



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



ÁLVARO TARGON DA SILVA RIBEIRO FELIPE

MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DOS SOLOS DA BACIA DO RIO
PARAOPEBA, MG

Ouro Preto
2026

Álvaro Targon da Silva Ribeiro Felipe

**MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DOS SOLOS DA BACIA DO RIO
PARAOPEBA, MG**

Monografia apresentada ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto como pré-requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Geológica.

Orientador: Prof.º Dr.º Lucas Pereira Leão
Coorientador: Dr. º Eduardo Duarte Marques

Ouro Preto
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F315m Felipe, Álvaro Targon da Silva Ribeiro.

Mapeamento geoquímico dos solos da bacia do rio Paraopeba, MG.
[manuscrito] / Álvaro Targon da Silva Ribeiro Felipe. - 2026.
89 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Pereira Leão.

Coorientador: Dr. Eduardo Duarte Marques.

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

1. Solos - Formação. 2. Bacias hidrográficas. 3. Geoquímica. 4. Desenvolvimento sustentável. I. Leão, Lucas Pereira. II. Marques, Eduardo Duarte. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.46(815.1)

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

Álvaro Targon da Silva Ribeiro Felipe

Mapeamento geoquímico dos solos da bacia do rio Paraopeba, MG

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 24 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr - Lucas Pereira Leão - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
Dra - Adivane Terezinha Costa - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr- Raphael de Vicq Ferreira da Costa - Universidade do Minho, Portugal

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 01/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Pereira Leão, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/03/2026, às 07:09, 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 **1067453** e o código CRC **431AA5EB**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Wellington e Silvia por fazerem o possível e sempre acreditarem na minha educação. Obrigado também Maísa, por me dar forças em momentos que não acreditei em mim, você me lembrou quem sou e me acolheu assim. Obrigado SGA e obrigado Galdino pelo companheirismo acadêmico e profissional. Agradeço de coração ao grande Pantera, que forjou este jovem geólogo a base de um bom churrasco, cerveja gelada e boas risadas. Obrigado Lucas, Varejão, João e Isaac pela oportunidade de pesquisa, fomentar minha curiosidade e fundamentar o meu DNA como pesquisador. Olho para trás e vejo o Alvinho de 8 anos de idade vendo Homem-Aranha 1 e disparando para sua mãe sobre Peter Parker, logo na primeira cena, “o que ele é mãe?”, e ela respondendo “pesquisador meu filho”. Essa criança está orgulhosa.

Carlos Eduardo, Gabriel, Lucas, Danilo e Matheus, obrigado por tornarem Ouro Preto um lar, envelhecer sem perder a ternura. São as malditas trincheiras. Alemão, Cantoneira, Daniel, Davi, Joaca, Lettícia, Lucca, Marcola, Tati obrigado por sempre acreditarem em mim, jamais teria conseguido escrever esses agradecimentos sem vocês, jamais esquecerei. Aos amigos de infância Jony, Gui, Vala e Mickey, tempo vai, tempo vem, e é um prazer envelhecer com vocês.

A todos os brindes que foram realizados, nenhum foi em vão, brindar-nos-emos, muito mais que um dedo de cachaça, à vida, à educação, à Minas Gerais, à cultura, ao amor, ao mundo e, por fim, ao *rock n' roll*.

The world is, the world is, love and life are deep, maybe as his skies are wide.

“Ao tentar observar a folha, não verá a árvore. Ao tentar observar a árvore, não verá a floresta. Enxergue o todo em sua plenitude, sem se esforçar.”
Vagabond.

RESUMO

O mapeamento geoquímico via coleta de solos é um dos métodos de investigação mais completos para contribuir para o tripé do desenvolvimento sustentável (desenvolvimento ambiental, social e econômico) (YOUSEFI *et al.*, 2013). A utilização de amostras de solo, se justifica pela representatividade do material acumulado no horizonte B em relação à rocha mãe. A bacia hidrográfica do rio Paraopeba, localizada no Quadrilátero Ferrífero (MG), é uma região historicamente associada à mineração e à industrialização, apresentando significativa influência antrópica. Este trabalho tem como objetivo o mapeamento geoquímico dos solos da bacia a partir dos dados coletados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) ao longo de 2008 e 2009, determinando os valores de *background* geoquímico para os elementos Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn. Mapas geoquímicos foram confeccionados por meio da utilização do *software* Qgis 3.34 através da técnica IDW (*Inverse Distance Weighted*). Para tal, foram selecionadas 256 amostras de solo coletadas na região do alto e médio Paraopeba, com base no mapeamento geoquímico realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Os dados foram tratados estatisticamente e por meio da técnica "*Boxplot Upper Inner Fence* (UIF)" foram determinados os valores de *background* geoquímico bem como a identificação das anomalias geoquímicas. Os valores de *background* variaram nos seguintes intervalos: As, de 1,00 a 4,00 ppm; Cr, de 9,10 a 95,70 ppm; e Ni, de 3,40 a 16,60 ppm. As anomalias foram definidas como valores superiores a: 10,75 ppm para As; 225,60 ppm para Cr; e 36,40 ppm para Ni. Os resultados foram comparados com a legislação nacional (CONAMA 420/2009) indicando que, principalmente esses elementos, apresentam violações dos Valores de Investigação em todos os níveis (Agrícola, Residencial e Industrial) estipulado em norma. Ademais, as anomalias geoquímicas estão associadas a litologias específicas para cada elemento, referentes aos Complexos Ígneos-Metamórficos, aos supergrupos Rio das Velhas e Minas, aos grupos Itacolomi e Barbacena e, em alguns casos, à atividade antrópica. O trabalho também integra geologia, pedologia, geoquímica e uso e ocupação do solo, evidenciando como todos esses fatores estão intrinsecamente relacionados e sua influência na bacia. Esse conhecimento é fundamental não apenas a fins acadêmicos como o auxílio de estudos futuros sobre a qualidade ambiental da região, como também para a elaboração de futuras políticas ambientais que garantam a devida atenção a esta bacia portadora de um legado histórico-cultural de primazia para Minas Gerais.

Palavras-chave: Mapeamento geoquímico, anomalias, *background*, solo, pedogênese, bacia hidrográfica do Rio Paraopeba, CONAMA 420/2009.

ABSTRACT

Geochemical mapping through soil collection is one of the most comprehensive investigation methods for contributing to the three pillars of sustainable development (environmental, social, and economic development) (YOUSEFI et al., 2013). The use of soil samples is justified by the representativeness of the material accumulated in the B horizon concerning the parent rock. The Paraopeba River basin, located in the Iron Quadrangle (Minas Gerais state), is a region historically associated with mining and industrialization, presenting significant anthropogenic influence. This study aims to carry out the geochemical mapping of soils in the basin using data collected by the Geological Survey of Brazil (CPRM) throughout 2008 and 2009, determining the geochemical background values for the elements Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, and Zn. Geochemical maps were created using Qgis 3.34 software through the IDW (Inverse Distance Weighted) technique. For this purpose, 256 soil samples collected in the upper and middle Paraopeba region were selected, based on the geochemical mapping conducted by the Geological Survey of Brazil (CPRM). The data were statistically treated, and the geochemical background values, as well as the identification of geochemical anomalies, were determined using the "Boxplot Upper Inner Fence (UIF)" technique. The background values varied within the following ranges: As, from 1.00 to 4.00 ppm; Cr, from 9.10 to 95.70 ppm; and Ni, from 3.40 to 16.60 ppm. Anomalies were defined as values exceeding: 10.75 ppm for As; 225.60 ppm for Cr; and 36.40 ppm for Ni. The results were compared with national legislation (CONAMA 420/2009), indicating that, mainly these elements, present violations of the Investigation Values at all levels (Agricultural, Residential, and Industrial) stipulated in the regulation. Furthermore, the geochemical anomalies are associated with specific lithologies for each element, related to the Igneous-Metamorphic Complexes, the Rio das Velhas and Minas supergroups, the Itacolomi and Barbacena groups, and, in some cases, to anthropogenic activity. The work also integrates geology, pedology, geochemistry, and land use and occupation, evidencing how all these factors are intrinsically related and their influence on the basin. This knowledge is fundamental not only for academic purposes, such as aiding future studies on the environmental quality of the region, but also for the development of future environmental policies that ensure due attention to this basin, which carries a historical-cultural legacy of primacy for Minas Gerais.

Keywords: Geochemical mapping, anomalies, background, soil, pedogenesis, Paraopeba River basin, CONAMA 420/2009.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.	5
Figura 2 - Mapa geológico da Bacia do Paraopeba.	6
Figura 3 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.	8
Figura 4 - Mapa geológico de detalhe do Cinturão Mineiro.	10
Figura 5 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.	12
Figura 6 - Mapa hipsométrico da BHRP.	13
Figura 7 - Mapa de declividade da BHRP.	14
Figura 8 - Mapa pedológico da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	16
Figura 9 - Mapa de uso e ocupação da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.	19
Figura 10 - Modelo representativo de diferentes produtos para o intemperismo físico (fragmentação mecânica) e intemperismo químico (alteração química e solução).	21
Figura 11 - Diagrama de estabilidade mineral ao intemperismo em comparação a Série de Goldich e Série de Bowen.	22
Figura 12 - Perfil de alteração esquemático.	23
Figura 13 - Gráfico de <i>boxplot</i> para a concentração de um elemento químico.	25
Figura 14 - Mapa da densidade amostral das coletas de solo realizados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.	30
Figura 15 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de alumínio.	35
Figura 16 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de alumínio.	36
Figura 17 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do alumínio em partes por milhão.	37
Figura 18 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de arsênio. Triângulos representam as anomalias.	38
Figura 19 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de arsênio.	39
Figura 20 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do arsênio em partes por milhão.	40
Figura 21 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de cádmio. Triângulos representam as anomalias.	41
Figura 22 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de cádmio.	42
Figura 23 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do cádmio em partes por milhão.	43
Figura 24 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de chumbo. Triângulos representam as anomalias.	44
Figura 25 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de chumbo.	45
Figura 26 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do chumbo em partes por milhão.	46

Figura 27 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de cobre. Triângulos representam as anomalias.	47
Figura 28 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de cobre.	48
Figura 29 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do cobre em partes por milhão.	49
Figura 30 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de cromo. Triângulos representam as anomalias.	50
Figura 31 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de cromo.	51
Figura 32 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do cromo em partes por milhão.	52
Figura 33 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de ferro. Triângulos representam as anomalias.	53
Figura 34 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de ferro.	54
Figura 35 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do ferro em partes por milhão.	55
Figura 36 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de manganês. Triângulos representam as anomalias.	56
Figura 37 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de manganês.	57
Figura 38 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do manganês em partes por milhão.	58
Figura 39 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de mercúrio. Triângulos representam as anomalias.	59
Figura 40 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de mercúrio.	60
Figura 41 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do mercúrio em partes por milhão.	61
Figura 42 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de níquel. Triângulos representam as anomalias.	62
Figura 43 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de níquel.	63
Figura 44 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do níquel em partes por milhão.	64
Figura 45 - Gráfico <i>boxplot</i> para concentração de zinco. Triângulos representam as anomalias.	65
Figura 46 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de zinco.	66
Figura 47 - Mapa do <i>background</i> geoquímico do zinco em partes por milhão.	67
Figura 48 - Mapa das concentrações de As que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.	73
Figura 49 - Mapa das concentrações de Cr que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.	74
Figura 50 - Mapa das concentrações de Cu que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.	75

