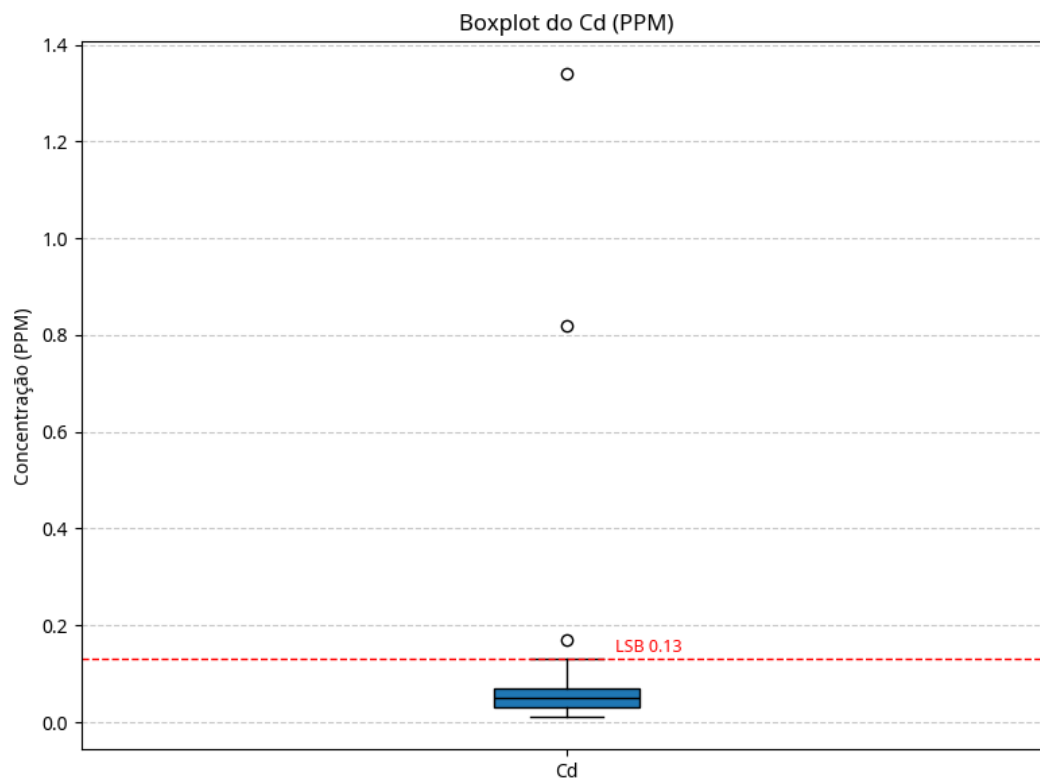


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Cádmi

As concentrações de cádmio (Cd) nos sedimentos de corrente da sub-bacia do rio Maranhão apresentaram valores variando entre 0,01 e 1,34 ppm, com média de 0,08 ppm e desvio padrão de 0,19 ppm. A mediana foi de 0,05 ppm, com primeiro e terceiro quartis em 0,03 ppm e 0,07 ppm, respectivamente, como é observado na figura 4.9. A análise estatística revelou uma distribuição assimétrica positiva, com poucos valores altos elevando a média. Considerando o limite de anomalia definido, o valor de referência foi calculado como 0,13 ppm, sendo identificadas quatro amostras com valores acima desse limiar. As amostras com valores anômalos concentram-se nas regiões noroeste, centro-norte, central e oeste (Figura 4.10).

Figure 4.9 - Gráfico boxplot do cádmio, com o limite superior delimitado em vermelho.



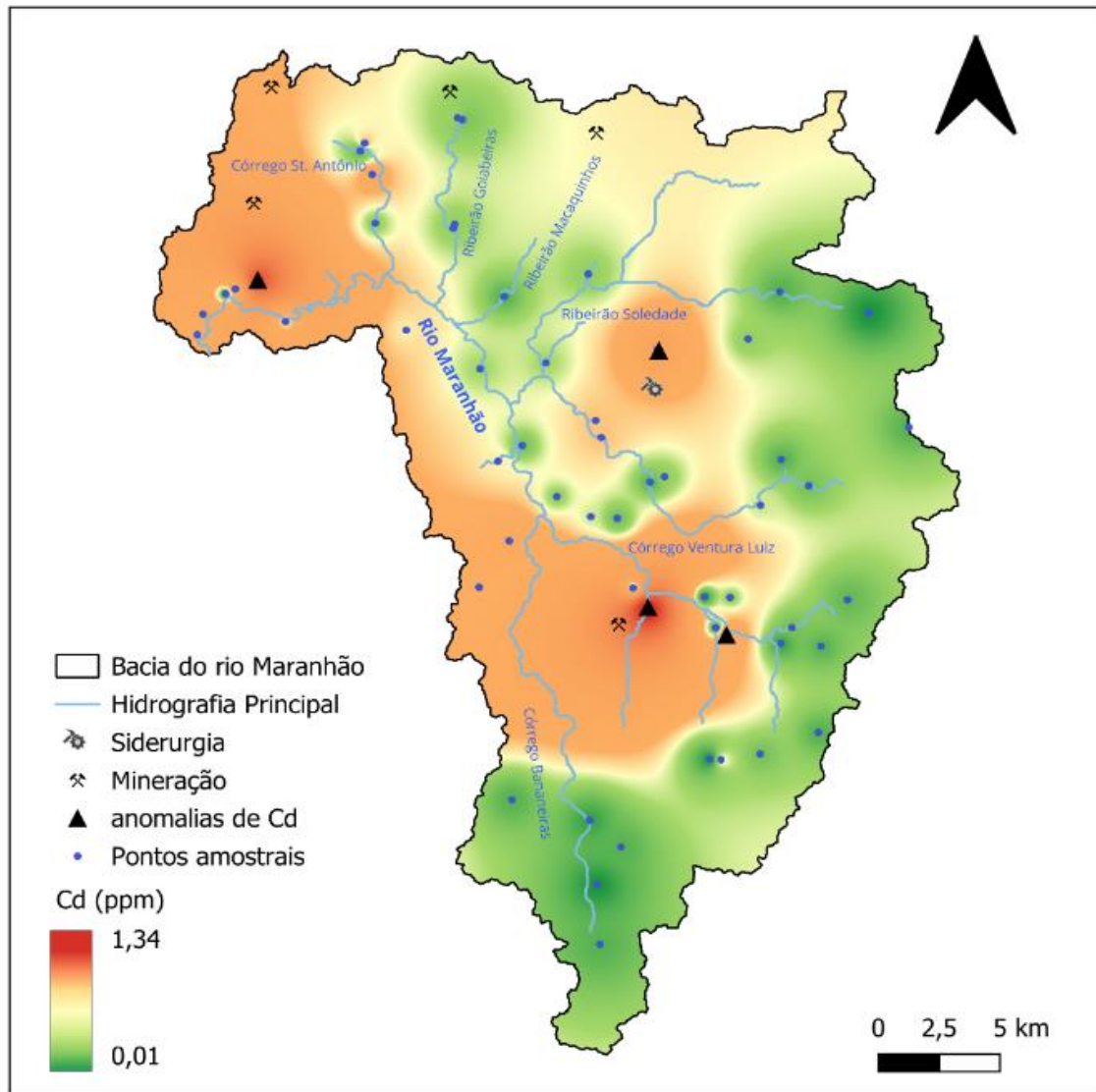
Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Parra (2006), o cádmio, assim como o arsênio, é classificado como um elemento calcófilo, apresentando elevada afinidade com o enxofre e, conseqüentemente, forte associação com minerais sulfetados. Essa característica geoquímica explica sua ocorrência em ambientes mineralizados, especialmente em veios ricos em sulfetos metálicos, frequentemente presentes em rochas de origem ígnea. Na área de estudo, tais condições estão representadas pelas rochas da Suíte Alto Maranhão e do Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, onde ocorrem litotipos como tonalitos, dioritos e rochas máficas e ultramáficas metamorfizadas, propícios à concentração de elementos traço em fases sulfuradas. O comportamento geoquímico do cádmio na bacia do rio Maranhão também assemelha ao observado por Peixoto (2022) na bacia do rio Piranga, onde o background de 0,07 ppm, onde as anomalias também estão associadas ao Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, os valores apresentados no presente trabalho estão ligeiramente mais elevados, possivelmente devido as unidades associadas ao Cd, serem predominantes na bacia do rio Maranhão.

A semelhança comportamental entre o cádmio e o arsênio também se reflete na distribuição espacial das suas concentrações anômalas, que ocorrem preferencialmente sobre as mesmas unidades litológicas: Suíte Alto Maranhão, Grupo Sabará e Complexo Santo Antônio

do Pirapetinga. Tais padrões reforçam o papel da geologia local como principal condicionante da mobilização e acumulação desses elementos nos sedimentos fluviais da sub-bacia.

Figure 4.10 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Cádmio (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



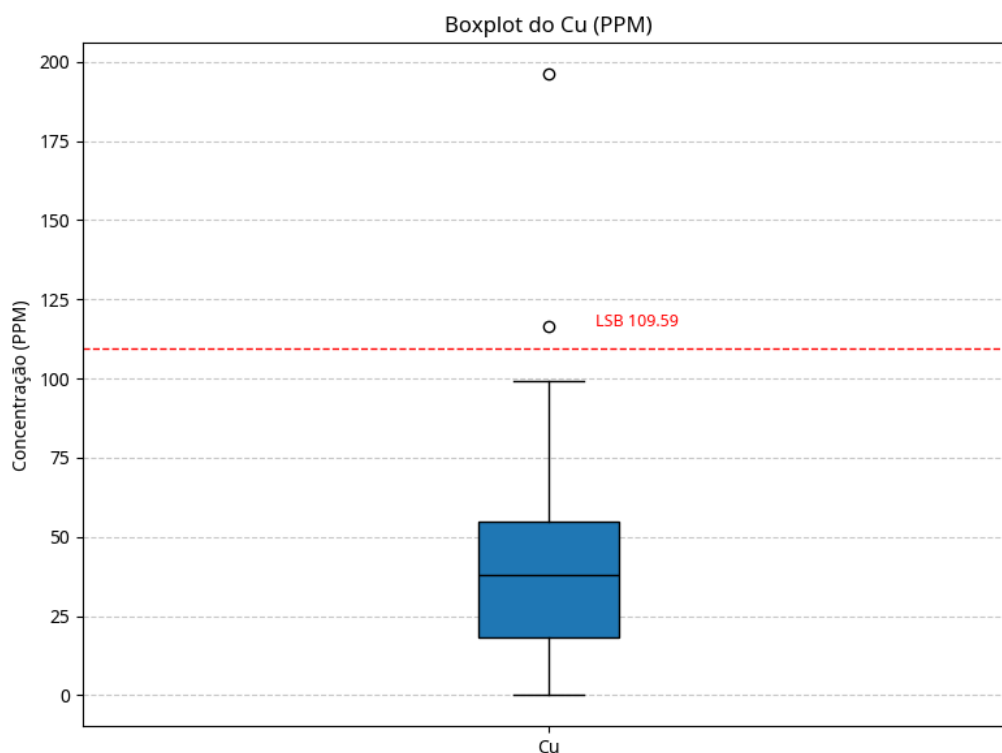
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Cobre

O cobre é raramente encontrado como elemento nativo, como arsênio e cádmio, discutidos anteriormente, o cobre é um elemento calcófilo, sendo encontrados frequentemente em veios sulfetados (PARRA, 2006). As concentrações de Cobre nos sedimentos de corrente da sub-bacia do rio Maranhão variam entre 0,01 e 196,13 ppm, com média de 40,39 ppm e

mediana de 37,94 ppm, estes valores se mostram relativamente elevados em relação ao trabalho de Vicq *et al.* (2023) no alto rio das Velhas, que identificou uma média de 22,7 ppm de cobre. O valor de referência superior foi definido em 109,59 ppm, acima do qual foram identificadas 2 amostras anômalas (Figura 4.11). Essas anomalias estão espacialmente associadas a três zonas principais: noroeste, central e oeste da sub-bacia, como pode ser observado na figura 4.12.

Figure 4.11 - Gráfico boxplot do cobre, com o limite superior delimitado em vermelho.

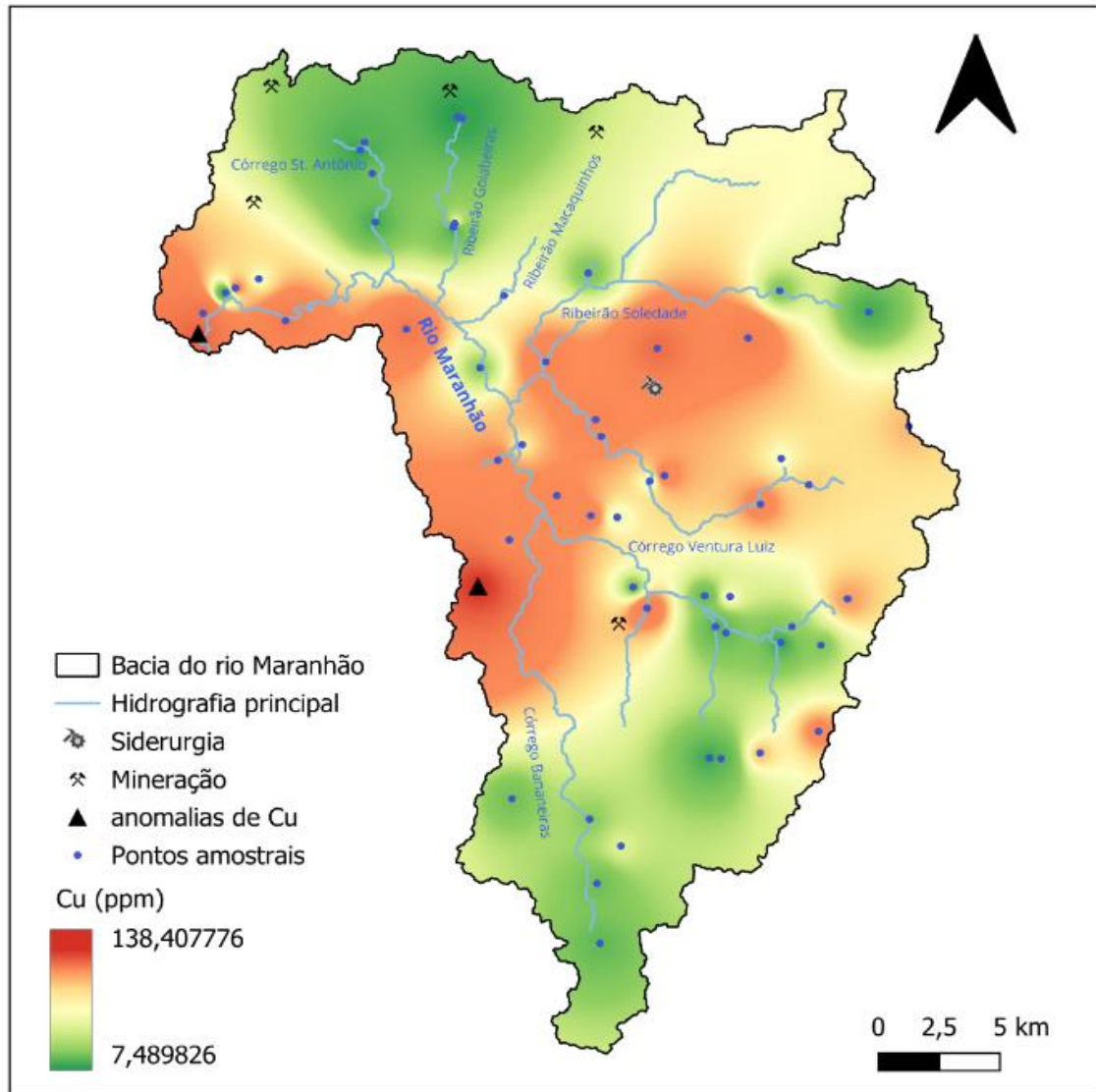


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na região noroeste, as anomalias estão associadas ao contato entre a Suíte Alto Maranhão (tonalitos/granodioritos) e os metassedimentos do Grupo Sabará. Já na porção mais a oeste, as anomalias também estão associadas a Suíte Alto Maranhão. Estudos como os de Parra (2006) e Peixoto (2022), demonstram que mineralizações primárias de Cu (calcopirita - CuFeS_2 , bornita - Cu_5FeS_4) são comuns em veios hidrotermais associados. A alteração hidrotermal promove a liberação de Cu, que é subsequentemente adsorvido por argilominerais e óxidos de Fe-Mn.

As anomalias identificadas na porção central da bacia estão relacionadas ao Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, caracterizado por rochas meta-máficas e meta-ultramáficas. Essas anomalias podem estar associadas à presença de biotita, mineral comum nessa unidade, conforme descrito por Parra (2006).

Figure 4.12 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Cobre (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão

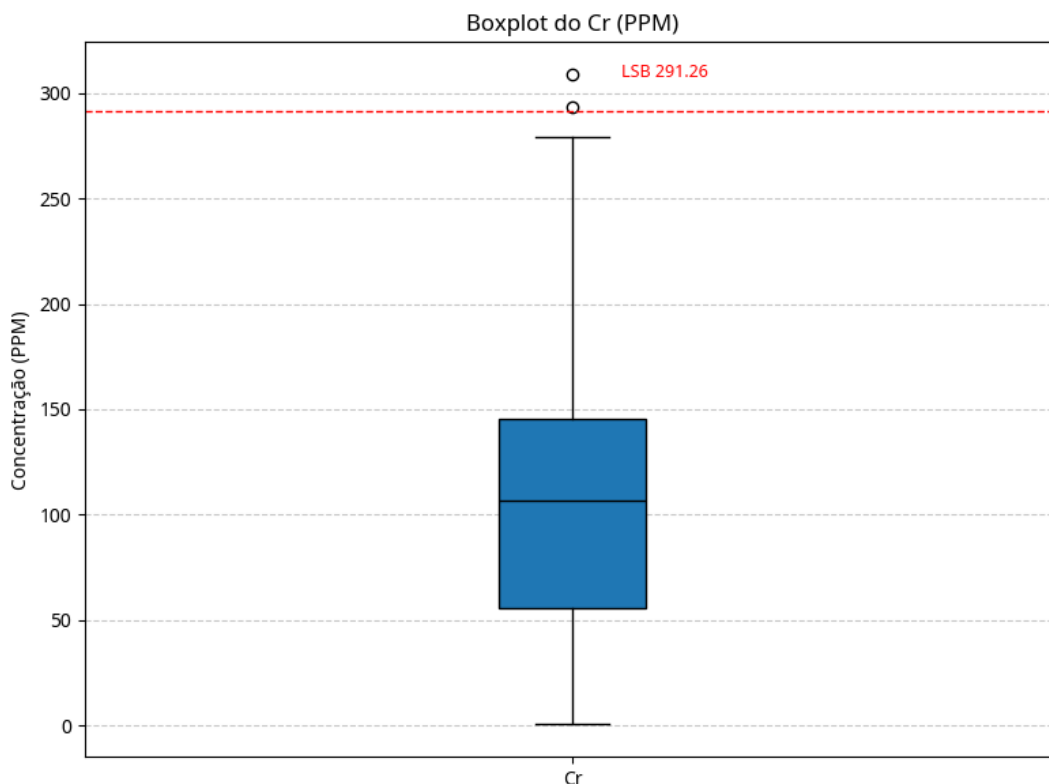


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Cromo

As concentrações de cromo (Cr) nos sedimentos de corrente variaram de 0,5 a 308,7 ppm, com média de 112,59 ppm e desvio padrão de 76,23 pp, refletindo ampla dispersão dos dados. O alto valor de referência calculado, foi estimado em 291,26 ppm, acima do qual se caracterizam 2 anomalias geoquímicas, observadas na figura 4.13.

Figure 4.13 - Gráfico boxplot do cromo, com o limite superior delimitado em vermelho.



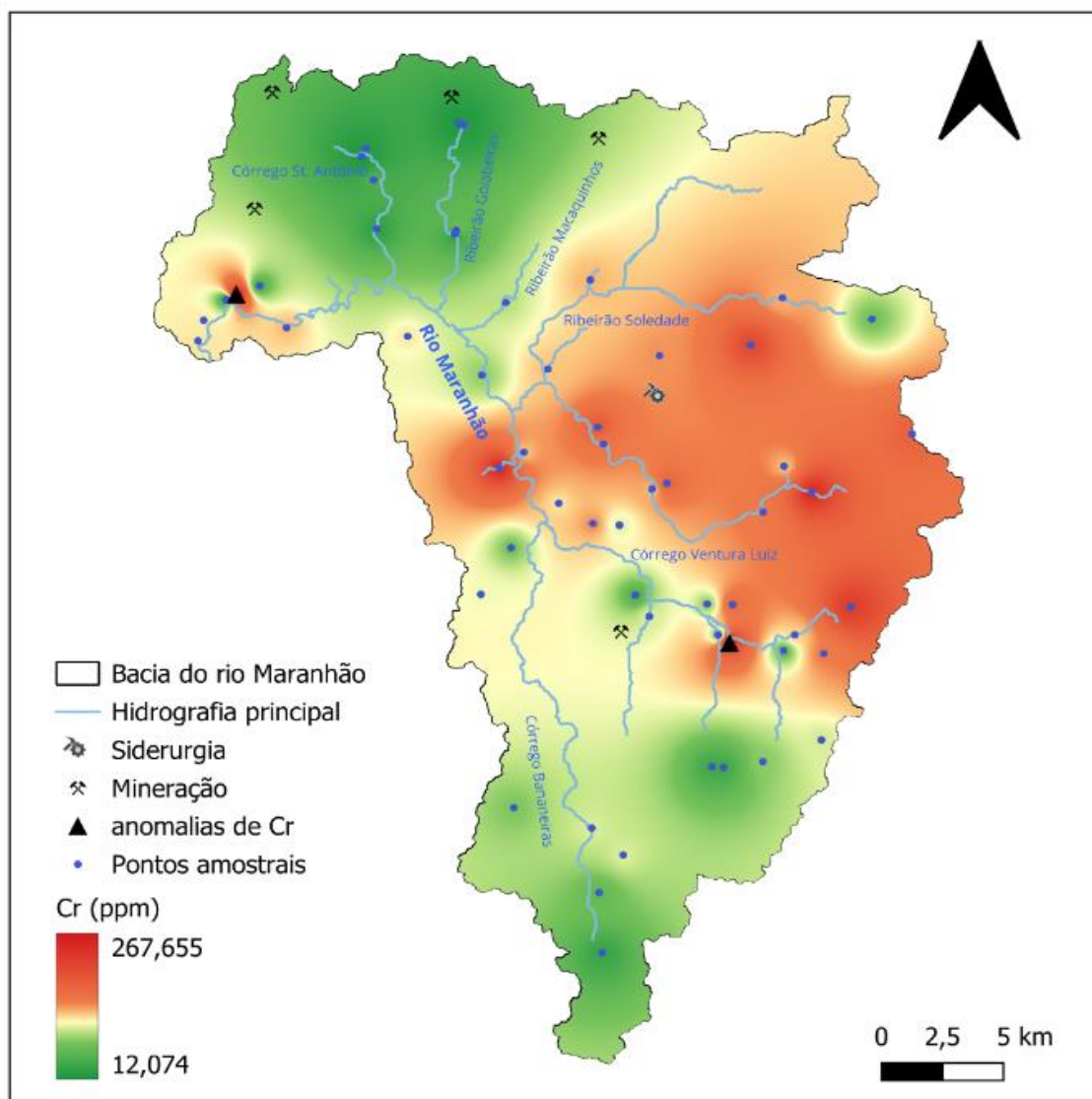
Fonte: Elaborado pelo autor.

As maiores concentrações foram identificadas nas porções central (Complexo Santo Antônio do Pirapetinga) e noroeste (Suíte alto Maranhão), como é observado na figura 4.14. O cromo é comumente associado a rochas ultramáficas e máficas, encontradas no Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, e pode ocorrer na forma de cromita (FeCr_2O_4) ou como substituinte em minerais ferromagnesianos, como a clorita e biotita, devido à substituição isomórfica do Cr^{3+} pelo Fe^{3+} , dada a similaridade de seus raios iônicos Parra (2006).

Ainda de acordo com Parra (2006), em ambientes tropicais intensamente intemperizados, o cromo também pode se concentrar em solos lateríticos desenvolvidos sobre essas litologias ultramáficas, contribuindo para o enriquecimento natural do elemento nos sedimentos fluviais. Estudos conduzidos por Vicq et al. (2023) apresentaram valores de cromo (Cr) semelhantes aos observados na sub-bacia do rio Maranhão, registrando um terceiro quartil (Q3) de 151,3 ppm, enquanto no presente trabalho foi obtido Q3 de 147,8 ppm. Os autores atribuíram as maiores concentrações de Cr a fatores geológicos, sobretudo às rochas do Grupo Nova Lima, ricas em minerais máficos e sulfetados. Embora essa unidade não aflore na área de

estudo, a semelhança entre os valores reforça a hipótese de que as concentrações de Cr no Quadrilátero Ferrífero são predominantemente controladas por processos geogênicos.

Figure 4.14 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Cromo (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



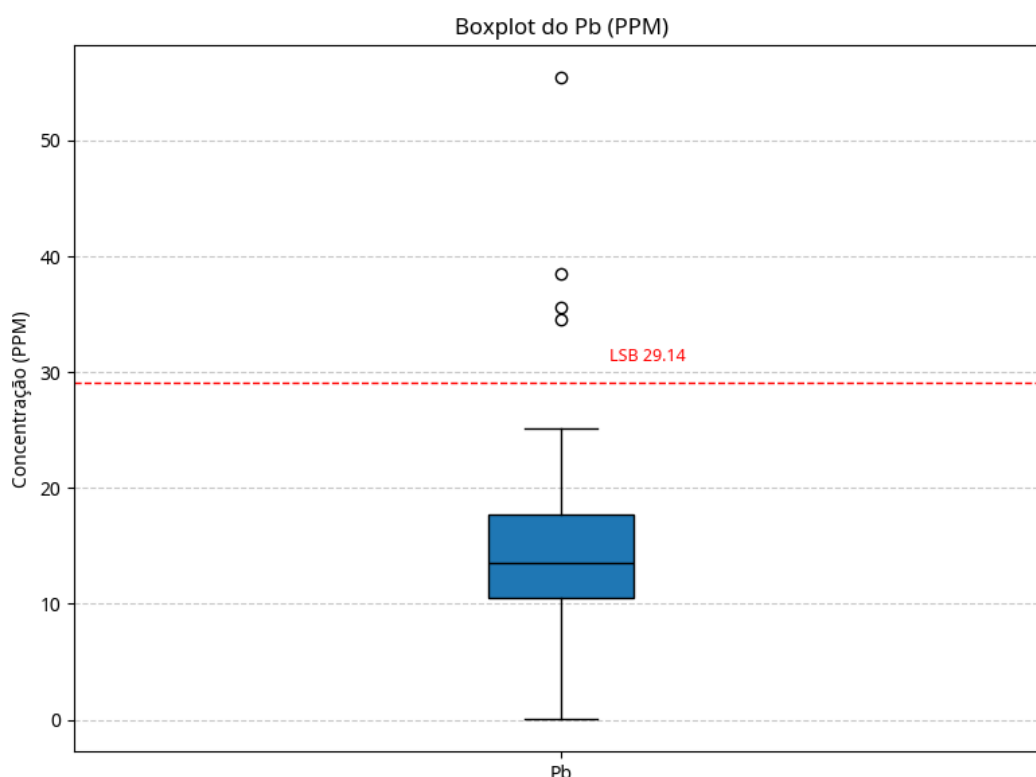
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Chumbo

As concentrações de chumbo (Pb) nos sedimentos de corrente da sub-bacia do rio Maranhão apresentaram ampla variação, com valores entre 0,01 e 55,42 ppm. A média foi de 15,13 ppm, com desvio padrão de 8,99 ppm, refletindo uma distribuição moderadamente assimétrica, com valores máximos significativamente superior à mediana (13,54 ppm). Os quartis inferior ($Q1 = 10,39$ ppm) e superior ($Q3 = 17,89$ ppm) permitiram o cálculo do alto

valor de referência em 29,14 ppm ($Q3 + 1,5 \times IQR$), acima do qual foram identificadas 4 amostras anômalas (Figura 4.15). Essas amostras, embora distribuídas de forma dispersa, concentram-se nas porções centro-norte e centro-oeste da bacia, como pode ser observado na figura 4.16.

Figure 4.15 - Gráfico boxplot do chumbo, com o limite superior delimitado em vermelho.



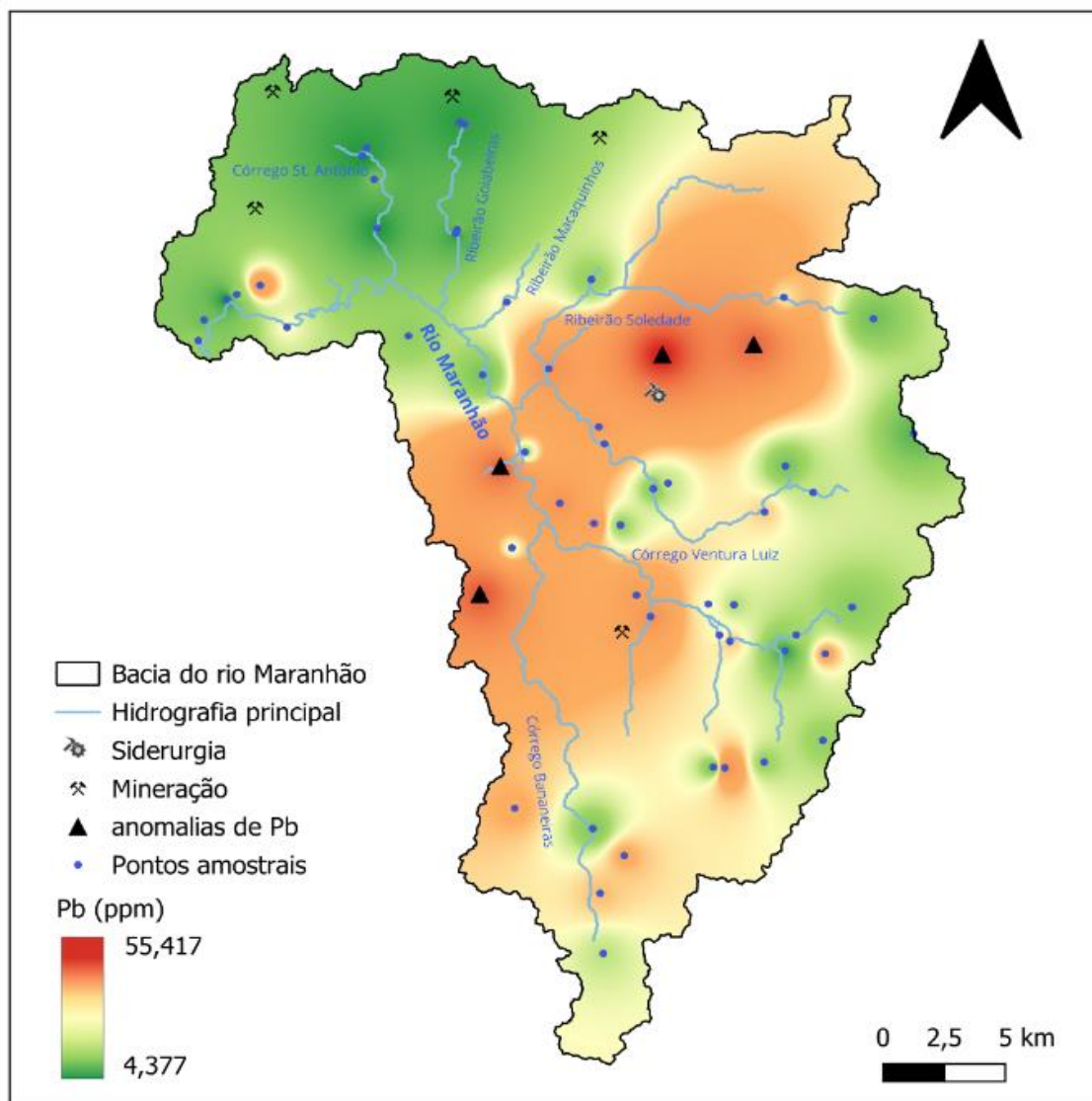
Fonte: Elaborado pelo autor.