Figura 51 - Mapa das concentrações de Ni que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.	76
Figura 52 - Mapa das concentrações de Pb que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.	77
Figura 53 - Mapa das concentrações de Zn que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela com as unidades do Quadrilátero Ferrífero presentes na área de estudo.....	7
Tabela 2 - Tabela com a classe de solos e suas respectivas áreas e porcentagens da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.....	15
Tabela 3 - Tabela com o cálculo do uso e ocupação de área para cada atividade da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.	18
Tabela 4 - Classes de mapeamento geoquímico de acordo com as escalas, grid de amostragem.	27
Tabela 5 – Parâmetros estatísticos dos elementos estudados na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.....	34
Tabela 6 - Tabela com o percentual de valores anômalos relativos de cada unidade.	68
Tabela 7 – Valores orientadores de referência (VOR) de cada elemento, conforme a CONAMA 420/2009, e valores em % de cada classe.....	72

LISTA DE SIGLAS

BHRP: Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.
CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil).
EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IDW: *Inverse Distance Weighted* (Interpolação por Ponderação Inversa da Distância).
IGAM: Instituto Mineiro de Gestão das Águas.
IQR: *Interquartile Range* (Intervalo Interquartil).
MDE: Modelo Digital de Elevação.
QF: Quadrilátero Ferrífero.
SBCS: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.
SISEMA: Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais.
TIF: *Tukey Inner Fence* (Método estatístico para determinação de *background*).
TTG: Tonalitos-Trondhjemitos-Granodioritos (Associação de rochas ígneas arqueanas).
UIF: *Upper Inner Fence* (Limite superior interno em *boxplots*).
VOR: Valores Orientadores de Referência.
VP: Valores de Prevenção.
VI: Valores de Investigação.
VIA: Valores de Investigação Agrícola.
VIR: Valores de Investigação Residencial.
VII: Valores de Investigação Industrial.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS E METAS.....	2
1.3	JUSTIFICATIVA	3
2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
2.1	LOCALIZAÇÃO	4
2.2	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
2.2.1	Cinturão Mineiro	9
2.2.2	Quadrilátero Ferrífero.....	10
2.3	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	12
2.3.1	Clima	12
2.3.2	Relevo.....	12
2.3.3	Solos	14
2.3.4	Uso e Ocupação do Solo.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	FORMAÇÃO DOS SOLOS.....	20
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS HORIZONTE SDOS SOLOS.....	22
3.3	<i>BACKGROUND</i> GEOQUÍMICO	23
3.3.1	Método de Tukey <i>Inner Fence</i> (TIF).....	24
3.4	MAPEAMENTO GEOQUÍMICO	25
4	METODOLOGIA	28
4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
4.2	LEVANTAMENTO DE DADOS.....	28
4.2.1	Base Cartográfica	29
4.2.2	Dados Geoquímicos.....	29
4.3	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	30
4.3.1	Análise univariada	31
4.3.2	Cálculo dos valores de referência (<i>Background</i> geoquímico).....	31
4.3.3	Legislação Vigente	32
4.3.4	Representação Espacial dos Dados.....	32

5	RESULTADOS.....	34
5.1	ALUMÍNIO	34
5.2	ARSÊNIO	38
5.3	CÁDMIO	41
5.4	CHUMBO	44
5.5	COBRE	47
5.6	CROMO	50
5.7	FERRO.....	53
5.8	MANGANÊS.....	56
5.9	MERCÚRIO	59
5.10	NÍQUEL	62
5.11	ZINCO	65
6	DISCUSSÕES.....	68
6.1	INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA-GEOQUÍMICA	68
6.2	COMPARAÇÃO COM A CONAMA 420/2009	71
6.2.1	Arsênio	73
6.2.2	Cromo	74
6.2.3	Cobre	75
6.2.4	Níquel	76
6.2.5	Chumbo	77
6.2.6	Zinco.....	78
7	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Conforme destacado por DARNLEY *et al.* (1995) e VIVO *et al.* (2003), o mapeamento geoquímico constitui o método mais adequado para a representação da distribuição espacial de determinados elementos químicos, bem como para o monitoramento da evolução temporal de seus teores, seja a partir de amostras de sedimentos, solos ou águas. Mais recentemente, essa técnica tem adquirido crescente relevância como uma importante ferramenta em estudos ambientais, especialmente no monitoramento de impactos ambientais, uma vez que permite distinguir a influência de fatores geogênicos daquela associada às atividades antrópicas nas concentrações dos elementos químicos analisados (ALBANESE *et al.*, 2007). A aplicabilidade do mapeamento geoquímico não se limita apenas ao uso ambiental, tendo aplicação também para a prospecção mineral, segmento de grande importância econômica para a sociedade (MESQUITA *et al.*, 2016). A identificação de anomalias de determinados elementos pode indicar a possibilidade de jazimentos minerais ou atividades antrópicas (LICHT, 1998). O mapeamento geoquímico aplicado a bacias hidrográficas, portanto, é capaz de contribuir para o tripé do desenvolvimento sustentável (desenvolvimento ambiental, social e econômico) (YOUSEFI *et al.*, 2013; LARIZZATTI *et al.*, 2014)

A partir dos dados obtidos, diferentes tratamentos estatísticos podem ser empregados para avaliar a presença de substâncias potencialmente contaminantes e para estimar as concentrações naturais esperadas em uma determinada região. Nesse contexto, tais procedimentos permitem a determinação do *background* geoquímico, definido como o intervalo de concentrações naturais de elementos químicos em uma matriz ambiental, controlado predominantemente por fatores geológicos e pedogenéticos, na ausência de influência antrópica significativa (MATSCHULLAT *et al.*, 2000). A correta definição do *background* geoquímico constitui uma etapa fundamental em estudos ambientais, uma vez que fornece a base de referência para a identificação de anomalias geoquímicas e para a distinção entre contribuições naturais e aquelas associadas às atividades humanas, conforme discutido por REIMANN & GARRETT (2005). A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP), área de estudo deste trabalho apresenta uma intensa pressão antrópica associada às dinâmicas das atividades econômicas da região. Os empreendimentos econômicos na área que se destacam são a mineração, a indústria siderúrgica e o setor agropecuário.

Em 2008 e 2009, foi realizada uma campanha de mapeamento geoquímico conduzida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), cujos resultados foram publicados no documento

Informes de Recursos Minerais – Série Metais – Informes Gerais, nº 02 (LARIZZATTI *et al.*, 2014). Esse projeto envolveu a coleta de 390 amostras de solo na região do Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, incluindo 256 amostras distribuídas ao longo dos setores alto e médio da bacia do rio Paraopeba. Trata-se de um estudo de grande relevância para a compreensão geoquímica regional; entretanto, o conjunto de dados gerado ainda apresenta elevado potencial para tratamentos estatísticos adicionais, capazes de aprofundar a interpretação dos processos geoquímicos atuantes, especialmente no que se refere à definição de valores de *background* geoquímico para a região. Assim, este estudo tem como objetivo principal a determinação dos valores de *background* geoquímico das amostras e solo do alto e médio Paraopeba para os elementos Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn através de análises estatísticas. Os resultados obtidos foram comparados com a legislação nacional (CONAMA 420/2009) com o fito de comparar a porcentagem de violação de concentração dos elementos potencialmente tóxicos. Para isso, foram utilizadas 256 amostras (LARIZZATTI *et al.*, 2014) dentro da área proposta, obtendo uma densidade amostral de 1 amostra para cada 34,07 km². Os dados utilizados para este estudo são anteriores ao rompimento da barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho, o que poderá contribuir com o entendimento da contaminação e impactos ambientais sobre os solos da BHRP.

1.2 OBJETIVOS E METAS

Este trabalho tem como objetivo principal o mapeamento geoquímico a partir dos solos da bacia do Rio Paraopeba. A partir dos dados analisados foi possível caracterizar geoquimicamente a área de estudo em um cenário pré-rompimento da Barragem B1 da Mina Córrego do Feijão.

Dessa forma, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Determinação dos valores de *background* geoquímico para a BHRP para os elementos Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn através do tratamento estatístico de dados de amostras de solo coletadas na região;
- Compreensão espacial dos dados geoquímicos tratados através de ferramentas geoespaciais ao longo da BHRP;
- Comparação entre os valores obtidos através de parâmetros ambientais com a legislação nacional (CONAMA 420/2009), para definir e quantificar a concentração dos elementos potencialmente tóxicos;

1.3 JUSTIFICATIVA

A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP), está localizada na porção central de Minas Gerais com uma parcela de sua área contida no Quadrilátero Ferrífero. Essa bacia apresenta uma grande importância econômica para a região, contendo jazidas minerais, indústrias siderúrgicas, além de apresentar uma forte presença do setor agropecuário no local. No entanto, essas atividades podem resultar em diferentes impactos ao ambiente. Em 2019, o rompimento da barragem B1 da mina de Córrego do Feijão teve como consequência um intenso impacto socioambiental a região. A liberação do rejeito da barragem B1 resultou na alteração da qualidade de água, sedimento e solo do local, o que por conseguinte, inviabilizou atividades agrícolas e pesqueiras, contaminação da fauna e flora local e o deslocamento de comunidades inteiras (SOARES & SOARES, 2021).

Portanto, este trabalho pode ser justificado a partir da necessidade de caracterizar tanto os efeitos deste evento e de atividades antrópicas, quanto a influência de fenômenos naturais sobre a geoquímica dos solos da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba. A partir da realização do mapeamento geoquímico, da caracterização de áreas com violação da legislação nacional (CONAMA 420/2009) para elementos potencialmente tóxicos e a caracterização do *background* geoquímico da área, o estudo em questão auxilia na compreensão de alterações nas condições geoquímicas locais. Esse conhecimento, portanto, é fundamental não apenas a fins acadêmicos como o auxílio de estudos futuros sobre a qualidade ambiental da região, como também para a elaboração de futuras políticas públicas ambientais e sanitárias tanto preventivas, quanto corretivas.

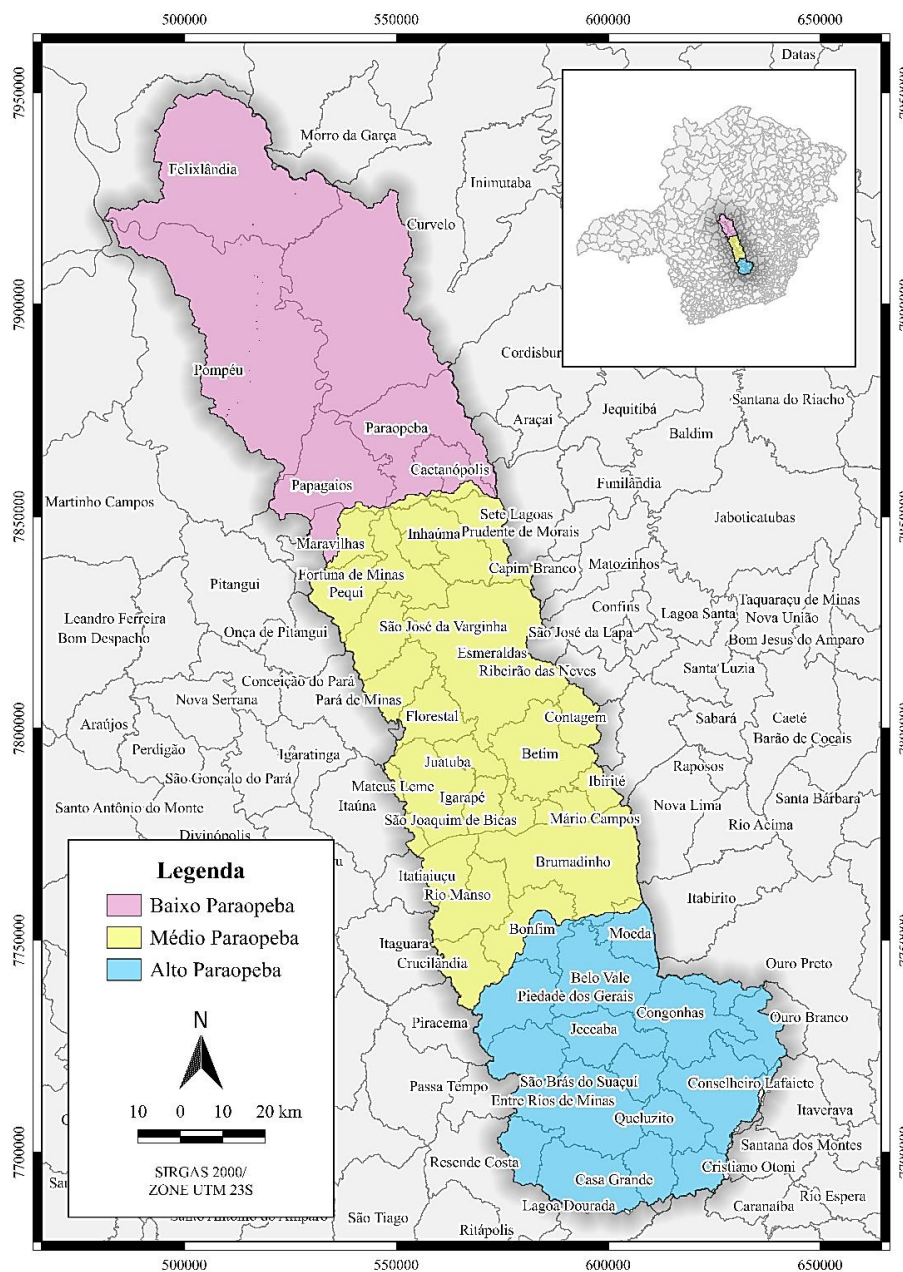
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 LOCALIZAÇÃO

A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba está contida na bacia do Rio São Francisco e compreende uma área de 12.054 km², o que corresponde a 2,5% da área total do estado (IGAM, 2013). O rio Paraopeba se estende por 550 km da sua nascente, localizada no município de Cristiano Ottoni, até sua foz entre os municípios de Felixlândia e Pompéu, na Represa de Três Marias (SOARES, 2021).

A área engloba um total de 48 municípios sendo eles: Belo Vale, Betim, Bonfim, Brumadinho, Cachoeira da Prata, Caetanópolis, Casa Grande, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Contagem, Cristiano Ottoni, Crucilândia, Curvelo, Desterro de Entre Rios, Entre Rios de Minas, Esmeraldas, Felixlândia, Florestal, Fortuna de Minas, Ibirité, Igarapé, Inhaúma, Itatiaiuçu, Itaúna, Itaverava, Jeceaba, Juatuba, Lagoa Dourada, Maravilhas, Mário Campos, Mateus Leme, Moeda, Ouro Branco, Ouro Preto, Papagaios, Pará de Minas, Paraopeba, Pequi, Piedade dos Gerais, Pompéu, Queluzito, Resende Costa, Rio Manso, São Brás do Suaçuí, São Joaquim de Bicas, São José da Varginha, Sarzedo e Sete Lagoas. (MATOS & DIAS, 2012). Desses, 21 municípios são de pequeno porte (até 10.000 habitantes), 17 municípios de médio porte (10.001 a 50.000 habitantes) e 10 municípios de grande porte (acima de 50.001 habitantes) (IBGE, 2019).

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.



Fonte: AUTOR, 2025.

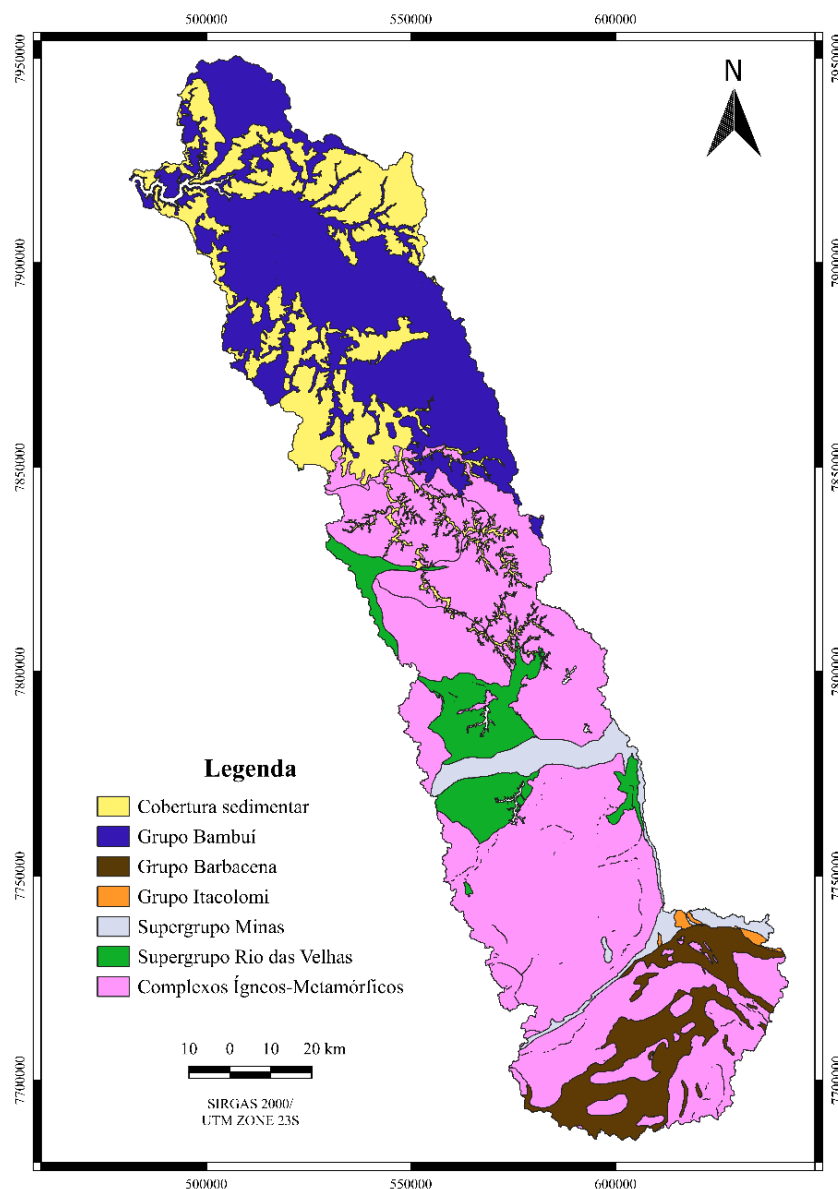
2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

Conforme o mapa geológico da Bacia do Paraopeba (Figura 2), os principais litotipos da região são: o Embasamento Cristalino, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas, o Grupo Itacolomi, o Grupo Barbacena, o Grupo Bambuí e as coberturas sedimentares.

Já para as sub-bacias, o Alto e Médio Paraopeba se destacam pela predominância dos Complexos Ígneos-Metamórficos e do Sg. Rio das Velhas com a presença do Sg. Minas ao longo da fronteira dessas duas sub-bacias. Ao longo do Alto Paraopeba também predominam

os grupos Barbacena e Itacolomi. O Baixo Paraopeba, no entanto, se destaca pela presença do Gp. Bambuí e das coberturas sedimentares, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Mapa geológico da Bacia do Paraopeba.



Fonte: AUTOR, 2025.

Segundo SOARES (2021), a Bacia do Paraopeba, portanto, pode ser subdividida em três principais compartimentos geológicos: Complexos Ígneos-Metamórficos representando o embasamento cristalino, Quadrilátero Ferrífero (Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, Gp. Barbacena, Grupo Itacolomi) e o Gp. Bambuí com as coberturas sedimentares. A área, no entanto, é composta por duas estruturas tectônicas de geologia complexa, o

Quadrilátero Ferrífero apresenta as unidades supracitadas e o Cinturão Mineiro com a sequência vulcanossedimenter Rio das Mortes, expressa na área pelo Gp. Barbacena.

Os Complexos Ígneos-Metamórficos são compostos majoritariamente por granitos e gnaisses de origem arqueana (complexos Belo Horizonte, Monsenhor Isidro) e paleoproterozóica (Complexo Mantiqueira) (NOCE *et al.*, 1994; SOUZA; 2017).

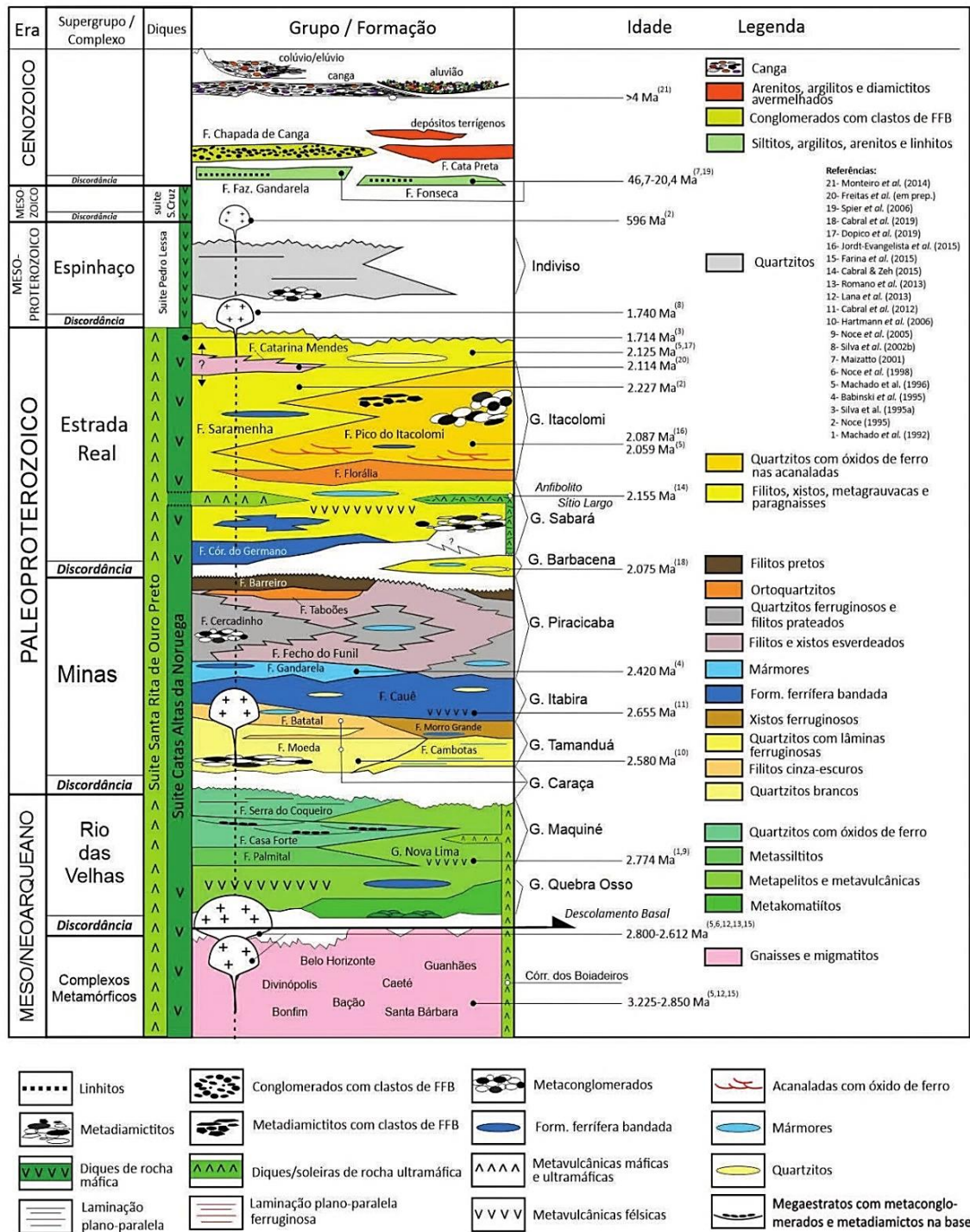
O Quadrilátero Ferrífero apresenta uma alta diversidade de unidades aflorantes na região. A tabela abaixo, portanto, apresenta seus principais litotipos, seguindo a divisão segundo ENDO *et al.* (2019) (Figura 3).