A ocorrência de anomalias na porção centro-norte está associada ao Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, onde predominam rochas máficas e ultramáfica de médio a alto grau metamórfico. Tais litologias são conhecidas por conterem sulfetos disseminados, incluindo galena (PbS), o principal mineral portador de chumbo, especialmente em contextos associados a zonas de cisalhamento e circulação de fluidos hidrotermais (PARRA, 2006). Além disso, o chumbo (Pb) pode ser retido nos sedimentos por adsorção em óxidos de ferro e manganês, bem como em partículas de granulometria fina, o que favorece sua imobilização e acúmulo nos sistemas fluviais (VICQ et al., 2023). Os autores observaram que as maiores anomalias de Pb ocorrem nas proximidades de áreas urbanas e mineradas, indicando possíveis contribuições antrópicas localizadas. Situação semelhante é verificada na bacia do rio Maranhão, onde a maior concentração de chumbo foi registrada nas proximidades do complexo da Gerdau.

Considerando a baixa mobilidade do Pb em ambientes sedimentares, é plausível associar essas anomalias a fontes antrópicas pontuais, potencialmente relacionadas às atividades industriais e de mineração da região.

Na porção centro-oeste da bacia, a Suíte Alto Maranhão, composta por granitoides e tonalitos, também contribui para os valores elevados de Pb. Embora não seja comum estas rochas terem concentrações elevadas de chumbo, essas unidades podem conter minerais acessórios com Pb, especialmente em áreas com alteração hidrotermal ou diques máficos. A liberação natural de Pb por processos de intemperismo químico dessas rochas e sua posterior retenção em argilominerais transportados pelos cursos d'água configuram mecanismos relevantes para o enriquecimento geoquímico nos sedimentos.

Figure 4.16 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Chumbo (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.

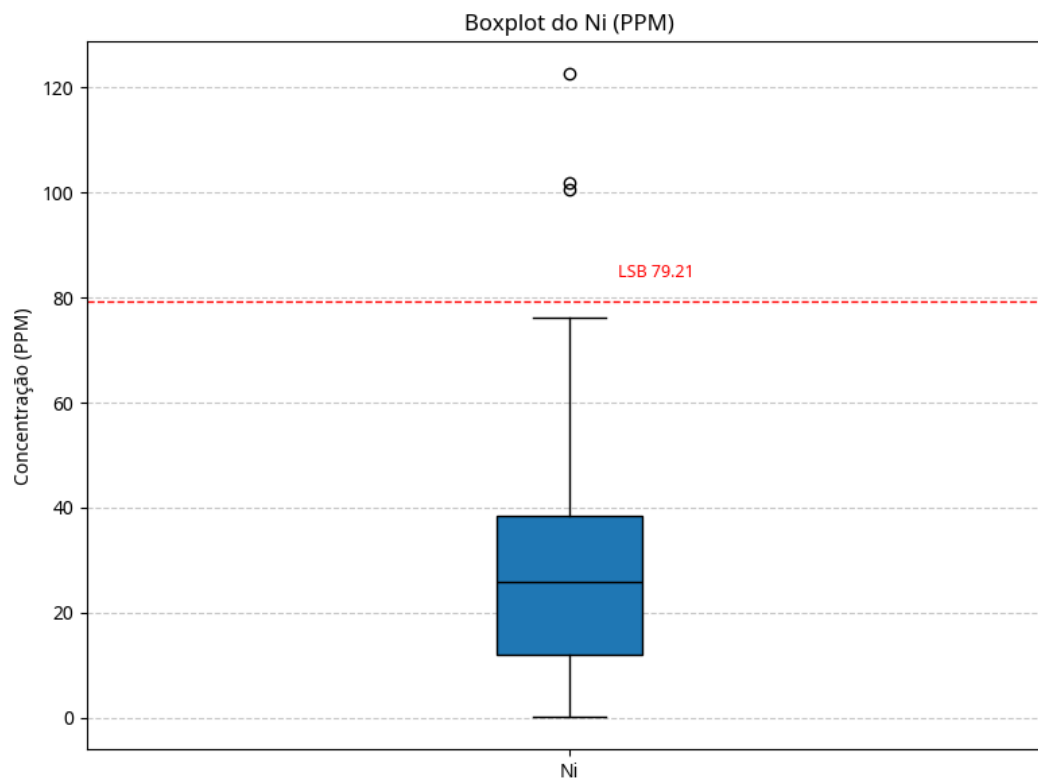


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6 Níquel

As concentrações de níquel (Ni) nos sedimentos de corrente da sub-bacia do rio Maranhão revelaram ampla variação, com valores entre 0,09 e 122,60 ppm. A média foi de 30,33 ppm, com desvio padrão de 24,83 ppm, indicando uma distribuição levemente assimétrica e a presença de valores expressivamente altos em alguns pontos. A mediana (25,95 ppm), associada aos quartis Q1 (11,40 ppm) e Q3 (38,53 ppm), permitiu o cálculo do alto valor de referência ($Q3 + 1,5 \times IQR$) em 79,21 ppm, acima do qual 3 amostras foram classificadas como anomalias, como observado na figura 4.17.

Figure 4.17 - Gráfico boxplot do Níquel, com o limite superior delimitado em vermelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

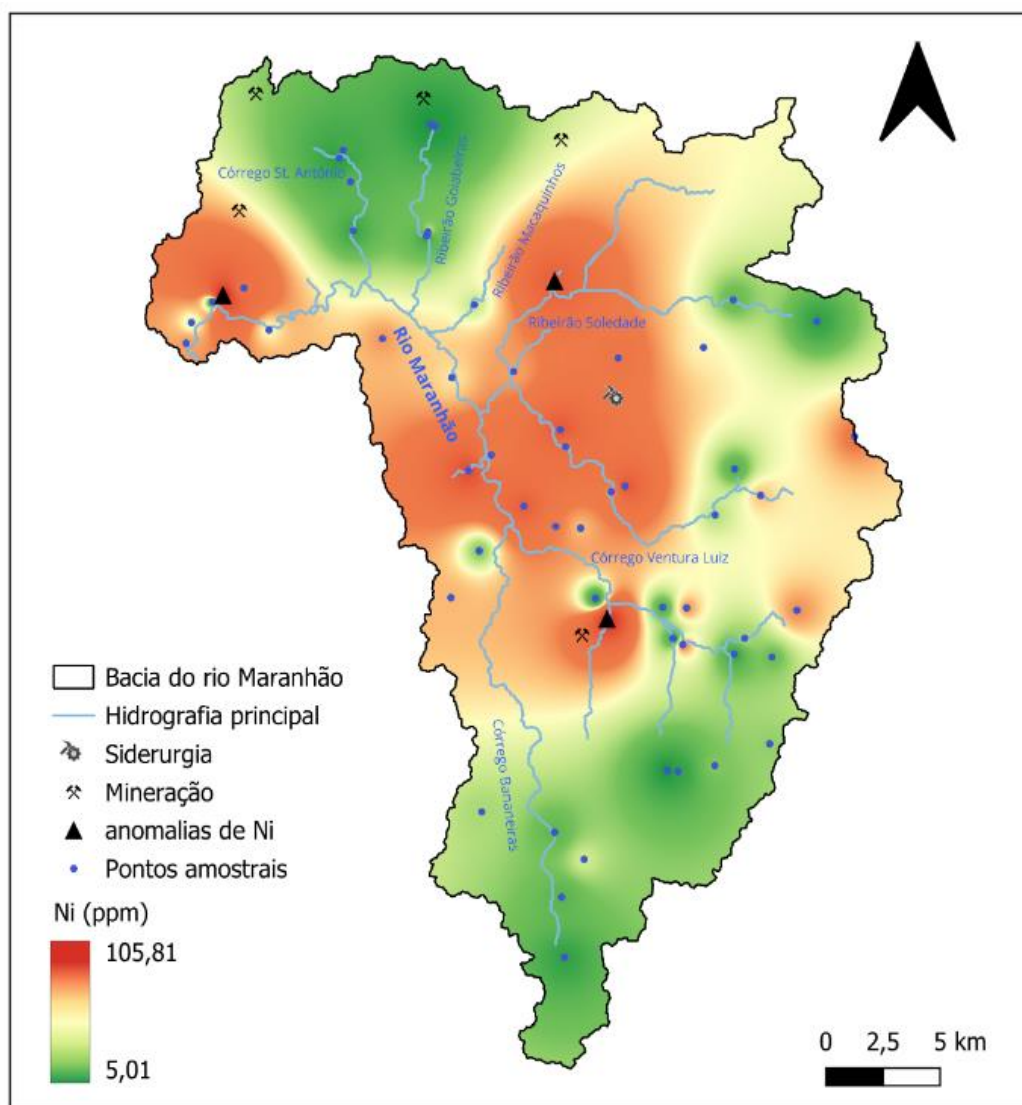
Na porção noroeste, a anomalia coincide com o contato entre a Suíte Alto Maranhão e o Grupo Sabará. A Suíte Alto Maranhão é composta por granitoides e tonalitos, que podem conter minerais máficos ricos em Ni, associados a diques máficos. Já o Grupo Sabará é composto por metassedimentos piroclásticos e tufo máficos, que, ao sofrerem intemperismo, podem liberar níquel para os sistemas de drenagem.

Na porção central, as maiores concentrações de níquel (Ni) ocorrem no domínio do Complexo Santo Antônio do Pirapetinga. Essas litologias são naturalmente ricas em minerais máficos e ultramáficos, compostos por silicatos ferromagnesianos, como olivina, piroxênio e anfibólio, nos quais o Ni substitui o magnésio (Mg) em suas estruturas cristalinas. Durante os processos de alteração hidrotermal e metamorfismo regional, esses minerais sofrem transformações químicas e texturais que promovem a liberação de níquel para o meio, favorecendo sua incorporação aos sedimentos e, conseqüentemente, a formação de anomalias geoquímicas na região (PARRA, 2006).

Ainda segundo Parra (2006), os solos lateríticos desenvolvidos sobre essas rochas atuam como reservatórios secundários de Ni, sendo uma importante fonte para os sedimentos, mesmo em áreas de baixa atividade antrópica. Apesar de o níquel ser utilizado em processos industriais,

como galvanoplastia e produção de ligas metálicas, a distribuição espacial, observada na figura 4.18, sugere predomínio do controle litoestratigráfico. Ainda assim, como reforçado por Costa *et al.* (2015), deve-se considerar a possibilidade de fontes antrópicas difusas, especialmente em áreas urbanas e industriais de Ouro Branco, Congonhas e Conselheiro Lafaiete, onde há intenso histórico minerário e descarte de resíduos metálicos.

Figure 4.18 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Níquel (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



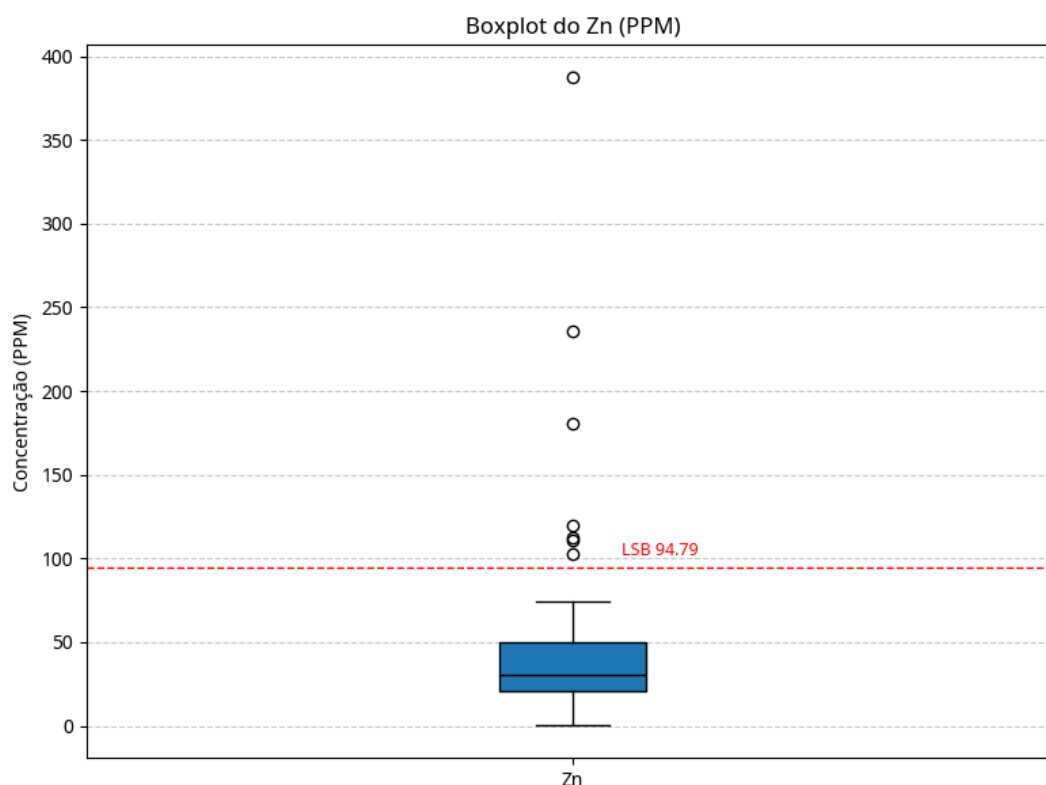
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.7 Zinco

As concentrações de zinco (Zn) nos sedimentos de corrente da sub-bacia do rio Maranhão variaram entre 0,09 e 387,40 ppm, com média de 46,91 ppm e desvio padrão de

58,76 ppm, refletindo uma distribuição assimétrica com presença de valores máximos expressivamente elevados. A mediana foi de 30,30 ppm, com o primeiro quartil (Q1) em 20,60 ppm e o terceiro quartil (Q3) em 50,28 ppm. O valor de referência superior, calculado por $Q3 + 1,5 \times IQR$, foi estimado em 79,21 ppm, a partir do qual 6 amostras foram classificadas como anômalas, como evidenciado na figura 4.19.

Figure 4.19 - Gráfico boxplot do zinco, com o limite superior delimitado em vermelho.



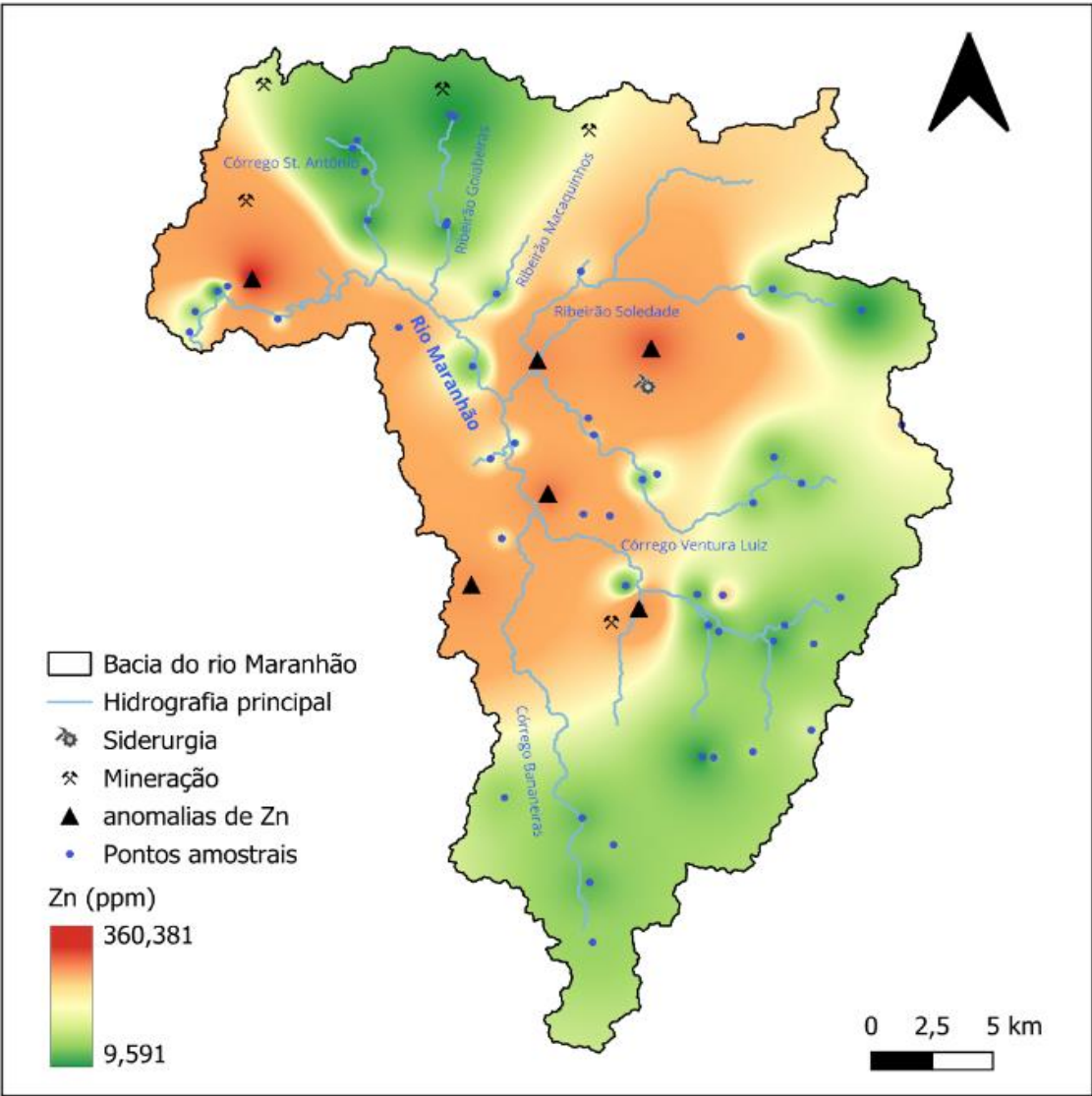
Fonte: Elaborado pelo autor.