Tabela 1 - Tabela com as unidades do Quadrilátero Ferrífero presentes na área de estudo.

Unidades		Litotipos
Grupo Itacolomi		Ortoquartzitos, quartzitos, metaconglomerados, itabirito, filito e granito
Grupo Barbacena		Grafita xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xistos manganíferos, micaxistos, quartzitos feldspáticos, filitos com intercalações de anfibolito e metaultramáficas
Supergrupo Minas	Grupo Piracicaba	Dolomitos, filitos prateados, dolomíticos, grafitosos, metaconglomerados, metassiltitos, quartzitos ferruginosos, ortoquartzitos, xistos sericíticos, quartzosos e argilosos
	Grupo Itabira	Filitos, quartzitos, mármore, mármore dolomítico, filitos dolomíticos, dolomitos ferruginosos, e itabiritos
Supergrupo Rio das Velhas	Grupo Tamanduá	Quartzitos, ortoquartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas, xistos quartzosos, argilosos, filíticos, ferruginosos e formação ferrífera bandada
	Grupo Nova Lima	Filitos, xistos e xistos cloríticos
	Grupo Maquiné	Metaconglomerado, metadiamictito e Sericita-xisto
Complexos Ígneo-Metamórficos		Gnaisses bandados, com corpos anfibolíticos e de granitóides leucocráticos, ortognaisses laminado, migmatitos, veios apolíticos e diques máficos

Fonte: ENDO *et al.*, 2019.

Figura 3 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.

Fonte: ENDO *et al.*, 2019.

O Grupo Bambuí é composto por uma sucessão siliciclástica-carbonática de idades ainda discutidas na literatura que variam de 556 Ma para a Formação Sete Lagoas (PAULA-

SANTOS *et al.*, 2015), base do grupo, a 527 ± 4 Ma para a Formação Três Marias (TAVARES, 2019), topo do grupo.

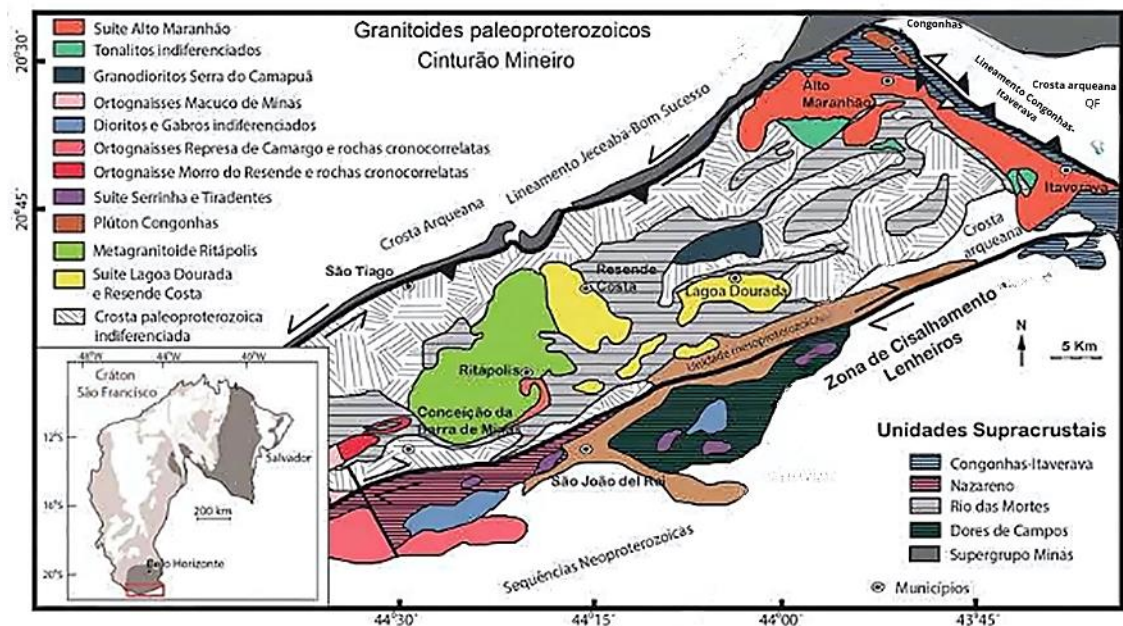
2.2.1 Cinturão Mineiro

O Cinturão Mineiro está localizado ao sul do QF, sendo delimitado ao norte pelo lineamento Jeceaba-Bom Sucesso e delimitado pelos terrenos de alto grau metamórfico na porção sul. Sua gênese está relacionada a acreção de arcos de ilha e arcos continentais durante o Paleoproterozóico, na Orogenia Riacciana (BARBOSA, 2015). Composto por uma variedade de granitóides paleoproterozoicos, onde se destacam os tonalitos-trondhjemitos-granodioritos (TTGs), componentes fundamentais do arcabouço crustal do Cinturão Mineiro (TEIXEIRA *et al.*, 2015).

Ao longo da sub-bacia do alto do Rio Paraopeba, se destaca o Grupo Barbacena, unidade chave ao longo da sequência vulcanossedimentar do Rio das Mortes que se localiza entre o Lineamento Jeceaba-Bom Sucesso e a zona de cisalhamento Lenheiro. Esta unidade apresentou diversas nomenclaturas na literatura ao longo do tempo como Sequência Rio das Mortes, Serie Barbacena e Grupo Barbacena (QUÉMÉNEUR & VIDAL, 1989; BARBOSA, 1954; PIRES, 1977; PIRES, 1978) e é atualmente separada em 3 formações, sendo elas as unidades metamáficas/metaultramáficas, a Formação Lafaiete e a Formação Santo Amaro.

Na base do Grupo Barbacena encontra-se a unidade metamáfica/ultramáfica composta por anfibolitos cinza-escuro, de granulação fina a média, bem foliada (metabasalto) com intercalações de TTG ao longo do seu embasamento (SANTOS *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013). A Formação Lafaiete, por sua vez, é expressa pela sequência siliciclástica de metagrauvaca-argilito composta por sericita-clorita xisto, sericita xisto, biotita-quartzo xisto, xisto carbonoso e manganesífero; metabasito; actinolita xisto, gabros e plagioclásio-quartzo-clorita-anfibólio milonitizado (SANTOS *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013). Ao topo, encontra-se a Formação Santo Amaro que corresponde a quartzitos sericíticos associadas a filitos pelíticos (GROSSI SAD, 1983).

Figura 4 - Mapa geológico de detalhe do Cinturão Mineiro.



FONTE: Adaptado de VIEIRA *et al.*, 2020.

2.2.2 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero, província mineral de importância global, localiza-se na porção centro-sul do Cráton São Francisco, Minas Gerais. Caracterizado por apresentar estruturas altamente complexas com sequências de idades arqueanas e proterozóicas metassedimentares e metavulcânicas. Essas unidades foram altamente afetadas pelos eventos tectônicos Transamazônico e Brasiliano, resultando em rochas intensamente deformadas de baixo a médio grau de metamórfico (DORR II, 1969). Segundo ENDO *et al.* (2019), o QF é marcado por rochas supracrustais alóctones sobre o embasamento cristalino, arranjadas em sistemas de nappes de vergências para NNE (*Nappe Curral*) e SSW (Sistema de *Nappes* Ouro Preto) marcadas por eventos compressivos e extensivos de cinco fases deformacionais.

Ao longo das sub-bacias do alto e médio do Rio Paraopeba destacam-se principalmente as rochas das unidades litodêmicas e litoestratigráficas do Complexo Belo-Horizonte, representando o embasamento cristalino, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, Grupo Barbacena e Grupo Itacolomi.

O Complexo Belo-Horizonte, bem como os outros complexos metamórficos do QF, são compostos por gnaisses bandados, com corpos anfibolíticos e de granitoides leucocráticos, ortognaisses laminado, migmatitos, veios apolíticos e diques máficos (ENDO *et al.*, 2019). Os

complexos metamórficos do QF, foram de maneira geral, marcados por quatro eventos tectono-magmáticos do Arqueano, sendo eles o Santa Bárbara, Rio das Velhas (I e II) e Mamona.

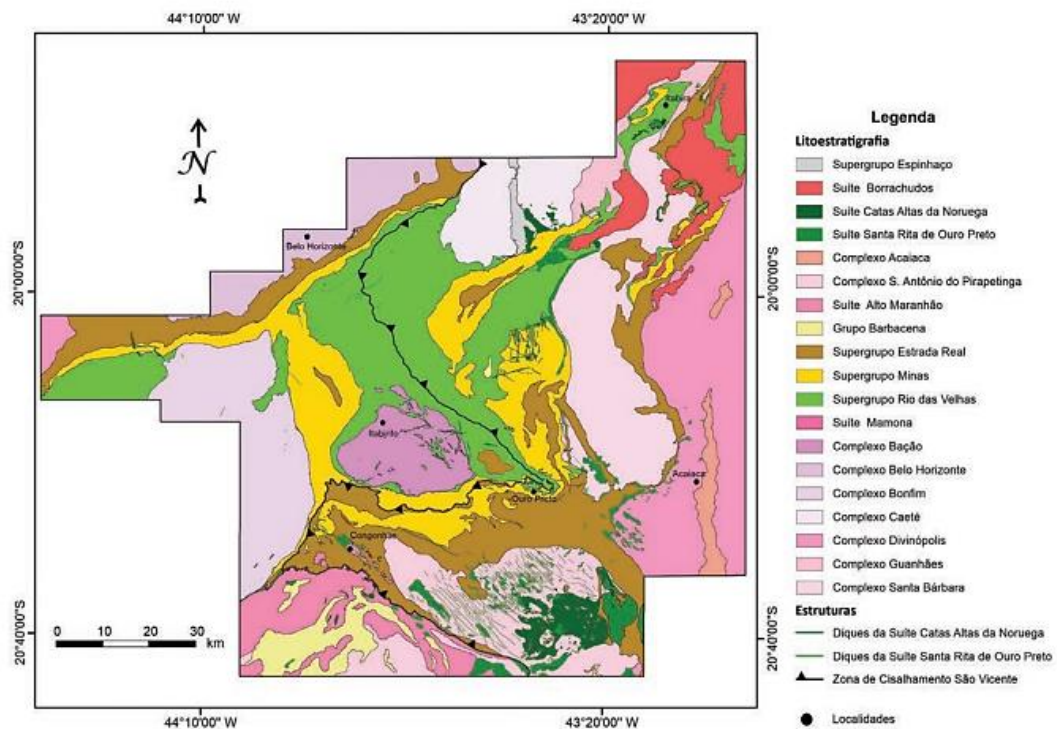
A sequência de rochas do Supergrupo Rio das Velhas é caracterizada por forma uma típica sucessão *greenstone belt*. Conforme a caracterização tectonossedimentar de BALTAZAR & PEDREIRA (1998) e BALTAZAR & ZUCCHETTI (2007) o Supergrupo Rio das Velhas é subdividido da base para o topo em: Grupo Quebra Ossos, composto por uma assembléia de rochas metavulcânicas máfica-ultramáficas e félsicas; Grupo Nova Lima, composto pela sequência de rochas metavulcanossedimentar química, metavulcanoclásticas, metassedimentar clástica marina; e o Grupo Maquiné, composto por uma associação metassedimentar não-marinha.

O Supergrupo Minas é composto pela sucessão continental-marinha (DORR II, 1969) dos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. Esta unidade representa uma das etapas de evolução de uma bacia de margem passiva (ALKMIN & MARTINS NETO, 2012).

A porção aflorante do Grupo Barbacena ocorre na porção meridional do QF, sendo expressa por grafita xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xistos manganésíferos, micaxistos, quartzitos feldspáticos, filitos com intercalações de anfíbolito e metaultramáficas. Os litotipos dessa unidade são correlativos ao Grupo Sabará no QF (CABRAL *et al.*, 2019).

O Grupo Itacolomi está inserido no Supergrupo Estrada Real, expresso por uma sequência do tipo *flysch* e molassa sin-orogênicos com um pacote rochosos de espessura superior a 3625 m (DORR 1969, NOCE 1995, REIS *et al.*, 2002). Esse grupo é marcado por ortoquartzitos e quartzitos maciços, quartzitos com estratificação cruzada acanalada, marcada por trilhas de óxido de ferro, metaconglomerados com seixos, calhaus, matações de veios de quartzo, itabirito, filito e granito (ENDO *et al.*, 2019).

Figura 5 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.

FONTE: ENDO *et al.*, 2019.

2.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

2.3.1 Clima

O clima da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba pode ser categorizado em dois subtipos: subtropical úmido e subtropical de altitude (ALVARES *et al.*, 2013). Com estações mais bem definidas, o subtropical úmido pode alcançar temperaturas inferiores a 18°C durante o inverno e superiores a 22°C durante o verão. O clima subtropical de altitude também apresenta inverno seco, mas verão ameno, com temperaturas médias inferiores a 22°C em meses mais quentes.

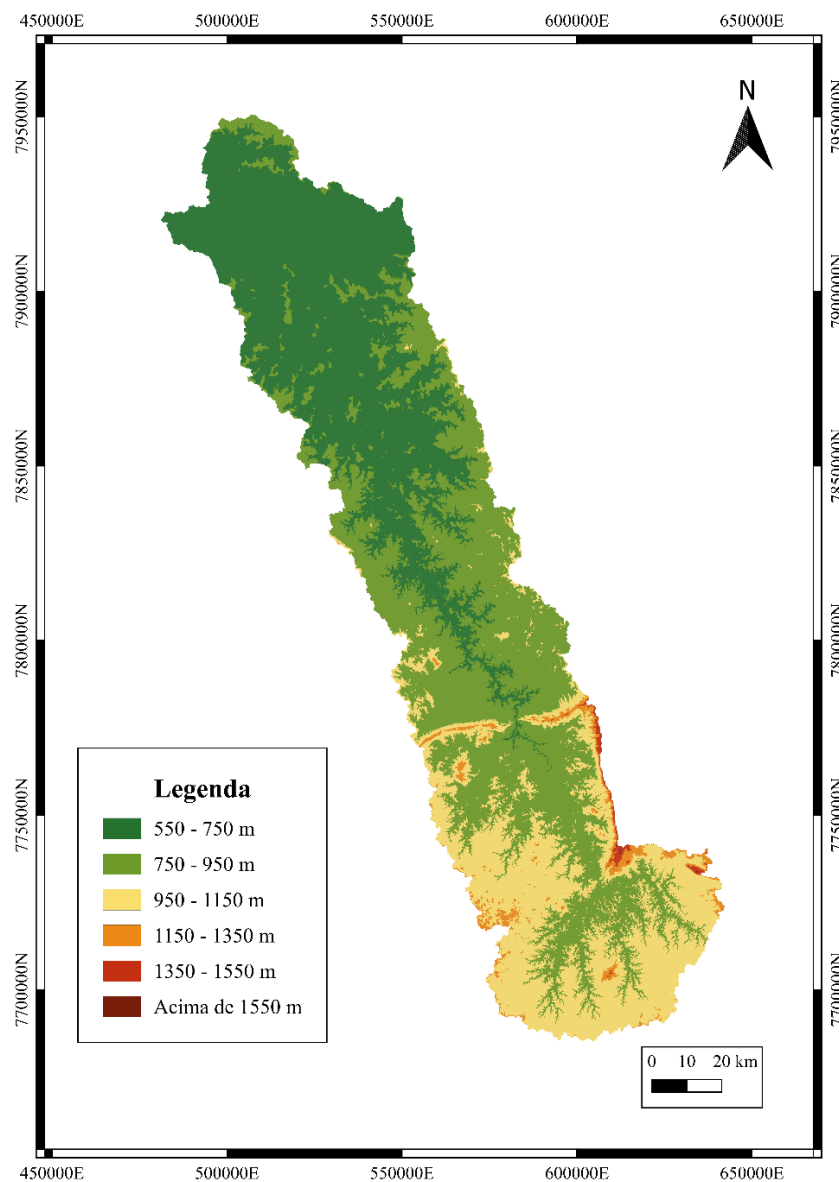
2.3.2 Relevo

Conforme os dados do SISEMA (2021) o relevo da bacia do Rio Paraopeba pode ser subdividido em quatro regiões, cada uma apresentando suas próprias características ligadas ao conjunto de fatores litomorfoestruturais e climáticos local, sendo essas: a Depressão do São Francisco; Planalto Centro-Sul Mineiro; Planaltos do Leste de Minas; e Quadrilátero Ferrífero.

A partir dos mapas hipsométricos (Figura 6) e de declividade da região (Figura 7), juntamente as informações fornecidas em SOARES (2021) o domínio da Depressão do São

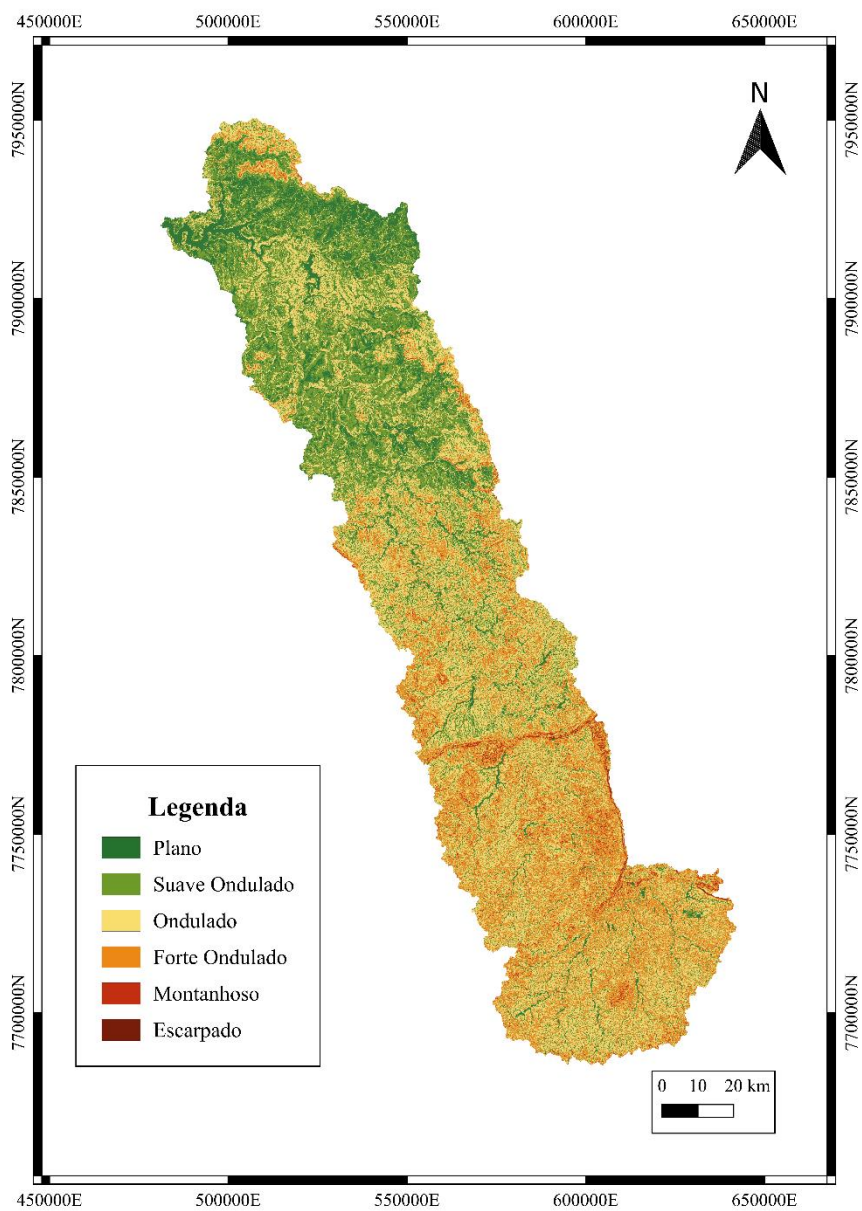
Francisco ocorre predominante no Baixo Paraopeba, apresentando relevo plano e de baixas altitudes. O Planalto Centro-Sul Mineiro apresenta uma ocorrência mais expressiva no Médio Paraopeba, mas também está presente no Alto Paraopeba junto aos Planaltos do Leste de Minas com relevo suave-ondulado a ondulado. A região do QFe tem ocorrência ao longo do leste do Alto Paraopeba seguindo até a fronteira com o Médio Paraopeba, apresentando elevadas altitudes, superiores a 1350 m em locais específicos, com relevo que varia de suave ondulado até escarpado.