As maiores concentrações ocorrem nos setores centro-norte, centro-leste e noroeste da bacia, como mostrado na figura 4.20. A anomalia da região centro-norte está associada ao Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, dominado por rochas máficas e ultramáficas metamorfizadas, que são naturalmente ricas em metais como Ni, Cr e Zn. O zinco pode ocorrer nesses contextos como esfalerita (ZnS) ou incorporado à estrutura cristalina de minerais ferromagnesianos, sendo liberado por processos de alteração hidrotermal e intemperismo químico (PARRA, 2006). O autor também identificou concentrações de zinco (Zn) superiores à média da crosta em sedimentos provenientes de áreas com intensa alteração química e com abundância de minerais portadores de ferro e manganês, como goethita e hematita, que atuam como superfícies adsorventes para esse elemento. Situação semelhante é observada na área de

estudo, especialmente na foz da bacia, onde se localizam as principais minas de ferro e onde uma das amostras apresentou a maior concentração de Zn (387,4 ppm), representando um aumento de aproximadamente 726% em relação à média regional (46,9 ppm). Esse enriquecimento expressivo reforça a influência dos óxidos de Fe e Mn na retenção do Zn nos sedimentos e possivelmente o efeito de processos antrópicos localizados associados à mineração.

Na porção centro-leste e noroeste da bacia, as anomalias ocorrem sobre terrenos da Suíte Alto Maranhão, que podem estar associados a diques máficos e alteração hidrotermal. Em síntese, os resultados indicam que o zinco na sub-bacia do rio Maranhão apresenta ligação com a litoestratigrafia das unidades aflorantes na região, sendo mobilizado a partir de rochas máficas e retido nos sedimentos por processos de adsorção, mas que também pode ser influenciado por aportes difusos relacionados às atividades humanas na região, sobretudo, extração de minério de ferro, já que que aumentam o aporte sedimentar.

Figure 4.20 - Mapa de interpolação IDW da distribuição de Zinco (ppm) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

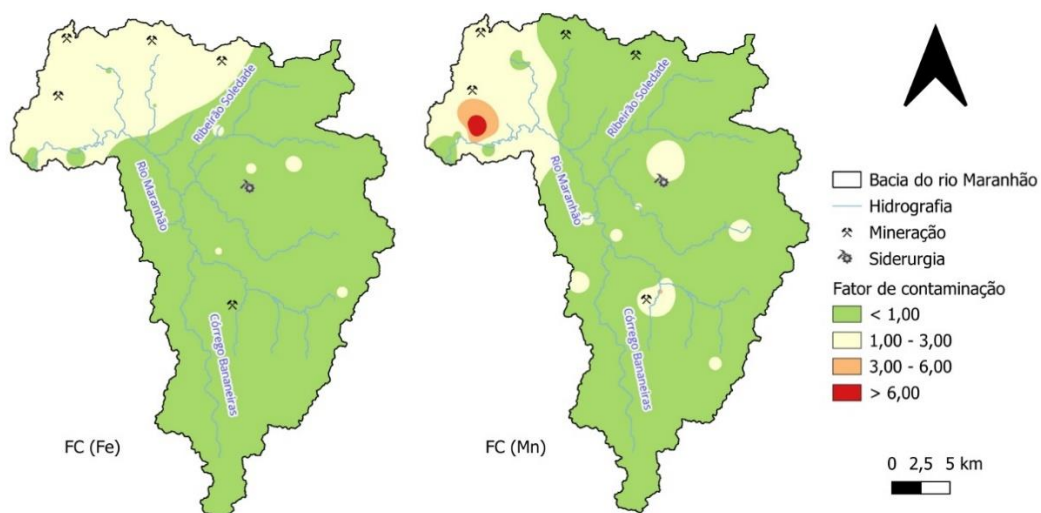
5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SEDIMENTOS

5.1 Fator de contaminação

O Fator de Contaminação (FC) é um índice simples e direto, utilizado para medir o grau de contaminação de um determinado elemento nos sedimentos, com base na razão entre a concentração observada e o valor de *background* local. Diferente do FE, o FC não aplica normalização por um elemento de referência, sendo especialmente útil para identificar excedentes de concentração em relação ao natural esperado.

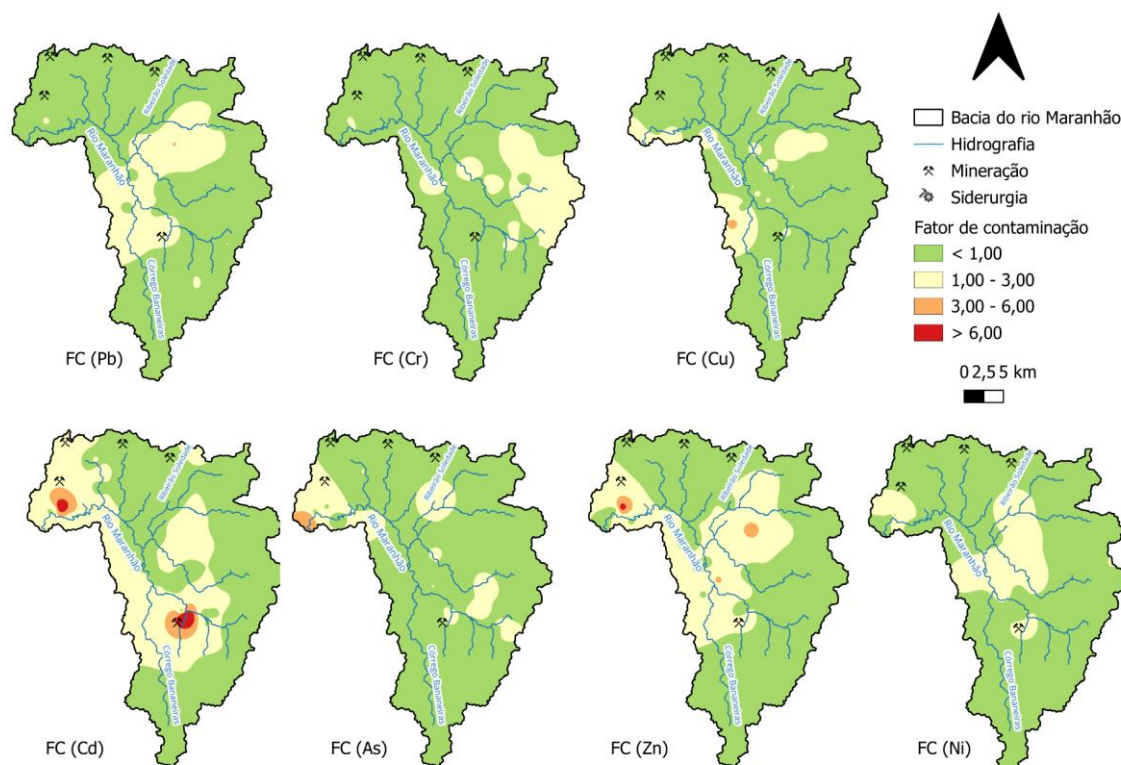
As figuras 5.1 e 5.2, apresenta os mapas temáticos de distribuição do fator de contaminação para cada elemento estudado. Esses mapas auxiliam na visualização espacial das áreas com maior potencial de impacto ambiental, oferecendo suporte à análise de riscos e à descrição de possíveis fontes abordadas nos próximos tópicos.

Figure 5.1 - Mapa de interpolação IDW da distribuição dos fatores de contaminação dos elementos maiores nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 5.2 - Mapa de interpolação IDW da distribuição dos fatores de contaminação dos elementos traços nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.1 Ferro

A análise do fator de contaminação (FC) para o ferro revelou que a maior parte das amostras apresenta concentrações compatíveis com o *background* da região. Das 64 amostras analisadas, 46 foram classificadas como de baixa contaminação (72%), indicando que o ferro presente nos sedimentos não apresenta perigo ao meio. Por outro lado, 18 amostras apresentaram nível de contaminação moderado ($1 \leq FC < 3$), estas amostras se concentram na região norte da bacia, como observado na figura 5.1, onde afloram as rochas do Grupo Itabira, ricas em ferro, que combinadas com processos minerários podem intensificar processos de intemperismo e deposição secundária. No entanto, nenhuma amostra atingiu os níveis classificados como contaminação considerável ($3 \leq FC < 6$) ou muito alta ($FC > 6$), como observado na tabela 5.1, o que confirma que o ferro, embora presente em teores relativamente

elevados devido à geologia regional, não se apresenta como um elemento de preocupação ambiental crítica com base neste índice.

A bacia do rio Maranhão mesmo possuindo grandes depósitos de minério de ferro, apresentou baixas contaminações em relação a este elemento, o mesmo ocorre na bacia do rio Conceição, Leão *et al.* (2021) também não registram nenhuma amostra com contaminação acima do considerável ($FC > 3$), isso reforça que a origem destas contaminações é predominantemente geogênica.

Tabela 5.1 - Fator de contaminação para o Ferro.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Baixo	46	72%
Moderado	18	28%
Considerável	0	0%
Alto	0	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.2 Manganês

O fator de contaminação (FC) do manganês apresentou maior variabilidade em relação ao ferro, revelando tanto áreas com condições naturais quanto pontos com níveis de alerta ambiental. Do total de amostras, 48 foram classificadas como de baixa contaminação ($FC < 1$), evidenciando predomínio de concentrações dentro dos padrões. Em contrapartida, 14 amostras apresentaram nível de contaminação moderado ($1 \leq FC < 3$), uma foi classificada como de contaminação considerável ($3 \leq FC < 6$), e uma atingiu nível de contaminação muito alta ($FC > 6$), observado na tabela 5.2. Esses dois últimos casos indicam a presença de pontos críticos na bacia, possivelmente influenciados por fontes antrópicas, como áreas de mineração ativa, como mostrado na figura 5.1, que pode estar ligado a deposição inadequada de rejeitos, ou processos erosivos intensificados em solos ricos em Mn.

A contaminação por manganês mostrou-se bem menos expressiva na bacia do rio Maranhão do que em outras bacias. Neste estudo, apenas 3% das amostras apresentaram maior que 3, valores inferiores aos 16% reportados por Leão *et al.* (2021) na bacia do rio Conceição e aos 100% encontrados por Peixoto (2022) na bacia do rio Piranga. Esses resultados indicam

que os pontos críticos estão relacionados com atividades antrópicas, mas que no geral a bacia não tem contaminações relevantes.

Tabela 5.2 - Fator de contaminação para o Manganês.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentuais (aproximadamente)
Baixo	48	75%
Moderado	14	22%
Considerável	1	1,5%
Alto	1	1,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.3 Arsênio

A análise do fator de contaminação (FC) para o arsênio revelou que a maioria das amostras apresenta baixa contaminação ($FC < 1$), refletindo concentrações próximas ao *background* regional. No entanto, 12 amostras foram classificadas como de contaminação moderada, e 4 como de contaminação considerável (Tabela 5.3), segundo os critérios de Hakanson (1980). As maiores concentrações foram observadas na região da foz da sub-bacia, sugerindo influência de aporte fluvial de material rico em As. Os resultados mostram que 6% das amostras apresentaram acima do nível de concentração moderado (Tabela 5.3), enquanto Leão *et al.* (2021) registrou 25% na bacia do rio Conceição, apontando que o As é um dos elementos de maior preocupação ambiental no QF, mas que na bacia do rio Maranhão as contaminações são mais pontuais.

A distribuição espacial desses valores, observada na figura 5.2, corrobora com os resultados obtidos anteriormente na análise de concentração total. Esses dados sugerem que, embora a maioria das amostras não indique risco elevado, há locais específicos com contaminação relevante, os quais merecem atenção em avaliações ambientais futuras, principalmente por se tratar de um elemento com alta toxicidade e mobilidade em ambientes aquáticos.

Tabela 5.3 - Fator de contaminação para o Arsênio.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentuais (aproximadamente)
Baixo	48	75%

Moderado	12	19%
Considerável	4	6%
Alto	0	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.4 Cádmio

Os resultados do fator de contaminação (FC) para o cádmio revelaram um padrão majoritariamente caracterizado por baixa contaminação na sub-bacia do rio Maranhão. Das amostras analisadas, 45 apresentaram baixa contaminação. Outras 17 amostras foram classificadas como de contaminação moderada (Tabela 5.4), sugerindo uma contribuição localizada, possivelmente relacionada a processos naturais de intemperismo de minerais sulfetados ou fontes difusas.

Embora a maioria das amostras tenha apresentado baixos níveis de contaminação por cádmio ($FC < 1$), duas amostras se destacaram por excederem significativamente os valores de referência, com fatores de contaminação de 11,7 e 19,1, sendo, portanto, classificadas como de contaminação muito alta segundo Hakanson (1980). Ambas as amostras estão associadas a drenagens que cruzam áreas de mineração. A primeira está localizada na porção central da sub-bacia, próxima a áreas com registro de lavra de manganês, elemento comumente associado a teores elevados de Cd em ambientes minerados. A segunda encontra-se na porção noroeste, próxima à foz da bacia, em região impactada por atividades de mineração de ferro, como indicado na Figura 5.2. A magnitude dos valores sugere forte influência antrópica localizada, possivelmente relacionada à disposição inadequada de rejeitos ou à remobilização de contaminantes antigos.

A comparação com outros estudos no Quadrilátero Ferrífero revela um comportamento distinto para o cádmio. Enquanto na bacia do rio Maranhão 3% das amostras apresentaram contaminação acima do moderado (Tabela 5.4), na bacia do rio Conceição, Leão et al. (2021) registrou 23% das amostras acima do mesmo limite. Em contraste, Peixoto (2022) não identificou nenhuma contaminação por cádmio na bacia do Piranga. Essa variabilidade demonstra que, diferentemente do arsênio, a contaminação por cádmio no Quadrilátero Ferrífero parece ser mais localizada e fortemente dependente de fontes antrópicas específicas, e não de um controle litológico regional generalizado.

Tabela 5.4 - Fator de contaminação para o Cádmio.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Baixo	45	70%
Moderado	17	27%
Considerável	0	0%
Alto	2	3%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.5 Cobre

A avaliação do fator de contaminação (FC) para o cobre revelou uma distribuição amplamente dominada por baixa contaminação ($FC < 1$) na sub-bacia do rio Maranhão, com 48 amostras enquadradas nessa categoria (Tabela 5.5). Esse resultado sugere que, em grande parte da bacia, o cobre ocorre em concentrações compatíveis com os valores de *background*, refletindo uma origem predominantemente natural.