Figura 6 - Mapa hipsométrico da BHRP.



Fonte: AUTOR, 2025.

Figura 7 - Mapa de declividade da BHRP.



Fonte: AUTOR, 2025.

2.3.3 Solos

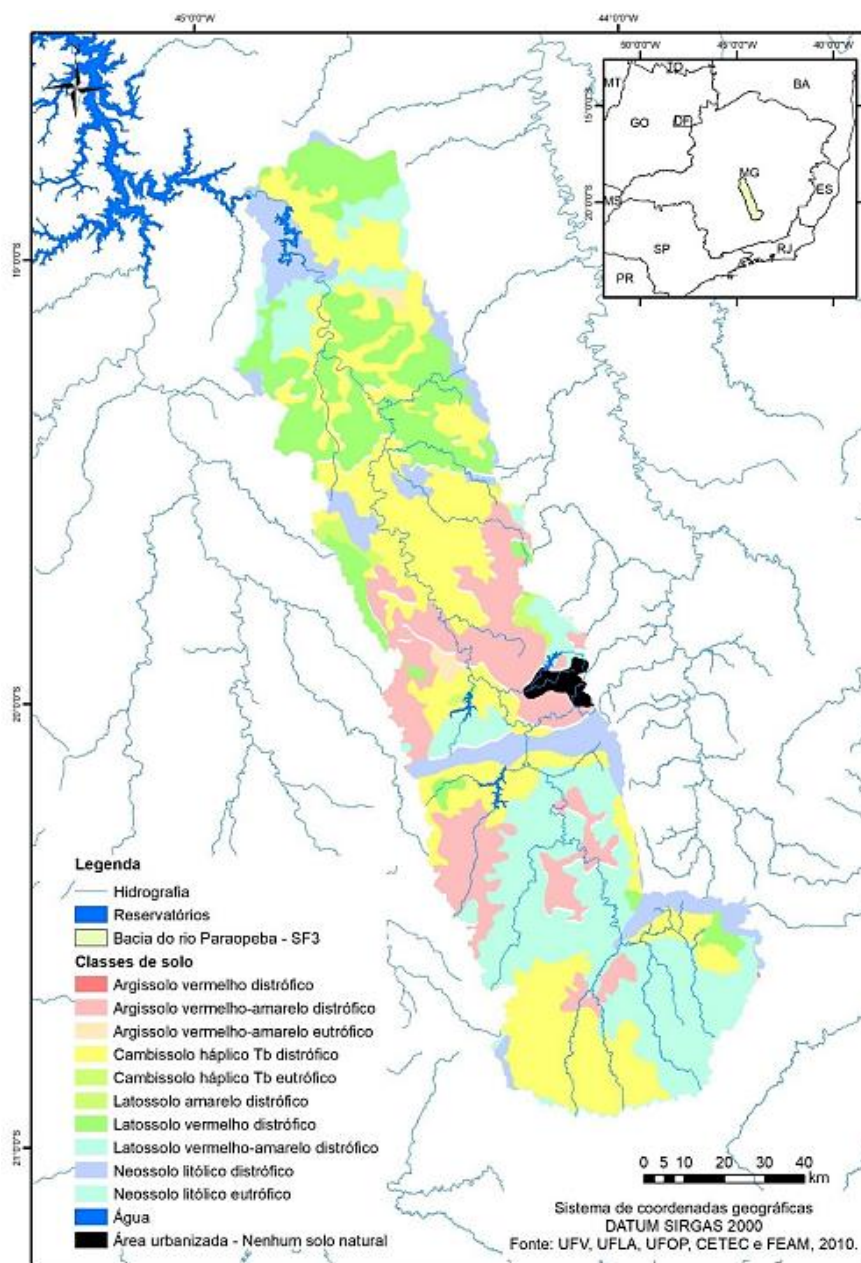
De acordo com SOARES (2021) as classes de solos mais presentes na região da bacia hidrográfica do rio Paraopeba são o Cambissolo Háplico distrófico e Latossolo vermelho-amarelo distrófico. Outras classes de solos também estão presentes e podem ser observadas na Figura 8. As porcentagens referentes a área de cada classe pedológica ao longo da bacia estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela com a classe de solos e suas respectivas áreas e porcentagens da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Classe de solo	Área (km²)	Porcentagem
Cambissolo háplico Tb distrófico	3963,69	32,9%
Latossolo vermelho-amarelo distrófico	2964,37	24,6%
Argissolo vermelho-amarelo distrófico	1863,39	15,5%
Latossolo vermelho distrófico	1815,17	15,1%
Neossolo litólico distrófico	1146,6	9,5%
Área urbanizada - Nenhum solo natural	108,85	0,9%
Argissolo vermelho-amarelo eutrófico	69,63	0,6%
Latossolo amarelo distrófico	69,32	0,6%
Cambissolo háplico Tb eutrófico	48,82	0,4%
Neossolo litólico eutrófico	5,63	0,0%
Água	1,47	0,0%
Argissolo vermelho distrófico	1,06	0,0%

Fonte: SISEMA, 2021.

Figura 8 - Mapa pedológico da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.



Fonte: SOARES, 2021.

As principais ordens dos solos da área de estudo são: Argissolos, Cambissolos, Latossolos e Neossolos. Conforme a EMBRAPA (2025) esses tipos de solos são definidos como:

- **Argissolos:** solos constituídos por material mineral, cujas principais características são: um horizonte B textural (Bt) de argila de baixa atividade ou alta, caso seja conjugada com saturação por bases baixas ou de caráter aluminoso. Este Bt está inserido imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte E ou horizonte superficial, exceto o hístico. Os argissolos da BHRP podem ser subdivididos em cor, vermelho ou vermelho-amarelo, e por saturação em bases, distrófico ou eutrófico.

- **Latossolos:** solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico subjacente a um horizonte superficial de qualquer natureza, menos hístico. Os latossolos da BHRP podem ser subdivididos em cor, vermelho, amarelo ou vermelho-amarelo, e por saturação em bases, distrófico ou eutrófico.
- **Cambissolos:** solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente localizado sob qualquer tipo de horizonte superficial desde que não se enquadrem nas classes Vertissolos, Gleissolos, Chernossolos, Plintossolos ou Organossolos. Sua sequência de horizontes pode ser A, ou O, ou H, B incipiente, C, com ou sem rocha-matriz. Os cambissolos da BHRP podem ser subdivididos conforme a sua saturação em bases, distrófico ou eutrófico.
- **Neossolos:** solos constituídos por material mineral ou orgânico de pequena espessura não apresentando alterações expressivas em relação ao material originário em função do baixo grau de intensidade dos processos pedogenéticos limitando a evolução do solo. Os neossolos da BHRP podem ser subdivididos conforme a sua saturação em bases, distrófico ou eutrófico.

2.3.4 Uso e Ocupação do Solo

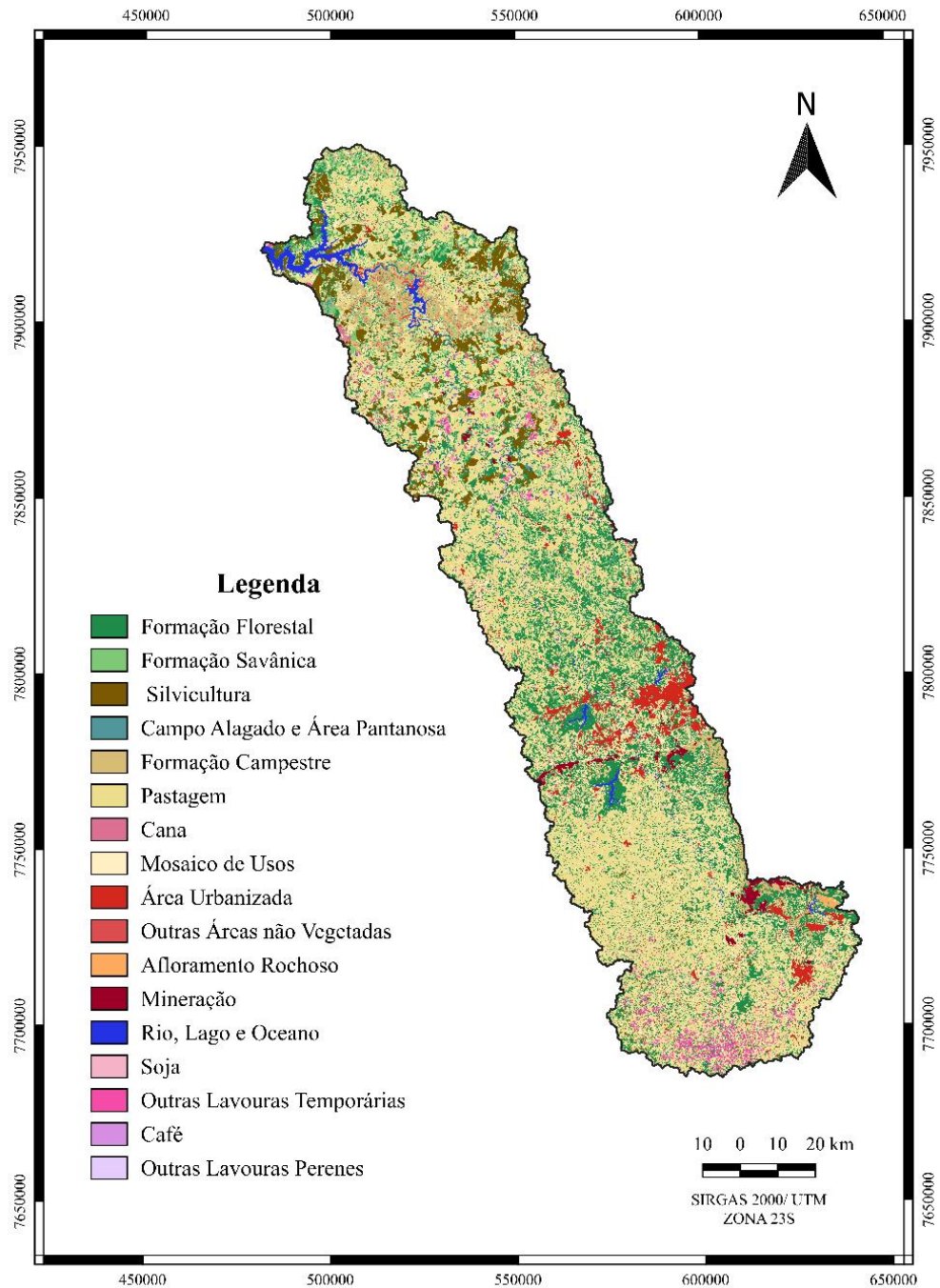
A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba se destaca pela ampla matriz econômica, com atividades agrícolas, mineradoras, industriais e grandes polos urbanos. A ocupação territorial, principalmente ao longo do baixo e médio Paraopeba, ocorreu como consequência da corrida pelo ouro e outros minerais minério ao longo do final do século XVII. Este êxodo resultou em populações mais concentradas em porções mineralizadas da bacia. Observando o mapa (Figura 9) e a Tabela 3 a região do QF é ocupada por jazidas de ferro, manganês, ouro e pedras preciosas, como topázio e esmeralda. Já o Baixo Paraopeba foi ocupado à medida que rotas comerciais e fazendas foram criadas nesta porção (SCHVARTZMAN *et al.*, 2002 *apud* MATOS & DIAS, 2012).