Entretanto, 15 amostras apresentaram FCs entre 1 e 3, sendo classificadas como de contaminação moderada, enquanto uma única amostra atingiu valor entre 3 e 6, indicando contaminação considerável. Essas ocorrências, embora restritas, estão espacialmente associadas a regiões pontuais da bacia, sem formar zonas contínuas de contaminação. Os pontos com CFs elevados se distribuem de forma dispersa (Figura 5.2), sugerindo fontes locais e específicas, possivelmente relacionadas a processos de enriquecimento natural localizados. Observa-se ainda que essas áreas de maior contaminação coincidem com anomalias geoquímicas de cobre (Cu) e ocorrem majoritariamente sobre unidades do Grupo Sabará, cuja composição com rochas metavulcanoclástica e tufos vulcânicos, pode favorecer a concentração natural de certos metais traço, como o cádmio. Esse contexto reforça a possibilidade de contribuição geogênica associada à geologia da região, embora a influência de passivos antrópicos antigos não possa ser descartada.

Tabela 5.5 - Fator de contaminação para o Cobre.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Baixo	48	75%
Moderado	15	23,5%

Considerável	1	1,5%
Alto	0	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.6 Cromo

Os valores do fator de contaminação (FC) para o cromo na sub-bacia do rio Maranhão indicaram, predominantemente, baixa contaminação, com 48 amostras apresentando $FC < 1$ (Tabela 5.6). Essa predominância sugere que o cromo, em grande parte da bacia, está presente em níveis compatíveis com os valores de *background*, não representando risco ambiental relevante na maioria das áreas amostradas.

Por outro lado, 16 amostras apresentaram FCs entre 1 e 3, sendo classificadas como de contaminação moderada, o que indica uma elevação pontual nas concentrações desse elemento. Essas amostras com valores mais elevados estão concentradas na porção leste da sub-bacia (Figura 5.2), região onde ocorrem afloramentos de rochas do Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, de composição metamáficas e metaultramáficas. Essa distribuição espacial sugere que os níveis moderados de contaminação por cromo podem estar relacionados a fontes geogênicas, como o intemperismo de rochas máficas e ultramáficas. No entanto, não se pode descartar totalmente a contribuição antrópica localizada.

A comparação com a bacia do rio Conceição evidencia um enriquecimento menor na bacia do rio Maranhão. Neste trabalho, nenhuma das amostras apresentaram contaminação considerável a alta (Tabela 5.6), um percentual um pouco menor que os 10% registrados por Leão et al. (2021). Já Peixoto (2022) identificou que mais 92% das amostras de cromo estão acima desse limite na bacia do rio Piranga. Esse resultado salienta que o enriquecimento de cromo não apresenta grandes preocupações na área de estudo, e que as contaminações moderadas possuem um controle litológico, como explicado acima.

Tabela 5.6 - Fator de contaminação para o Cromo.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Baixo	48	72%
Moderado	16	28%
Considerável	0	0%

Alto	0	0%
------	---	----

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.7 Chumbo

A análise do fator de contaminação (FC) para o chumbo na sub-bacia do rio Maranhão evidenciou uma predominância de baixa contaminação, com 48 amostras apresentando $FC < 1$ (Tabela 5.7). Esse resultado indica que em 75% da área estudada, o chumbo ocorre em concentrações não preocupantes, sugerindo origem essencialmente natural ou níveis de contaminação não significativos. Em contrapartida, 15 amostras registraram FCs entre 1 e 3, sendo classificadas como de contaminação moderada, e uma amostra apresentou valor entre 3 e 6, enquadrando-se como de contaminação considerável, próxima ao complexo siderúrgico da Gerdau. Essa ocorrência isolada de contaminação um pouco mais expressiva reforça a existência de pontos críticos na bacia que podem estar sujeitos a influências pontuais antrópicas. Essas maiores concentrações correspondem às mesmas regiões onde ocorrem as anomalias de Chumbo, descrita no capítulo anterior, como é possível observar na figura 5.2.

Tabela 5.7 - Fator de contaminação para o Chumbo.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Baixo	48	75%
Moderado	15	23,5%
Considerável	1	1,5%
Alto	0	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.8 Níquel

O fator de contaminação (FC) calculado para o níquel indicou que 75% das amostras apresenta baixa contaminação ($FC < 1$), sugerindo que, de forma geral, o elemento ocorre em concentrações compatíveis com o *background* da sub-bacia do rio Maranhão (Tabela 5.8). No entanto, 15 amostras exibiram FCs entre 1 e 3, sendo classificadas como de contaminação moderada, enquanto uma amostra isolada apresentou FC entre 3 e 6, caracterizando contaminação considerável, segundo a classificação de Hakanson (1980).

Esse padrão indica que, embora o níquel não represente um risco difuso na bacia, há zonas pontuais de contaminação que merecem atenção. Essas amostras com valores mais elevados coincidem espacialmente com áreas anômalas de Ni, evidenciadas nos mapas geoquímicos, e estão majoritariamente sobre litologias do Grupo Sabará e da Suíte Alto Maranhão, compostas por rochas metavulcano-sedimentares e granitoides máficos, que naturalmente podem concentrar níquel. Além disso, as ocorrências de maior FC estão localizadas próximas a áreas com intensa atividade mineradora, pátios de minério e complexos siderúrgicos (Figura 5.2), sugerindo uma possível sinergia entre fontes geogênicas e antrópicas na geração dessas anomalias.

Tabela 5.8 - Fator de contaminação para o Níquel.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Baixo	48	75%
Moderado	15	23,5%
Considerável	1	1,5%
Alto	0	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.9 Zinco

A análise do fator de contaminação (FC) para o zinco indicou que 48 amostras apresentaram valores inferiores a 1 (Tabela 5.9), sendo classificadas como de baixa contaminação, o que reflete, na maior parte da sub-bacia do rio Maranhão, concentrações próximas aos níveis naturais desse elemento. Por outro lado, 13 amostras exibiram contaminação moderada, duas amostras apresentaram contaminação considerável, e uma amostra atingiu FC superior a 6, sendo classificada como de alta contaminação.

A comparação com outros estudos no QF evidencia um cenário um pouco mais crítico para o zinco na bacia do rio Maranhão. Enquanto neste trabalho 4,5% apresentaram contaminação acima de 3, Leão *et al.* (2021) não registraram nenhuma amostra acima desse limite para Zn na bacia do rio Conceição.

Esta disparidade é um forte indicativo de que as fontes de contaminação por zinco na sub-bacia do rio Maranhão não são predominantemente geogênicas. Uma assinatura puramente litológica resultaria em um padrão de contaminação mais homogêneo e comparável entre bacias

vizinhas inseridas no mesmo contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero. O fato da contaminação de maior relevância por Zn no rio Maranhão estar espacialmente associada a complexos siderúrgicos (Gerdau e Gage) e áreas de influência de grandes mineradoras (CSN e Vale), conforme mostrado na Figura 5.2, aponta decisivamente para uma origem antrópica. Essa contaminação pontual estaria relacionada a emissões industriais, disposição de resíduos ou carreamento de materiais contaminados.

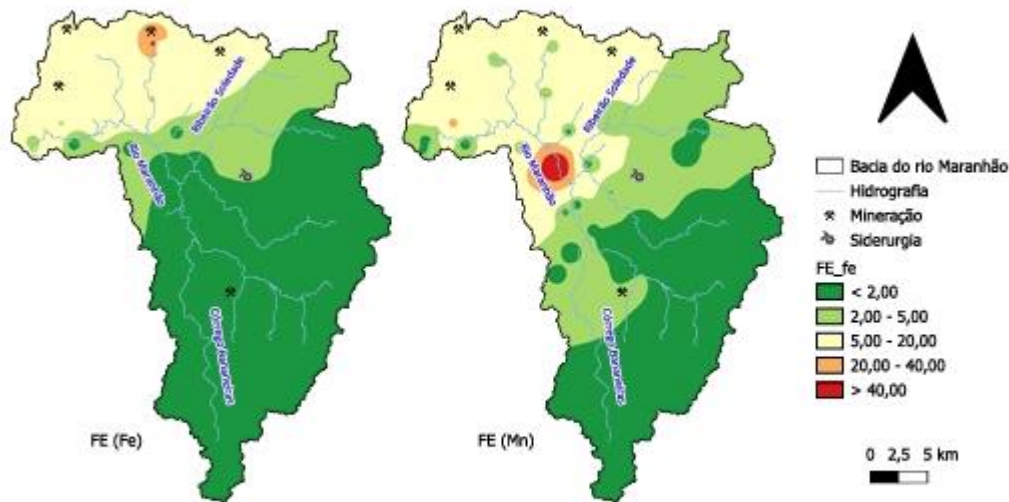
Tabela 5.9 - Fator de contaminação para o Zinco.

Classificação Fator de Contaminação	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Baixo	48	75%
Moderado	13	20,5%
Considerável	2	3%
Alto	1	1,5%

5.2 Fator de enriquecimento

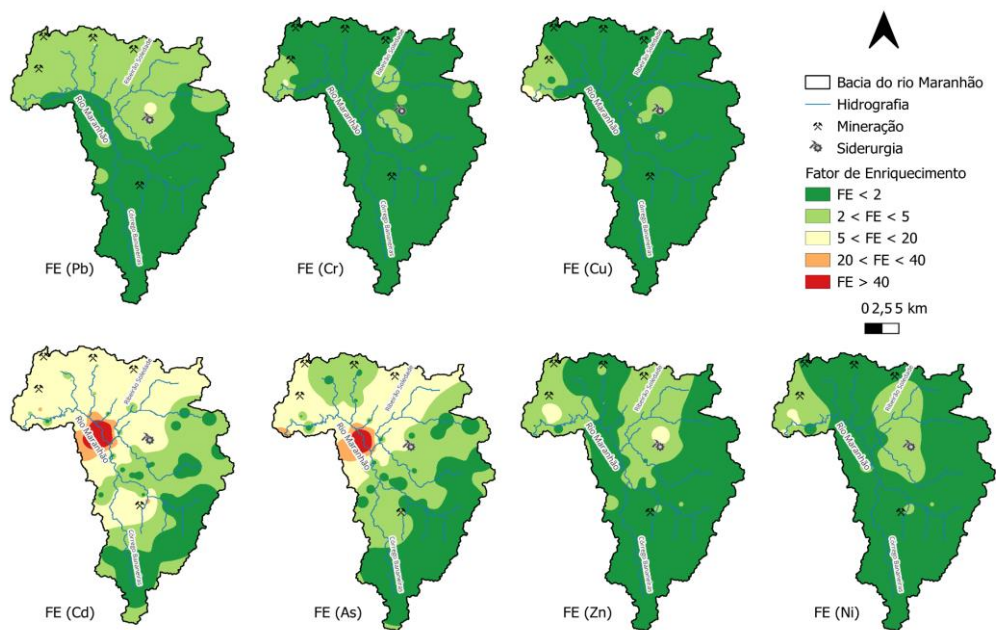
O Fator de Enriquecimento (FE) é uma ferramenta amplamente utilizada em estudos geoambientais com o objetivo de avaliar o grau de contribuição antrópica na concentração de elementos traços em sedimentos. Este índice compara os teores observados de um elemento com o *background* geoquímico da região, normalizados em relação a concentração de Alumínio (Al), devido sua alta concentração e baixa mobilidade, permitindo distinguir entre concentrações naturais e aquelas possivelmente associadas a atividades humanas.

Figure 5.3 - Mapa de interpolação IDW dos fatores de enriquecimento dos elementos Fe e Mn.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figure 5.4 - Mapa de interpolação IDW dos fatores de enriquecimento dos elementos traços nos sedimentos fluviais da bacia do rio Marañão.



Fonte: Elaborado pelo autor

As figuras 5.3 e 5.4, apresenta os mapas com a distribuição espacial do fator de enriquecimento para os elementos analisados na área de estudo. Esses mapas possibilitam identificar áreas com diferentes graus de enriquecimento, contribuindo para a avaliação e descrição preliminar de potenciais fontes de contaminação abordadas nos próximos tópicos.

5.2.1 Ferro

A avaliação do fator de enriquecimento (FE) para o ferro revelou predominância de fontes naturais em grande parte da bacia, reflexo direto da geologia regional, marcada por formações ferríferas típicas do Quadrilátero Ferrífero. Do total de amostras, 78% foram classificadas como sem contaminação ($FE < 2$), como observado na tabela 5.10, o que é consistente com a abundância natural de ferro em litologias como itabiritos e filitos ferruginosos.

Apesar disso, observou-se também a ocorrência de enriquecimento em algumas localidades, 4 amostras apresentaram enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$), 7 apresentaram enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$), 2 com enriquecimento muito alto ($20 \leq FE < 40$) e uma amostra com enriquecimento extremamente alto ($FE > 40$). Esses dados indicam que, embora o ferro (Fe) ocorra naturalmente em altas concentrações na região, há pontos onde os teores se encontram significativamente acima do esperado, o que pode refletir tanto a presença de materiais ferruginosos mais concentrados quanto interferências antrópicas pontuais, especialmente associadas às atividades minerárias e à deposição de rejeitos. Segundo Leão (2019), valores elevados do fator de enriquecimento (FE) para o ferro são esperados em regiões mineradas, especialmente em áreas próximas a empreendimentos de extração de minério de ferro. Nesses locais, a intensa movimentação e a dispersão de material particulado contribuem para o aumento do aporte de ferro nos sistemas fluviais. Esse padrão é observado no setor norte da sub-bacia do rio Maranhão, como observado na figura 5.3, onde estão as maiores concentrações de ferro e os mais altos valores de FE. Essa região abriga importantes minas de minério de ferro e é caracterizada pela presença das rochas do Grupo Itabira, com destaque para os itabiritos, que são naturalmente ricos nesse elemento.

A comparação com a bacia do rio Conceição, também submetida a intensa atividade de mineração de ferro, revela um cenário distinto. Na bacia do rio Maranhão, 15% das amostras apresentaram enriquecimento significativo (Tabela 5.10), um percentual consideravelmente inferior aos 43% registrados por Leão *et al.* (2021) na bacia do rio Conceição. Esta diferença está intrinsecamente associada à distinta distribuição e predominância das unidades geológicas

portadoras de ferro entre as duas bacias. Enquanto na bacia do rio Conceição as rochas dos Grupos Nova Lima, Itabira e Piracicaba são predominantes e amplamente distribuídas, na bacia do rio Maranhão essas unidades ocorrem de forma mais restrita, principalmente em uma faixa na porção norte.

Tabela 5.10 - Fator de enriquecimento para o Ferro.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Sem contaminação	50	78%
Moderado	4	6,5%
Significativo	7	11%
Muito alto	2	3%
Extremamente alto	1	1,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Manganês

O manganês apresentou comportamento geoquímico semelhante ao do ferro, com predomínio de fontes naturais, mas com indícios claros de enriquecimento em pontos específicos. Das amostras analisadas, 76,5% foram classificadas como sem contaminação ($FE < 2$), o que é compatível com a ocorrência natural de manganês em unidades ferruginosas e metassedimentares do Quadrilátero Ferrífero. Contudo, como mostrado na tabela 5.11, foram observadas 5 amostras de enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$), 8 de enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$), 1 de enriquecimento muito alto ($20 \leq FE < 40$) e 1 amostra com enriquecimento extremamente alto ($FE > 40$), localizada muito próximo a mina de Morro da Mina, onde ocorre a exploração de Manganês (Figura 5.3), que indica influência direta, tanto da geologia local, como de atividades antrópicas, associadas à exploração. Essa área é historicamente marcada por intensa atividade mineradora, onde materiais mineralizados contendo manganês e elementos traço foram expostos, erodidos e transportados para o sistema de drenagem local, que contribui para o enriquecimento geoquímico nos sedimentos fluviais próximos à mina.

Segundo Leão (2019), as elevadas concentrações de manganês observadas no Quadrilátero Ferrífero estão associadas tanto a fatores naturais, como a alteração química de rochas ferruginosas e processos de intemperismo, quanto a fontes antrópicas, principalmente em áreas mineradas. A mobilização do Mn também pode ocorrer por meio de processos

hidrodinâmicos e biogeoquímicos, e os elevados teores em sedimentos fluviais podem indicar influência de passivos ambientais ou acúmulo de material contaminado. Além disso, a deposição fluvial pode ser intensificada por distúrbios antrópicos, como erosão acelerada, movimentação de solo e lançamentos de resíduos.

Em comparação com outras bacias inseridas no Quadrilátero Ferrífero, os valores de fator de enriquecimento (FE) para o manganês na bacia do rio Maranhão apresentam valores abaixo de outros estudos, com aproximadamente 15% das amostras apresentando enriquecimento acima do moderado (Tabela 5.11). Esse resultado é inferior ao observado por Leão (2019) na bacia do rio Conceição, onde cerca de 27,4% das amostras ultrapassaram esse limite, mas inferior ao reportado por Peixoto (2022) na bacia do rio Piranga, onde 100% das amostras apresentaram contaminação acima do significativo. Essa diferença pode estar relacionada às características geológicas e geoquímicas entre as bacias, além de reforçar que pontos críticos da bacia do rio Maranhão estão associados a atividades antrópicas e merecem monitoramento ambiental contínuo.

Tabela 5.11 - Fator de enriquecimento para o Manganês.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Sem contaminação	49	76,5%
Moderado	5	8%
Significativo	8	12,5%
Muito alto	1	1,5%
Extremamente alto	1	1,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.3 Arsênio

Neste estudo, os valores de FE para o arsênio revelaram um cenário de variação significativa na bacia estudada. Do total de amostras analisadas, 78% apresentaram valores de FE classificados como sem contaminação ($FE < 2$), o que sugere predominância de fontes naturais para a presença de arsênio nessas áreas, provavelmente relacionadas às características litológicas locais, como observado por Peixoto (2022) na bacia do rio Piranga. Por outro lado, como mostrado na tabela 5.12, 8 amostras apresentaram enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$), 4 apresentaram enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$), uma apresentou enriquecimento

muito alto ($20 \leq FE < 40$) e uma amostra foi classificada com enriquecimento extremamente alto ($FE > 40$), de acordo com os critérios de Sutherland (2000).

A variação espacial das concentrações de arsênio apresenta forte semelhança com a distribuição do cádmio, especialmente nos valores mais elevados, que se concentram na porção leste da bacia (Figura 5.4). Essa tendência pode estar relacionada à presença de fontes pontuais de contaminação ou ao acúmulo de material transportado. Uma hipótese plausível é a contribuição geogênica proveniente das rochas da Suíte Alto Maranhão. Martins (2008) identificou, em sua caracterização geoquímica da Suíte, valores elevados de elementos traço como Cr e Ni, especialmente em rochas máficas e intermediárias, como quartzo-dioritos e enclaves máficos. Apesar do autor não apresentar dados específicos de arsênio, a presença de minerais acessórios como zircão, titanita, allanita e apatita, frequentemente associados a elementos traço em contextos magmáticos ou hidrotermais, pode indicar a existência de teores relevantes de As nessa unidade. Além disso, a amostra com fator de enriquecimento (FE) muito alto está localizada nas proximidades de uma pedreira ativa (JMX Mineração), sugerindo possível influência antrópica. Atividades de lavra como detonações e britagem promovem a fragmentação das rochas, expondo minerais à ação do intemperismo químico, além de gerar material particulado fino. Esse material pode ser facilmente transportado pelas águas superficiais e carregado para drenagens próximas, contribuindo para a contaminação dos sedimentos. O comportamento geoquímico do arsênio, caracterizado por alta mobilidade em ambientes oxidantes e forte adsorção a óxidos de ferro e manganês, abundantes nos sedimentos da região, favorece sua concentração em zonas deposicionais e pode explicar a anomalia registrada.

A análise do fator de enriquecimento (FE) para o arsênio revela um padrão distinto quando comparado a outras bacias do Quadrilátero Ferrífero. Na bacia do rio Maranhão, 9,5% das amostras apresentaram enriquecimento significativo a extremamente alto (Tabela 5.12). Este resultado mostra uma notável semelhança com o cenário descrito por Peixoto (2022) para a bacia do rio Piranga, onde aproximadamente 10% das amostras se enquadram no mesmo nível de enriquecimento. Este padrão, no entanto, contrasta fortemente com os achados de Leão et al. (2021) na bacia do rio Conceição, onde nenhuma amostra apresentou enriquecimento significativo de arsênio. Esse contraste evidencia que o enriquecimento relativo ao alumínio é significativamente maior nas bacias rio Maranhão e do rio Piranga, sugerindo uma fonte antrópica ou geogênica mais pontual e intensa para o arsênio.

Tabela 5.12 - Fator de enriquecimento para o Arsênio.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Sem contaminação	50	78%
Moderado	8	12,5%
Significativo	4	6,5%
Muito alto	1	1,5%
Extremamente alto	1	1,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.4 Cádmi

O fator de enriquecimento (FE) do cádmio apresentou maior variabilidade em comparação aos demais elementos analisados, evidenciando tanto a presença de concentrações naturais quanto possíveis fontes antrópicas em determinadas áreas da bacia. Do total de amostras, 69% foram classificadas como sem contaminação ($FE < 2$), sugerindo que, para a maior parte da bacia, os níveis de cádmio se encontram dentro dos padrões naturais, possivelmente derivados de processos geoquímicos associados à litologia regional. No entanto, conforme apresenta a tabela 5.13, 18 amostras apresentaram enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$), 9 com enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$), 2 com enriquecimento muito alto ($20 \leq FE < 40$) e uma amostra com enriquecimento extremamente alto ($FE > 40$). Esses resultados indicam que 48% das amostras, apresentaram enriquecimento relevante, acumuladas a noroeste da bacia, como identificado na figura 5.4, onde apresentam os valores mais elevados. Como dito anteriormente, a distribuição espacial é semelhante ao do arsênio, indicando que ambos os elementos podem estar sujeitos a fontes e mecanismos de transportes semelhantes, como já descrito na seção sobre arsênio.

Segundo Leão (2019), valores de FE superiores a 10 são fortemente indicativos de fontes não naturais, como atividades industriais, mineradoras ou urbanas mal geridas. Ainda de acordo com a pesquisa do autor, 40% das amostras apresentaram contaminação significativa a alta na bacia do rio Conceição. Portanto, bem superiores aos registrados neste trabalho, apresentando um pouco mais de 18% com enriquecimento acima de cinco (Tabela 5.13). Apesar disso, em ambas as bacias o cádmio tem origem predominantemente antrópica, com contribuições prováveis da mineração.

Tabela 5.13 - Fator de enriquecimento para o Cádmio.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Sem contaminação	44	69%
Moderado	8	12,5%
Significativo	9	14%
Muito alto	2	3%
Extremamente alto	1	1,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.5 Cobre

Os valores do fator de enriquecimento (FE) para o cobre na área de estudo demonstram, em geral, uma baixa influência antrópica sobre a presença desse elemento nos sedimentos fluviais. Das 64 amostras analisadas, 84,5% foram classificadas como sem contaminação ($FE < 2$), o que evidencia que, em sua maioria, os teores de cobre estão dentro dos limites considerados naturais e compatíveis com a composição geológica da região.

No entanto, como se observa na tabela 5.14, 9 amostras apresentaram enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$) e uma foi classificada com enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$), na foz da bacia (Figura 5.4), o que pode indicar influências pontuais. Esses valores mais elevados, embora restritos a uma minoria das amostras, devem ser observados com atenção, especialmente em locais onde haja indícios de impacto antrópico ou proximidade de áreas de mineração e indústria, mesmo que em pequena escala. A ausência de amostras com enriquecimento muito alto ($20 \leq FE < 40$) ou extremamente alto ($FE > 40$) reforça o entendimento de que o cobre não constitui um dos principais contaminantes traços na bacia em termos de enriquecimento. Esse padrão também foi verificado por Leão (2019), onde os valores de FE para cobre, mesmo em bacias sob influência de mineração, tendem a ser baixos a moderados, a menos que haja fontes pontuais intensas.

Portanto, os resultados do fator de enriquecimento indicam que, embora existam casos isolados de enriquecimento moderado a significativo, o cobre se distribui de forma relativamente homogênea e com baixa intensidade de enriquecimento, refletindo um ambiente em equilíbrio geoquímico na maior parte da área estudada.

Tabela 5.14 - Fator de enriquecimento para o Cobre.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Sem contaminação	54	84,5%
Moderado	9	14%
Significativo	1	1,5%
Muito alto	0	0%
Extremamente alto	0	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.6 Cromo

A avaliação do fator de enriquecimento (FE) para o cromo revelou uma predominância de concentrações compatíveis com fontes naturais na área estudada. Das amostras analisadas, 83% foram classificadas como sem contaminação ($FE < 2$), indicando que a presença de cromo nos sedimentos da região está diretamente associada à composição litológica regional e aos processos naturais de intemperismo e transporte de material.

Contudo, conforme apresenta a tabela 5.15, 10 amostras apresentaram enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$), e uma amostra foi classificada como enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$), estas amostras estão nas regiões centrais e na foz da bacia (Figura 5.4), onde afloram rochas máficas e ultramáficas, como encontradas na Suíte Alto Maranhão e no Complexo Santo Antônio do Pirapetinga, que podem contribuir para enriquecimento natural de cromo, mas atividades antrópicas não podem ser descartadas. Nenhuma amostra apresentou enriquecimento classificado como muito alto ($20 \leq FE < 40$) ou extremamente alto ($FE > 40$), o que corrobora com a ideia de que o cromo, embora presente em concentrações relativamente elevadas em algumas áreas, não apresenta, na maior parte da bacia, sinais claros de contaminação por fontes antrópicas intensas. Em estudos similares, como o de Peixoto (2022) e Leão (2019), observou-se que os maiores valores de FE para o cromo estavam associados a áreas sobre rochas do tipo greenstone belt, que naturalmente concentram esse elemento, mas também estavam em locais próximos à mineração. Dessa forma, a interpretação dos valores de FE deve considerar tanto os aspectos geológicos quanto os históricos de uso e ocupação da terra.

Em síntese, o fator de enriquecimento do cromo indica, em sua maioria, ausência de contaminação relevante, mas revela também áreas com potencial influência antrópica ou

enriquecimento geogênico acentuado, o que justifica a continuidade do monitoramento ambiental e geológico em pontos específicos da bacia.

Tabela 5.15 - Fator de enriquecimento para o Cromo.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Sem contaminação	53	83%
Moderado	10	15,5%
Significativo	1	1,5%
Muito alto	0	0%
Extremamente alto	0	05%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.7 Chumbo

A análise do fator de enriquecimento (FE) para o chumbo revelou um padrão de distribuição que aponta, predominantemente, para a origem natural deste elemento na maior parte da área de estudo. Das amostras analisadas, 68,5% foram classificadas como sem contaminação ($FE < 2$), sugerindo que, nessas localidades, o chumbo presente nos sedimentos está diretamente relacionado à geologia da região e aos processos de intemperismo e transporte fluvial. Por outro lado, como mostrado na tabela 5.16, 19 amostras apresentaram valores de FE classificados como de enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$), e 2 amostras foram classificadas com enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$), indicando potenciais contribuições antrópicas pontuais, principalmente na região norte da bacia (Figura 5.4). O fato de nenhuma amostra ter apresentado valores classificados como muito alto ($20 \leq FE < 40$) ou extremamente alto ($FE > 40$) reforça a ideia de que o chumbo, embora com algumas concentrações relevantes, não está entre os principais contaminantes em termos de enriquecimento na bacia. Mas vale ressaltar, que valores de FE superiores a 1,5 podem indicar uma fonte não natural, ainda que leve (ZHANG *et al.*, 2009 *apud* LEÃO, 2019), sendo possíveis fontes, atividades industriais e lançamento de resíduos urbanos. As amostras com FE moderado a significativo merecem atenção, principalmente a amostra localizada na porção central do mapa, próximo ao complexo siderúrgico operado pela Gerdau (Figura 5.12).

Tabela 5.16 - Fator de enriquecimento para o Chumbo.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
-------------------------	--------------------	------------------------------

Sem contaminação	43	68,5%
Moderado	18	28,5%
Significativo	2	3%
Muito alto	0	0%
Extremamente alto	0	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.8 Níquel

O fator de enriquecimento (FE) do níquel indicou, na maior parte da área estudada, ausência de contaminação significativa (Figura 5.4). Conforme os dados da Tabela 5.17, 78% das amostras analisadas foram classificadas como não contaminadas ($FE < 2$). Isso sugere que as concentrações de níquel nessas localidades são resultado principalmente de processos naturais, como o intemperismo e a erosão de rochas máficas e ultramáficas. Essa associação geológica é consistente com as rochas da Suíte Alto Maranhão, que inclui tonalitos e quartzo-dioritos com enclaves máficos. Dados litogeoquímicos de Martins (2008) confirmam que os teores de níquel na região variam significativamente conforme a litologia: podem exceder 50 ppm em tonalitos de baixa sílica e enclaves máficos, enquanto nos tonalitos mais evoluídos (de média e alta sílica) os valores são iguais ou inferiores a 8 ppm.

No entanto, como observado na tabela 5.17, 11 amostras apresentaram enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$), enquanto outras 3 foram classificadas com enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$). Nenhuma amostra ultrapassou os limites de enriquecimento muito alto ($FE \geq 20$), o que reforça a ideia de que não há evidência expressiva de aporte antrópico generalizado de níquel na bacia.

Tabela 5.17 - Fator de enriquecimento para o Níquel.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Sem contaminação	50	78%
Moderado	11	17%
Significativo	3	5%
Muito alto	0	0%
Extremamente alto	0	0%

5.2.9 Zinco

A avaliação do fator de enriquecimento (FE) para o zinco na bacia do rio Maranhão revelou que a maioria das amostras apresenta níveis compatíveis com a origem natural desse elemento nos sedimentos. Dos dados analisados, 70% das amostras foram classificadas como sem contaminação ($FE < 2$), indicando que, nessas áreas, o zinco possui origem predominantemente geogênica e aos processos naturais de intemperismo e transporte. Esses dados estão apresentados na Tabela 5.18, que resume a classificação do FE e o número de amostras em cada categoria.

Em contrapartida, 17 amostras apresentaram FE com enriquecimento moderado ($2 \leq FE < 5$), enquanto 2 amostras alcançaram níveis classificados como enriquecimento significativo ($5 \leq FE < 20$), o que pode sugerir alguma contribuição antrópica localizada. Tais contribuições podem estar relacionadas a áreas com passivos ambientais urbanos ou industriais, ou mesmo ao uso agrícola intensivo, onde o zinco pode ser introduzido por fertilizantes, pesticidas ou efluentes. A Figura 5.4, que apresenta a distribuição espacial do zinco na sub-bacia do rio Maranhão, evidencia que os pontos com valores mais elevados de FE estão concentrados em áreas urbanizadas ou próximas a atividades antrópicas, reforçando essa hipótese. A ausência de amostras com enriquecimento classificado como muito alto ($20 \leq FE < 40$) ou extremamente alto ($FE > 40$) reforça que o zinco, apesar de apresentar algumas áreas com enriquecimento relevante, não configura um dos principais contaminantes traço da bacia estudada. Esse padrão é coerente com os resultados observados por Peixoto (2022), onde o zinco também se mostrou um elemento com distribuição espacial ampla, porém com baixos indícios de contaminação severa.

Tabela 5.18 - Fator de enriquecimento para o Zinco.

Fator de enriquecimento	Número de amostras	Percentual (aproximadamente)
Sem contaminação	45	70%
Moderado	17	27%
Significativo	2	3%
Muito alto	0	0%
Extremamente alto	0	0%

5.3 Risco ecológico potencial

A avaliação do risco ecológico (RI) é uma etapa fundamental para compreender os impactos potenciais de elementos potencialmente tóxicos nos ecossistemas aquáticos da sub-bacia do rio Maranhão. Este índice integra a concentração dos elementos analisados com seu fator de toxicidade relativo, permitindo uma análise mais abrangente da ameaça ambiental representada por cada elemento químico presente nos sedimentos.