Tabela 3 - Tabela com o cálculo do uso e ocupação de área para cada atividade da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.

Legenda	Área (%)	Área (km²)
Outras Lavouras Perenes	0,01%	1,30
Café	0,04%	5,21
Soja	0,12%	16,27
Afloramento Rochoso	0,15%	19,82
Cana	0,21%	28,84
Outras Áreas não-Vegetadas	0,67%	90,46
Mineração	0,98%	131,80
Campo Alagado e Área Pantanosa	1,50%	201,64
Rio, Lago e Oceano	1,62%	218,20
Outras Lavouras Temporárias	2,30%	309,55
Área Urbanizada	2,30%	309,55
Formação Savânica	3,78%	509,40
Formação Campestre	4,87%	656,48
Silvicultura	5,41%	728,71
Mosaico de Usos	13,96%	1.881,01
Formação Florestal	21,01%	2.831,68
Pastagem	41,08%	5.535,39

Fonte: MAPBIOMAS, 2019.

Figura 9 - Mapa de uso e ocupação da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.



Fonte: MAPBIOMAS, 2019.

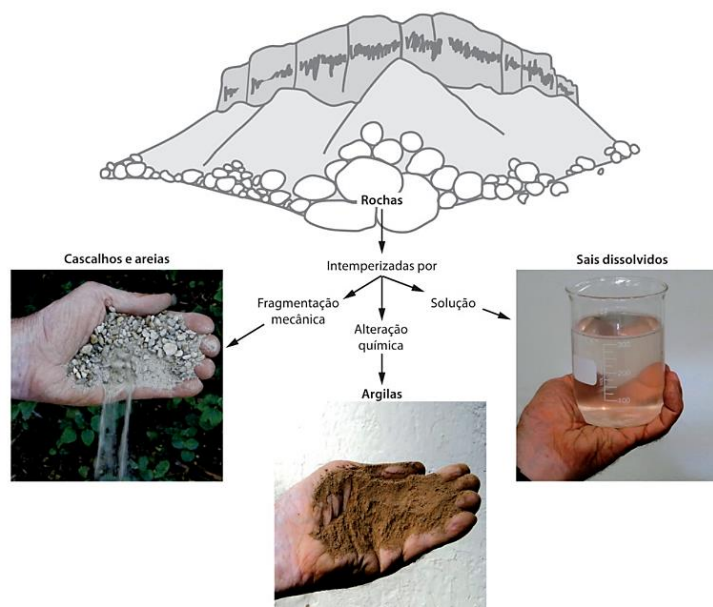
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FORMAÇÃO DOS SOLOS

De acordo com OLIVEIRA *et al.* (2009), a desagregação e decomposição da rocha mãe são as principais etapas do intemperismo, que podem alterar a rocha de forma física, química ou biológica. A reorganização deste material resultante, portanto, procede na formação dos solos (pedogênese). Fatores como clima, relevo, composição do material originário e até ação antrópica são determinísticos para a intensidade do intemperismo. Logo, ocorrerá a diferenciação vertical deste material, formando, portanto, o manto de alteração, ou regolito (LEPSCH, 2002).

O intemperismo físico é dominado pelo clima, a partir das oscilações térmicas diárias, bem como a ação eólica ao longo do tempo. Assim, ocorrerá o fraturamento e fragmentação da rocha mãe em frações menores. O relevo desempenha o papel fundamental de modular a dinâmica da água ao longo da topografia. Quanto menor a declividade do terreno, maior a capacidade de infiltração da água, cenário propício ao intemperismo químico (TOLEDO, 2014). A percolação de água por cavidades geradas a partir do intemperismo físico, portanto, favorece aos processos de intemperismo não apenas químico, como também biológico, uma vez que os espaços gerados também viabilizam a presença de seres vivos (LEPSCH, 2021). Como resultado, ocorrerá a alteração química dos minerais da rocha matriz (OLIVEIRA, 2009).

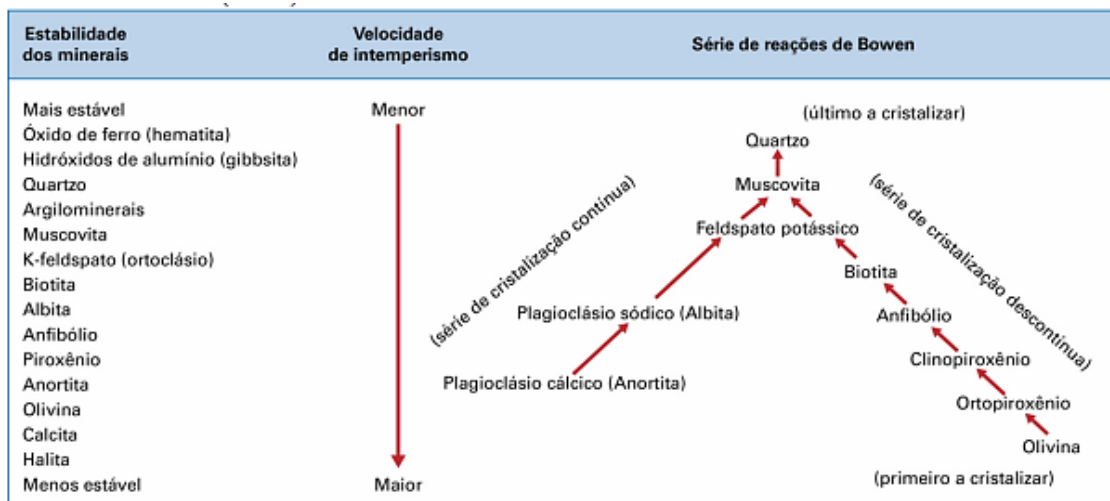
Figura 10 - Modelo representativo de diferentes produtos para o intemperismo físico (fragmentação mecânica) e intemperismo químico (alteração química e solução).



Fonte: LEPSCH, 2019; PRESS & SIEVER, 1978.

As características composicionais do solo dependerão majoritariamente dos elementos químicos presentes na rocha, mineralogia associada e a presença de matéria orgânica. A série de GOLDICH (1938) (Figura 11) representa a estabilidade dos minerais em frente à atividade intempérica. Sendo inversa à Série de BOWEN (1928), a Série de Goldich determina que minerais de temperatura mais baixa de cristalização, como quartzo e muscovita, são menos suscetíveis ao intemperismo. A composição do solo não necessariamente deverá refletir a composição original da rocha mãe. A dissolução de feldspatos, por exemplo, conforme WHITE & BRANTLEY (1995), poderá liberar cátions K^+ e $SiO^2_{(aq)}$ na solução, os quais podem ser transportados por água ou outro fluido. Ademais, formigas e cupins também podem realizar o retrabalhamento de partículas do solo, retornando o material da base do perfil de alteração para o topo, processo denominado pedoturbação (JOHNSON *et al.*, 1987). Ademais, a quantidade de matéria orgânica no solo está diretamente relacionada a adsorção de metais no solo via troca catiônica ou complexação, afetando diretamente a mobilidade de alguns elementos, bem como a toxicidade de alguns metais pesados (VAN DEN BERG & KRAMER, 1979).

Figura 11 - Diagrama de estabilidade mineral ao intemperismo em comparação a Série de Goldich e Série de Bowen.



Fonte: GOLDICH, 1938; BOWEN, 1928.

O intemperismo apresenta forte influência sobre a distribuição vertical dos elementos ao longo do horizonte de alteração. De acordo com OLIVEIRA & MARINS (2011) “solos mais jovens e formados in situ apresentam, em geral, teores mais elevados de metais-traço que solos submetidos ao intenso intemperismo tropical e a um longo período de desenvolvimento, com ciclos de erosão e redeposição.” Horizontes mais argilosos e com teores mais elevados de matéria orgânica, como horizonte B textural e horizonte B espódico, tendem a concentrar ainda mais elementos (NAEL *et al.*, 2009).

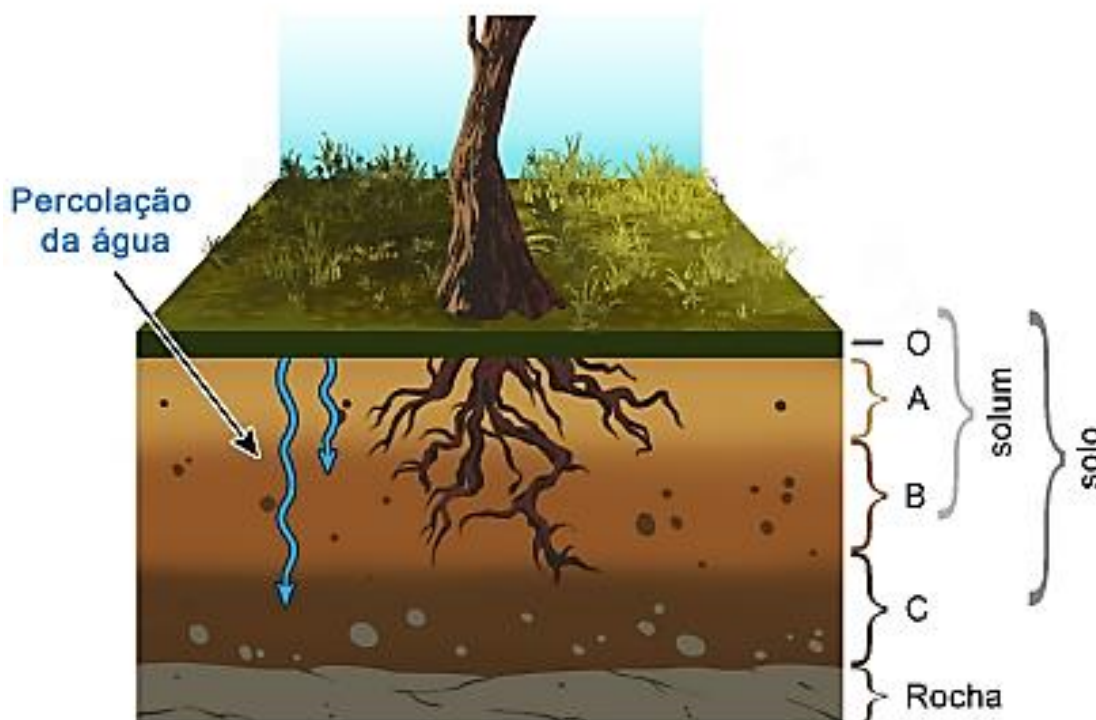
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS HORIZONTE DOS SOLOS

O Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SBCS) (EMBRAPA, 2025), classifica os solos em quatro principais horizontes. Sendo esses:

- **Horizonte O** – Horizonte localizado no topo do perfil de alteração, sendo esse o mais superficial. Composto por matéria orgânica em decomposição com concentrações de carbono orgânico maiores ou iguais a 80 g kg⁻¹.
- **Horizonte A** – Horizonte superficial com teores significativos de matéria orgânica e conteúdo mineral. Pode variar em termos conteúdo de carbono orgânico, saturação de bases, coloração e espessura. A partir das variações desses parâmetros, este horizonte pode ser subdividido em chernozêmico, húmico, proeminente, antrópico, franco ou moderado.