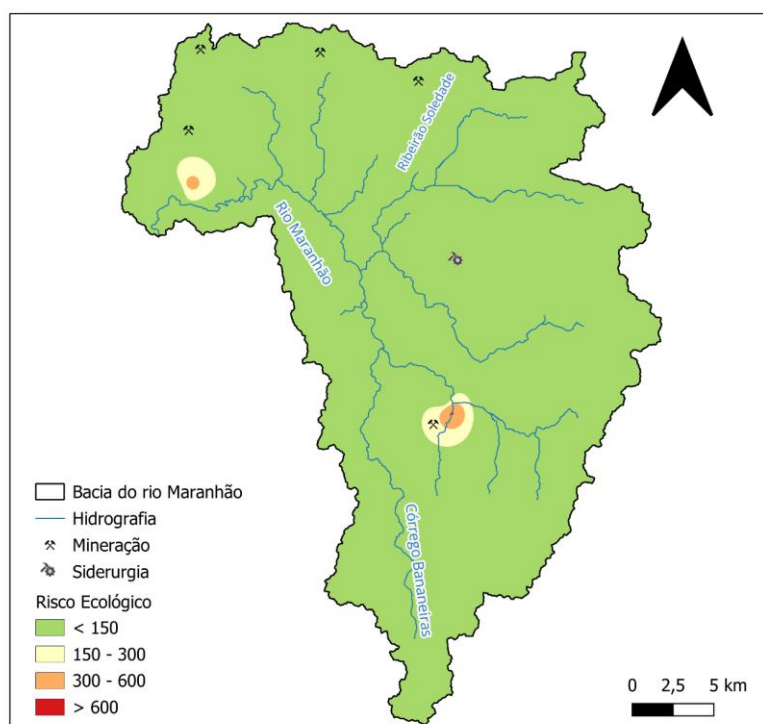
Com base na metodologia proposta por Hakanson (1980), os riscos potenciais individuais (Er) foram calculados para cada elemento, considerando os respectivos fatores de toxicidade (As = 10; Cd = 30; Cr = 2; Cu = 5; Ni = 2; Pb = 5; Zn = 1), e posteriormente somados para obter o risco ecológico (RI). A classificação utilizada divide os resultados em quatro classes, baixo ($RI < 150$), moderado ($150 \leq RI < 300$), considerável ($300 \leq RI < 600$) e muito alto ($RI \geq 600$).

A análise dos dados revelou que a maioria das amostras da sub-bacia do rio Maranhão apresentou valores de RI classificados como risco ecológico baixo, o que sugere uma condição relativamente estável do ponto de vista ambiental, sem indicativos generalizados de contaminação crítica. Esse padrão reflete a predominância de concentrações dentro dos limites naturais para a maioria dos elementos analisados. No entanto, duas amostras se destacam por apresentarem valores significativamente mais elevados de risco ecológico. Uma delas apresentou um RI superior a 300, sendo enquadrada como de risco considerável. A outra amostra atingiu um valor de RI acima de 600, o que caracteriza uma situação de risco ecológico muito alto. Essas duas amostras se localizam a jusante de áreas de extração de ferro e manganês, como observado na figura 5.5, o que sugere uma influência direta dessas atividades na contaminação de sedimentos, podendo afetar negativamente a biota.

A análise integrada dos dados revelou que os elementos arsênio (As) e cádmio (Cd) apresentaram os maiores valores de risco ecológico individual (Er) na bacia do rio Maranhão. Situação semelhante foi descrita por Leão (2019) na bacia do rio Conceição, também inserida no Quadrilátero Ferrífero, onde esses mesmos elementos apresentaram concentrações elevadas em áreas próximas a empreendimentos de exploração mineral. Essa correlação pode estar associada à própria geologia da regional, com grandes depósitos minerais, estas rochas quando expostas ao intemperismo devido a remoção mecânica durante a lavra, liberam metais potencialmente tóxicos. Além disso, o carreamento superficial desses elementos, principalmente a partir de cavas, pilhas de estéril e rejeitos, favorece o transporte de partículas contaminadas até os corpos hídricos.

Em síntese, apesar da predominância de risco ecológico baixo na maior parte da bacia, a presença de amostras com índices acima dos limites críticos indica que a sub-bacia do rio Maranhão não está isenta de ameaças ambientais, sendo recomendada a continuidade do monitoramento e a investigação mais detalhada nas áreas de maior risco.

Figure 5.5 - Mapa de interpolação IDW do Risco Ecológico (RI) nos sedimentos fluviais da bacia do rio Maranhão.



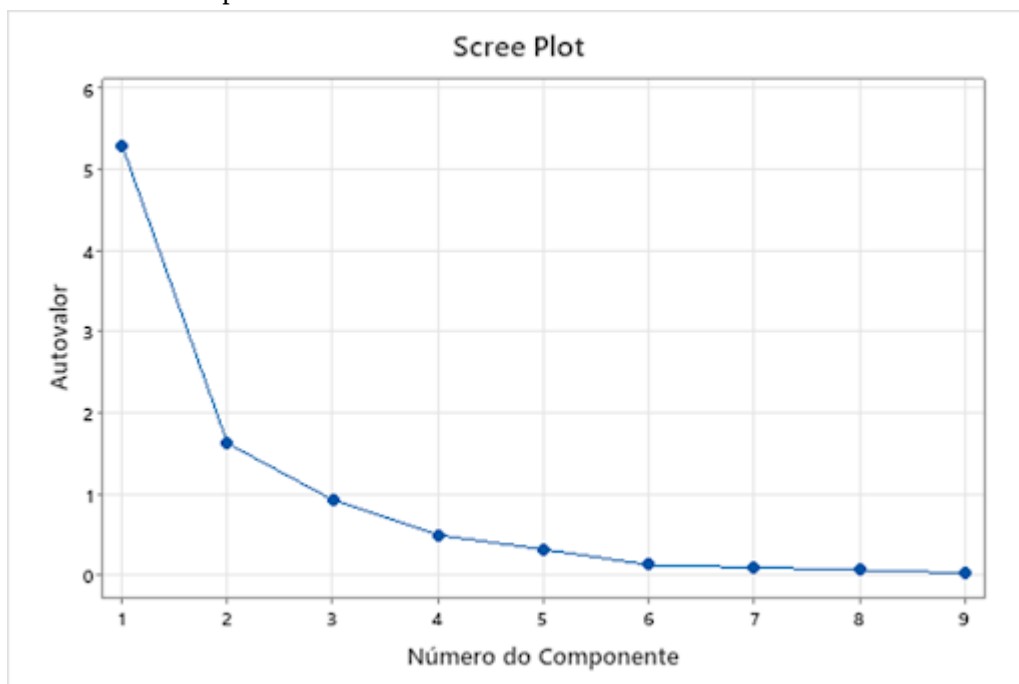
Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Análise Multivariada

A aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) permitiu sintetizar as relações entre os elementos analisados e identificar os principais fatores que controlam a variabilidade geoquímica dos sedimentos da sub-bacia do rio Maranhão. A PCA complementa as interpretações obtidas a partir dos índices ambientais e da distribuição espacial dos elementos, fornecendo uma visão integrada sobre a origem e os processos que influenciam a composição geoquímica local. O gráfico scree plot (Figura 5.6) obtido através desse método, mostra uma queda acentuada do autovalor do CP1 para o CP2 e depois uma estabilização a partir do CP3,

esse ponto de inflexão (cotovelo) indica que os dois primeiros componentes são suficientes para representar a maior parte da variação dos dados.

Figure 5.6 - Gráfico scree plot.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) explicaram 76,9% da variância total dos dados (Tabela 5.19), representando adequadamente a estrutura multivariada do conjunto e da diversidade litológica da região. O CP1, responsável por 58,8% da variância, apresentou altas cargas positivas para Pb, Cr, Cu, Ni e Zn, como é possível observar no gráfico de loading (Figura 5.7), o gráfico ainda nos mostra que esses elementos apresentam vetores longos, que indicam forte influência e correlação com CP1. Esse agrupamento reflete um fator litológico dominante, relacionado à composição das rochas máficas e ultramáficas que ocorrem na região, como as encontradas no complexo Santo Antônio do Pirapetinga e na Suíte Alto Maranhão, com as maiores concentrações associadas onde estas unidades afloram. Além disso, esses elementos apresentaram, em geral, baixos valores para os fatores de contaminação e enriquecimento.

O segundo componente principal (CP2), responsável por 18,1% da variância, apresentou cargas negativas para Fe, As, Mn e Cd, mostrado na figura 5.19, sugerindo um comportamento geoquímico distinto. Esses elementos estão associados a processos redox e de adsorção em óxidos e hidróxidos de ferro e manganês, que afetam diretamente sua mobilidade e disponibilidade. Esses resultados corroboram com a distribuição espacial destes elementos, que

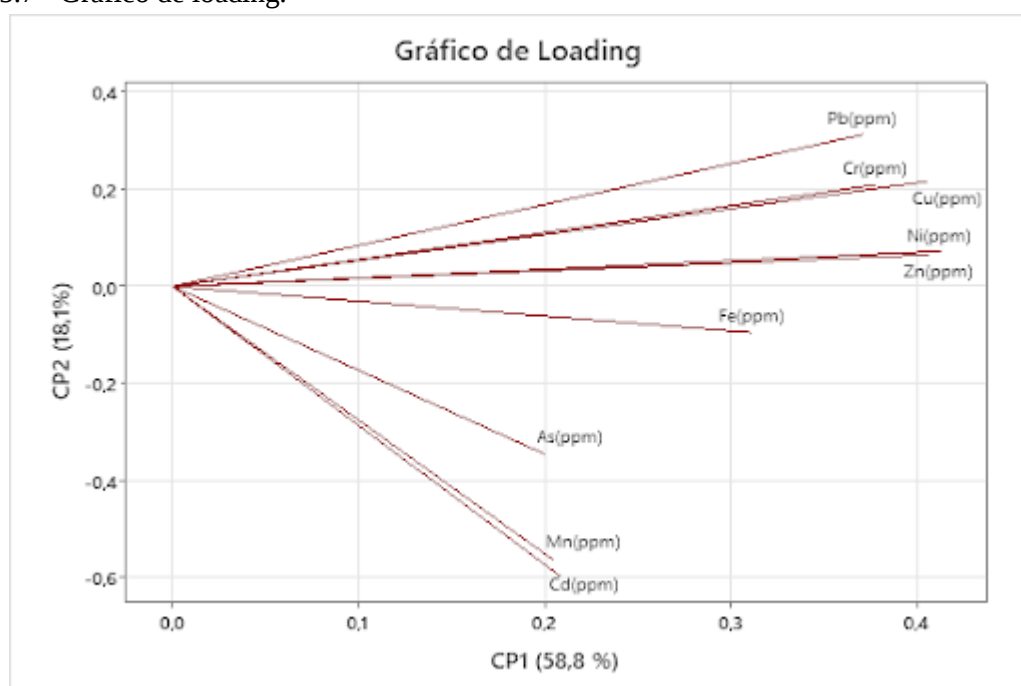
geralmente, as maiores concentrações estão próximas ou a jusante de uma área de mineração. O agrupamento desses elementos no CP2 também auxilia na explicação dos índices ambientais, As, Cd e Mn apresentaram os maiores valores de enriquecimento nas mesmas amostras e áreas de contaminação semelhantes, reforçando sua sensibilidade às condições físico-químicas do meio.

Tabela 5.19 - Tabela com os componentes PCA.

Elementos	Matriz de componentes	
	CP 1	CP 2
As	0,2	-0,345
Cd	0,208	-0,597
Cr	0,378	0,209
Cu	0,405	0,216
Fe	0,311	-0,095
Mn	0,205	-0,564
Ni	0,412	0,072
Pb	0,371	0,312
Zn	0,406	0,065
Autovalores iniciais	5,2948	1,628
% de variância	58,8 %	18,1 %
% cumulativo	58,8 %	76,9 %

Fonte: Elaborado pelo autor com a utilização do software Minitab.

Figure 5.7 - Gráfico de loading.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em síntese, a análise multivariada não apenas validou os padrões espaciais e os índices de contaminação previamente identificados, mas também forneceu uma visão integrada dos

processos geoquímicos atuantes na bacia. A PCA evidenciou a coexistência de um controle litológico predominante para a maioria dos elementos traço e um controle ambiental e antrópico para elementos mais móveis e tóxicos, como As e Cd, subsidiando assim a identificação de áreas prioritárias para monitoramento e gestão ambiental.

5.5 Classificação segundo a CONAMA 454/12

A Resolução CONAMA nº 454, de 01 de novembro de 2012, estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental do material a ser dragado em corpos hídricos sob jurisdição nacional. Dentre seus principais instrumentos, estão os valores orientadores, observados na tabela 5.19, para avaliação da qualidade dos sedimentos com base em concentrações de substâncias químicas, organizados em nível 1, limite abaixo do qual efeitos tóxicos são improváveis (TEL - Threshold Effect Level), e nível 2, limite acima do qual efeitos tóxicos são prováveis (PEL - Probable Effect Level), exigindo atenção especial para possíveis impactos ecológicos. Com base nesses níveis de qualidade, os sedimentos podem ser classificados nas seguintes categorias:

- Classe 1: Concentrações < nível 1, sedimento não contaminado.
- Classe 2: Concentrações entre os níveis 1 e 2, potencial de contaminação moderado.
- Classe 3: Concentrações > nível 2, sedimento contaminado.

Tabela 5.20 - Tabela com níveis de classificação do material a ser dragado em água doce segundo a resolução CONAMA 454/12.

Elementos	Níveis de classificação	
	Nível 1	Nível 2
Arsênio (As)	5,9	17
Cádmio (Cd)	0,6	3,5
Chumbo (Pb)	35	91,3

Cobre (Cu)	35,7	197
Cromo (Cr)	37,3	90
Níquel (Ni)	18	35,9
Zinco (Zn)	123	315

A aplicação dessa norma à sub-bacia do rio Maranhão permitiu avaliar a qualidade ambiental dos sedimentos fluviais com base nas concentrações de arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), chumbo (Pb), níquel (Ni) e zinco (Zn). Os resultados mostraram padrões diferenciados entre os elementos, revelando áreas de baixa, moderada e alta contaminação. Os dados foram classificados com base nos limites estabelecidos pela resolução, como é observado na tabela 5.20.

Tabela 5.21 - Tabela de classificação da qualidade dos sedimentos para elementos traço segundo a resolução CONAMA 454/12.

Elementos	Quantidade de amostras em cada classe (Percentual)		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
As	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Cd	17 (26,5%)	26 (40,5%)	21 (33%)
Cr	62 (97%)	2 (3%)	0 (0%)

Cu	12 (19%)	13 (20%)	39 (61%)
Ni	30 (47%)	34 (53%)	0 (0%)
Pb	23 (36%)	20 (31%)	21 (33%)
Zn	61 (95%)	3 (5%)	0 (0%)

Como visto na tabela 5.20, O arsênio (As), o cromo (Cr) e o níquel (Ni) apresentaram os maiores índices de contaminação, com mais de 60% das amostras classificadas nas classes 2 e 3, ou seja, com teores acima do valor de referência de qualidade (Nível 1). Esses elementos exibiram também elevadas proporções de amostras na Classe 3, o que indica uma probabilidade significativa de efeitos adversos à biota bentônica. O Cromo, apresentou os valores mais preocupantes, sendo que de 80% das amostras apresentaram algum grau de contaminação, sendo 61% na Classe 3. O Cobre apresentou um comportamento difuso, com 53% das amostras acima do nível 1, mas nenhuma amostra ultrapassou o nível 2. A ausência de níveis críticos sugere que o Cu não representa um risco elevado, embora deva ser acompanhado em função de sua persistência no ambiente.

Já os demais elementos, cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zn) apresentaram os melhores indicadores de qualidade ambiental, com mais de 90% das amostras classificadas como Classe 1, ou seja, com concentrações abaixo do Nível 1. Esse resultado indica que esses elementos não representam uma preocupação ambiental significativa para os sedimentos da sub-bacia, exceto por pontos isolados com teores ligeiramente acima dos valores de referência.

Um aspecto que vale ressaltar, é que mesmo quando as concentrações de arsênio e cádmio estavam abaixo dos limites legais, os índices ambientais indicaram possibilidade de impacto para o meio, ou seja, estar dentro dos limites estabelecidos não significa ausência de risco. Além de não apresentarem valores previamente estabelecidos para outros elementos. Esse contraste reforça a importância de utilizar não apenas a legislação, como também índices ambientais calculados a partir do background regional, que oferecem uma visão mais detalhada sobre os potenciais impactos ambientais

6 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho indicam que a qualidade geoquímica dos sedimentos da sub-bacia do rio Maranhão reflete uma interação significativa entre os controles geológicos e os impactos de atividades antrópicas, em especial aquelas associadas à mineração e à siderurgia. A distribuição espacial dos elementos analisados, bem como os resultados estatísticos e dos índices aplicados, permitiu delimitar áreas críticas com potencial de risco ecológico elevado.

A aplicação dos índices de fator de enriquecimento (FE), fator de contaminação (FC), Índice de risco ecológico potencial individual (Er) e índice de risco ecológico (RI), aliados à comparação com os valores estabelecidos pelas diretrizes de qualidade sedimentar, permitiu avaliar de forma integrada os potenciais riscos ao meio.

Os elementos como arsênio (As) e cádmio (Cd) se destacam por apresentarem os maiores valores de fator de enriquecimento (FE) e fator de contaminação (FC), frequentemente superiores aos limiares de contaminação moderada ou considerável, representando risco ecológico potencial ao ambiente, conforme apontado pelos índices de risco ecológico individual (Er) e pelo índice de risco ecológico (RI). Esse cenário ocorre em áreas de intensa exploração mineral, onde a mobilização e exposição de rochas portadores desses elementos ocorre de forma mais acentuada. Os elementos cromo (Cr) e níquel (Ni) excederam os limites de efeito provável (PEC) em parte significativa das amostras, apesar de não apresentarem elevados valores de índices ambientais. Ademais, os métodos estatísticos e a distribuição espacial apontaram que Cr e Ni apresentam um controle litológico.

Embora elementos como ferro (Fe) e manganês (Mn) apresentem elevadas concentrações na região, frequentemente com fatores de enriquecimento (FE) superiores a 10, tais valores são compatíveis com a geologia do Quadrilátero Ferrífero, sendo predominantemente de origem natural e associado a formações ferríferas. No entanto, as atividades de exploração mineral intensificam o aporte sedimentar destes elementos, resultando em locais com contaminações elevadas. Por outro lado, elementos como chumbo (Pb), zinco (Zn) e cobre (Cu) apresentaram baixos índices de contaminação e não ultrapassaram os valores de referência para efeitos adversos, indicando baixa influência antrópica sobre sua distribuição.

A distribuição espacial dos elementos, representada por meio de mapas temáticos em ambiente SIG, permitiu identificar áreas críticas e reforçou a importância da integração entre ferramentas estatísticas, geoquímicas e geoespaciais para o diagnóstico ambiental em bacias submetidas à pressão antrópica. Conclui-se que, embora parte das concentrações elevadas seja compatível com a geologia da região, a magnitude e frequência das anomalias apontam para

um cenário de risco ecológico moderado a elevado em determinadas áreas da sub-bacia do rio Maranhão. Tais evidências reforçam a necessidade de monitoramento contínuo, recuperação de áreas degradadas e estabelecimento de estratégias de gestão ambiental para minimizar os impactos sobre os recursos hídricos e os ecossistemas locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. S. **Caracterização geoquímica dos solos e sedimentos da bacia do Rio Piracicaba (Quadrilátero Ferrífero)**. 2024. 83 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.
- ÁVILA, C. A. *et al.* Rhyacian (2.23–2.20 Ga) **juvenile accretion in the southern São Francisco craton, Brazil: geochemical and isotopic evidence from the Serrinha magmatic suite, Mineiro belt**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 29, n. 2, p. 464–482, mar. 2010.
- BALTAZAR, O. F. *et al.* Mapa geológico de Itabirito, escala 1:50.000 – Nota explicativa. In: LOBATO, L. M. *et al.* (org.). **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero: integração e correção cartográfica em SIG com nota explicativa**. Belo Horizonte: CODEMIG/UFMG, 2005. 1 CD-ROM.
- BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; MATSCHULLAT, J. **Geochemical distribution of arsenic in waters, sediments and weathered gold mineralized rocks from Iron Quadrangle, Brazil**. *Environmental Geology*, v. 44, n. 1, p. 39–52, jun. 2003.
- CANDIA, M. A. F.; GIRARDI, V. A. V. **Aspectos metamórficos da Formação Lafaiete em Morro da Mina, Distrito de Lafaiete, MG**. *Boletim do Instituto de Geociências, São Paulo*, v. 10, p. 19–30, 1979.
- CAVALCANTI, J. A. D. *et al.* **Carta geológica e de recursos minerais da porção central do Supergrupo Rio das Velhas – Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2016.
- COSTA, M. T.; BRANCO, J. J. R. Introdução. In: BRANCO, J. J. R. (org.). **Roteiro para excursão Belo Horizonte–Brasília**. Belo Horizonte: SBG/Congresso Brasileiro de Geologia, 15., 1961. p. 1–119.
- COSTA, R. de V. F. da *et al.* **Geochemical mapping of arsenic in surface waters and stream sediments of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil**. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 68, n. 1, p. 43-51, jan./mar. 2015.
- COSTA, R. de V. F. da. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. 185 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- DORR II, J. V. N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Washington: USGS/DNPM, 1969. 110 p. (Professional Paper, 641-A).

EMBRAPA – **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

ENDO, I. *et al.* **Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. Escala 1:150.000. Ouro Preto: Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP; Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, 2019.

ENDO, I.; CASTRO, P. T. A.; GANDINI, A. L. **Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos**. Belo Horizonte: 3i Editora, 2019. 480 p.

HAKANSON, L. **An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach**. Water Research, v. 14, p. 975–1001, 1980.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão de Águas. **Séries históricas de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Repositório Institucional, 2022.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão de Águas. **Sub-projeto 3.1 – Estudo de viabilidade de implementação de agência de bacia na sub-bacia do Rio Maranhão-MG**: resumo executivo final. [S. l.]: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003.

IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. WebGIS. 2017. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: jan. 2025.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Alto Rio Paraopeba – CH SF3: panorama da qualidade das águas superficiais** – 2022. Belo Horizonte: IGAM, 2023. 1 mapa, color. Escala 1:1.000.000.

JUSTO, A. P. **As formações ferríferas bandadas (BIFs) e a evolução paleoambiental e geodinâmica da Bacia de Carajás**. 2018. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

KARLSSON, K.; WESTERLUND, C. **A geochemical survey in Peti Alke, Minas Gerais, Brazil**. 2002. 168 p. Master's thesis – Department of Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, 2002.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Laboratório de Geomatemática, 2000. 20 p. (Texto Didático, 02).

LARIZZATTI, J. H.; MARQUES, E. D.; SILVEIRA, F. V. **Mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno**. Rio de Janeiro: CPRM, 2014. 208 p.

LEÃO, L. P. *et al.* **Distribution and assessment of trace elements contamination in sediments of Conceição River Basin, Brazil**. Geosciences, v. 11, p. 236, 2021.

LEÃO, L. P. **Mapeamento geoquímico de sedimentos fluviais: diferentes métodos e suas aplicações ambientais**. 2019. 185 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

MAPA, F. B. **Geoquímica multielementar de sedimentos de corrente no estado de São Paulo: abordagem através da análise estatística multivariada**. 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MATOS, F.; DIAS, R. **A gestão dos recursos hídricos em MG e a situação da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba**. *Gestão & Regionalidade*, v. 28, n. 83, 2012.

MATSCHULLAT, J. *et al.* **Human and environmental contamination in the Iron Quadrangle, Brazil**. *Applied Geochemistry*, v. 15, p. 181–190, 2000.

MARTINS, L. A. **Aspectos de campo, petrográficos, química mineral, litogeoquímica, geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm-Nd de tonalitos paleoproterozóicos da porção setentrional da Suíte Alto Maranhão, Minas Gerais**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

MARTINS, F. B. *et al.* **Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras**. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, 2018.

NASCIMENTO, L. P. do *et al.* **Avaliação geoquímica de metais em sistemas fluviais afetados por atividades antrópicas no Quadrilátero Ferrífero**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 767–778, jul./ago. 2018.

NOCE, C. M. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 1995. 128 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

PARRA, R. R. **Análise geoquímica de água e de sedimento afetados por minerações na bacia hidrográfica do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. 2006. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

PEIXOTO, F. R. M. **Avaliação da qualidade dos sedimentos fluviais da Bacia do Rio Piranga, MG**. 2022. 74 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRETT, R. G. **Background and threshold: critical comparison of methods of determination**. *Science of the Total Environment*, v. 346, p. 1–16, 2005.

RODRIGUES, A.; NALINI, H. **Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 2, 2009.

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. **O Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados.** Revista Geonomos, v. 18, n. 1, p. 33–37, 2010.

ROSIÈRE, C. A.; RIOS, F. J. **The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: the example of the Conceição Mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil.** Economic Geology, v. 99, n. 9, p. 611–624, 2004.

ROTTA, L. H. S. *et al.* **The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 90, art. 102119, 2020.

SEIXAS, L. A. R. *et al.* **Petrology of the high-Mg tonalites and dioritic enclaves of the ca. 2130 Ma Alto Maranhão suite: evidence for a major juvenile crustal addition event during the Rhyacian orogenesis, Mineiro Belt, southeast Brazil.** Precambrian Research, v. 238, p. 18–41, 2013.

SUTHERLAND, R. A. **Bed sediment associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii.** Environmental Geology, v. 39, p. 611–627, 2000.

TEIXEIRA, W. *et al.* **A juvenile accretion episode (2.35–2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: zircon U–Pb–Hf and geochemical evidences.** Precambrian Research, v. 256, p. 148–169, 2015.

TOLEDO, C. L. B. **Evolução geológica das rochas máficas e ultramáficas no Greenstone Belt Barbacena, região de Nazareno, MG.** 2002. 307 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis.** Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1977. 688 p.

VICQ, R. *et al.* **Geochemical mapping and reference values of potentially toxic elements in a contaminated mining region: upper Velhas River Basin stream sediments, Iron Quadrangle, Brazil.** Minerals, v. 13, art. 1545, 2023.

ANEXOS

Concentração dos elementos analisados, modificado de Larizzatti *et al* 2014.

Coordenadas		Concentração dos elementos analisados									
Long__X__	Lat__Y__	Cu (PPM)	Pb (PPM)	Zn (PPM)	Ni (PPM)	Mn (PPM)	Fe (PPM)	As (PPM)	Cd (PPM)	Cr (PPM)	Al (PPM)
622430	7728661	0,009	0,01	0,085	0,085	606	100	14,9	0,06	0,5	85
621498	7739400	2,93	4,77	8,7	3	774	310200	5,2	0,06	7,4	1400
621329	7734674	4,16	4,5	8,2	3,7	1000	218500	5,1	0,05	9,3	2200
617512	7737985	2,01	4,04	1,7	1,2	21	2400	0,4	0,01	3,2	2500
611970	7731872	9,51	4,37	10,2	8,5	650	279300	4,5	0,03	17,2	4000
618124	7734892	12,89	4,95	14,6	9,9	1638	152900	8,5	0,05	24,2	4200
617512	7737985	15,4	5,09	16,2	11,1	1538	182900	7,8	0,06	18,9	5200
610809	7730122	116,28	12,37	39,9	36,7	415	86800	137,7	0,09	119,4	5300
617687	7738315	17,91	5,96	19,6	12,3	2021	189000	8,9	0,09	21,9	6200
638408	7731047	12,51	10,31	11	7,8	700	22100	4,4	0,01	73,9	6500
626877	7732717	18,5	6,81	16,9	18,3	1704	160900	5,1	0,04	57,6	6500
612376	7732082	54,83	13,46	38	122,6	2382	232700	72,4	0,09	308,7	7500
629410	7723817	35,92	11,52	26,2	35,9	325	49300	22,1	0,03	128,2	9400
621700	7739320	10,38	4,59	8,4	2,5	292	15100	0,6	0,01	9,2	9800
621700	7739320	9,52	8,25	12,9	7,4	2130	282200	6,7	0,07	29,2	9800
617997	7736978	21,7	10,64	20,6	15	4213	177900	26	0,11	50,4	10300
611043	7730998	87,04	10,03	31,2	28	384	83000	105,8	0,12	117,2	10800
626877	7732717	31,71	18,09	74,3	101,9	334	55600	92,6	0,06	204,3	11600
632703	7718883	39,17	13,61	50,4	37,4	475	37400	40,1	0,05	172,6	13300
627183	7726451	64,22	21,18	54,8	68,7	1294	87600	31,2	0,08	203,2	13800
623418	7731757	38,53	15,81	29,4	25,6	669	46000	12	0,03	95,1	14300
629713	7729494	99,35	55,42	236,1	44,3	2940	111200	11	0,17	141,2	14500
630010	7724053	55,84	14,16	40,6	67,6	1125	77900	14	0,05	185,7	15000
625138	7728920	57,38	21,35	111	34,2	820	62300	9,4	0,07	117,3	16700
613336	7732470	38,12	20,01	387,4	45,9	20000	256100	19,9	0,82	46,9	16800
628070	7722269	35,01	12,3	61,7	34	437	34300	10,5	0,03	104,9	17300
627409	7725726	51,01	17,56	49,9	47,5	1670	71500	24,1	0,08	154,5	17400
624161	7725380	40,66	13,43	38,6	39,4	528	43900	4,6	0,04	126,3	17600
634746	7731958	25,6	16,07	25,8	17,6	1142	45300	8,8	0,03	132,7	17800

625138	7728920	62,85	25,16	120	38,6	948	65800	9,4	0,04	136,8	18300
628070	7722269	37,75	13,37	64,7	35,6	429	37100	11,1	0,05	108	18900
634789	7716920	9,92	6,76	15,8	9,2	796	21900	11,9	0,02	63,9	20200
636338	7713117	53,11	12,35	37,8	21,7	1523	52400	14,9	0,03	102,2	21500
632110	7717592	15,14	15,36	17,7	10,6	1088	38900	9,9	0,03	66,1	22900
627363	7704049	18,15	13,95	30,5	8	605	27400	1	0,03	31,9	23800
626980	7722343	57,71	20,77	53,6	38,8	877	121700	24,5	0,06	144	24100
621389	7734838	43,68	11,76	33,8	29	649	66900	10,4	0,05	90,2	24200
629297	7718382	68,04	23,58	102,4	100,6	5040	37700	29,2	1,34	104	24300
623627	7721307	51,52	15,25	45,1	20,6	735	84800	11,1	0,12	74,1	25100
619396	7730316	79,5	12,08	64	37	2064	68600	43,5	0,07	118,1	25100
635248	7717596	27,8	13,34	21,5	23	687	39400	25,1	0,04	124,7	27000
625583	7723202	56,13	23,25	180,7	61,6	1868	82800	2,3	0,05	118,7	27200
623162	7724706	53,02	35,63	42,3	76,3	1852	72500	7,7	0,07	279	27600
634806	7724784	38,17	10,68	24,4	14,8	736	56400	4	0,03	128,7	27600
626932	7709361	26,84	11,31	22,7	16,1	426	41900	4,8	0,02	103,5	28400
631654	7718909	19,7	15,47	23	13,9	494	31400	24,4	0,02	83,1	28500
623743	7710229	21,93	17,55	31	23,2	309	35900	2,9	0,03	78,1	29200
622391	7719321	196,13	38,49	112,4	34,9	1836	105300	4,5	0,09	110,5	31000
640055	7726156	46,65	8,8	44,5	40	1016	69600	12,1	0,03	188,7	32800
628719	7719286	24,43	20,75	20,6	9,1	310	43200	24,5	0,04	48,3	32900
632328	7711947	17,15	24,76	25,8	7,9	753	25400	3,1	0,07	38,1	35000
622430	7728661	54,63	21,4	54,1	63,9	702	69800	14,3	0,05	168,7	35000
614436	7730680	74,56	15,54	41,2	30,4	500	69600	8,2	0,07	129,7	35100
633937	7712193	45,63	12,71	33,3	20,7	1843	59900	17,8	0,04	82	38200
635941	7723659	44,14	14,03	28,2	34	2344	96100	6,2	0,04	278	40800
633444	7729940	70,06	34,54	61,2	31	864	119800	8	0,05	230,1	41300
637533	7718782	46,59	11,26	28,5	36,8	680	109800	21,3	0,04	245,5	42200
628220	7708214	33,52	17,57	30	26,3	54	18900	8,4	0,03	104,3	45300
637533	7718782	51,46	12,01	30,1	38,3	541	113800	22,4	0,03	253,4	47700
633954	7722829	55,46	16,53	29,9	24,2	519	96000	52,5	0,06	151,4	48000
627234	7706611	20,81	16,94	21,4	15	185	32600	1,7	0,01	63	48400
636440	7716800	25,43	18	32,8	18,5	1012	67300	40,2	0,03	149,1	54400
632534	7717329	19,04	16,75	23,4	39,7	860	63100	16,7	0,13	293,5	61700
631857	7711979	10,03	9,82	9,2	3,6	117	40600	5,8	0,01	35,2	80100