- **Horizonte B** – Horizonte subsuperficial com baixo teor de matéria orgânica e predominantemente mineral. Pode ser subdividido em textural, latossolítico, incipiente, nítico, espódico e plânico, a partir da variação do acúmulo de argila e processos iluviais.
- **Horizonte C** – Horizonte mais profundo, composto por fragmentos de rocha oriundos da rocha-matriz, saprólitos e sedimentos.

Figura 12 - Perfil de alteração esquemático.



Fonte: OLIVEIRA, 2009.

3.3 BACKGROUND GEOQUÍMICO

Conforme MATSCHULATT *et al.* (2000) o *background* geoquímico pode ser compreendido como o valor de concentração de um determinado elemento no meio, refletindo as características intrínsecas do local, de forma isenta às atividades antrópicas. Segundo FADIGAS *et al.* (2006), no entanto, solos podem apresentar altas concentrações de elementos não correlatos à atividade antrópica, mas sim a fenômenos geogênicos.

Para este trabalho, a determinação do *background* geoquímico é fundamental para a determinação de valores de referência da área estudada. Marcada por uma acentuada atividade

minerária e agrícola, a fundamentação do *background* geoquímico da Bacia do Paraopeba será vital para mensurar a contribuição antrópica a um meio (solo, sedimento ou água) e a distinção entre áreas poluídas e áreas não poluídas. Conforme MATSCHULLAT *et al.* (2000) valores anormalmente positivos, em áreas não mineralizantes, podem apresentar influência antrópica, resultando em uma possível contaminação. Visto isso, GALUZKA (2007) evidencia dois possíveis métodos para determinar o *background* geoquímico de uma área, sendo eles os métodos diretos e indiretos

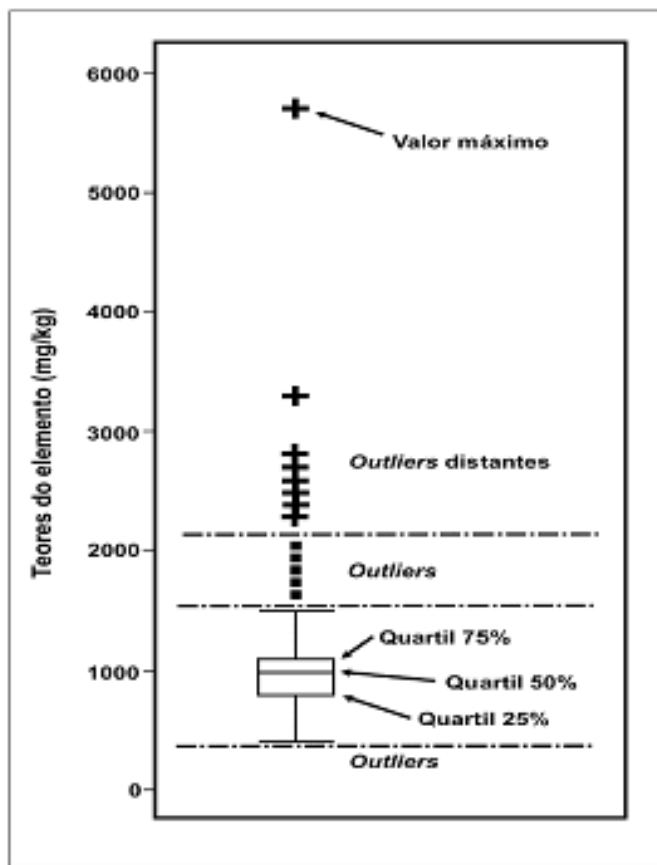
Realizadas através da atividade de campo e análises laboratoriais, os métodos diretos são descritos como a análise de “amostras isentas de interferência antrópica, as quais demonstram associações ou correlações geoquímicas, comumente observadas entre os elementos químicos que ocorrem naturalmente em rochas, solos e sedimentos” (CROMMENTUIJN *et al.*, 2000; BAIZE & STERCKEMAN, 2001; HORCKMANS *et al.*, 2005 *apud* VICQ, 2015). As amostras são coletadas em pontos distantes da fonte em terraços aluviais, amostras de poços, etc (BOVIKEN *et al.*, 1996; SWENNEN & VAN DER SLUYS, 1998; CAPPUYNS, 2004 *apud* LEÃO, 2019). Os valores de *background* geoquímico, neste caso, serão obtidos a partir da média dos valores de concentração de um determinado elemento naquele local, respeitando as condições já citadas anteriormente (RODRIGUES *et al.*, 2009).

Os métodos indiretos, por sua vez, se destacam pelo uso de artifícios estatísticos como a análise de frequência estatística, análise modal, regressão linear, Mediana ± 2 *Desvio Absoluto da Mediana (mMad), *Tukey Inner Fence* (TIF) (TUKEY, 1977), percentis e curva de probabilidade cumulativa (CPC), etc. Como resultado, são gerados histogramas, mapas geoquímicos e *boxplots* que determinam o *background* geoquímico eliminando valores discrepantes e aumentando a acurácia do conjunto de dados amostrados (VICQ, 2015).

3.3.1 Método de Tukey *Inner Fence* (TIF)

Para este trabalho será utilizado o método indireto de representação por *boxplot* baseado em TUKEY (1977), o *Tukey Inner Fence* (TIF), o qual divide os dados em quatro partes: o primeiro quartil (Q1) constitui 25% da distribuição dos valores, o segundo quartil (Q2) ou mediana constitui 50% e o terceiro quartil (Q3) que constitui 75%. A faixa de dados contidos no intervalo de Q1 a Q3 é denominada intervalo interquartil (QI). Os limites superior e inferior são determinados a partir do intervalo de 1,5 vezes QI. Valores discrepantes a esses limites são classificados como incomuns (*outliers*). *Boxplots* contendo menos que 10% de *outliers* apresentam dados mais coerentes e descritivos (REIMANN & GARRET, 2005).

Figura 13 - Gráfico de *boxplot* para a concentração de um elemento químico.



Fonte: REIMANN & GARRET, 2005.

3.4 MAPEAMENTO GEOQUÍMICO

De acordo com VIVO *et al.* (2003), a melhor forma de representar a distribuição espacial de elementos químicos específicos em um local é através de mapas geoquímicos. Essa ferramenta, pode apresentar múltiplas abordagens, segundo LEÃO *et al.* (2019) "os mapas geoquímicos permitem a descoberta de novas áreas para exploração mineral, destacam áreas críticas que podem restringir certos tipos de uso da terra, protegendo a população e o meio ambiente, e ainda auxiliando na elaboração de políticas ambientais. Recentemente, o mapeamento geoquímico vem ganhando cada vez mais destaque como uma importante ferramenta para estudos ambientais, principalmente para o monitoramento de impactos ambientais e possíveis distinções entre fatores geogênicos e atividade antrópica (ALBANESE *et al.*, 2007).

O processo de amostragem deve ser realizado de forma sistêmica e ordenada em relação a distância entre os pontos de coleta para que o mapa apresente uma resolução coerente. ALBANESE *et al.* (2007) retrata a importância da realização de métodos de interpolação espacial, para estimar a concentração de elementos em áreas onde não foi possível a realização de coleta de amostras.

Para o presente trabalho, a técnica de interpolação espacial utilizada será o método *Inverse Distance Weighted* (IDW), indicada para a realização de mapeamentos geoquímicos (CHENG *et al.*, 2014, LANCIANESE & DINELLI, 2015). Esse método utiliza da técnica dos vizinho mais próximo ao calcular uma média ponderada de pontos conhecidos para estimar pontos vizinhos espacialmente próximos (SALOMÃO, 2018).

Para a confecção de mapas geoquímicos é fundamental a determinação da escala do mapa, conforme a necessidade e o objetivo do mapeamento. Para tanto, as escalas podem variar entre escalas continentais, uma amostra a cada 10.000 km² a 1.600 km²; escalas regionais, 1 amostra a cada 100 km² a 0,01 km²; e escalas de detalhe com uma densidade de 1 amostra para 2500 m² a 25 m². A Tabela 4 apresenta os objetivos de cada escala, bem como o *grid* de amostragem e densidade amostral. Estes intervalos seguem padrões internacionais para o mapeamento geoquímico (CARITAT *et al.*, 2007; DARNLEY *et al.*, 1995)

Tabela 4 - Classes de mapeamento geoquímico de acordo com as escalas, grid de amostragem.

Classe de Mapeamento	Escala de Mapeamento	Grid de Amostragem	Densidade Amostral	Padrões Geoquímicos
Continental (Global)	1:10.000.000	100 x 100 km	1 amostra/10.000 km ²	Padrão Global
		80 x 80 km	1 amostra/6.400 km ²	
		~72 x 72 km	1 amostra/5.200 km ²	
	1:5.000.000	50 x 50 km	1 amostra/2.500 km ²	Megaprovincia
		40 x 40 km	1 amostra/1.600 km ²	
Regional	1:1.000.000	10 x 10 km	1 amostra/100 km ²	Província geoquímica
	1:250.000	5 x 5 km	1 amostra/25 km ²	
	1:100.000	1 x 1 km	1 amostra/1 km ²	
	1:50.000	500 x 500 m	1 amostra/250.000 m ²	Anomalias regionais
	1:25.000	250 x 250 m	1 amostra/62.500 m ²	
	1:10.000	100 x 100 m	1 amostra/10.000 m ²	
Local (Detalhe)	1:5.000	50 x 50 m	1 amostra/2.500 m ²	Anomalias locais
	1:2.500	25 x 25 m	1 amostra/625 m ²	
	1:1.000	10 x 10 m	1 amostra/100 m ²	
	1:500	5 x 5 m	1 amostra/25 m ²	

Fonte: SUZANO, 2025.

4 METODOLOGIA

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O mapeamento geoquímico via análise de amostras de solo, vem se tornando cada vez mais relevante para diversos setores, seja para prospecção mineral, ou para estudos ambientais. Esse método é realizado a partir de uma abordagem multidisciplinar, relacionando geoquímica, pedologia, geologia, estatística e legislação de forma integrada. É necessário, portanto, a compreensão de diversas áreas do conhecimento.

Para melhorar a compreensão deste estudo, alguns trabalhos foram tratados como referências principais que fomentaram o conhecimento necessário para um entendimento total do conteúdo abordado. A bacia do Rio Paraopeba é uma das principais bacias de Minas Gerais, apresentando características físicas complexas, empreendimentos econômicos históricos e uma grande importância para a população local. Para o estudo dessa área recomenda-se o trabalho de SOARES (2021) que realizou um trabalho meticuloso de caracterização do local e os impactos antrópicos sofridos. Para além do mapeamento geoquímico via solo, também é possível via análise de sedimentos fluviais e análise de água, essa última não tão comum. Existe uma ampla abordagem estatística que pode ser empregada, não sendo restrita a apenas àquelas empregadas neste trabalho. Para o entendimento integral sobre os diferentes métodos de mapeamento geoquímico e análise estatística aplicada, recomenda-se a leitura de LEÃO *et al.* (2019) e LARIZZATTI *et al.* (2014). Em 2025, a EMBRAPA publicou a versão mais atualizada, até o presente momento, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, bibliografia recomendada para a compreensão da pedogênese e fenômenos associados. Todos os dados resultantes foram comparados com a CONAMA 420/2009, diretriz vigente sobre a qualidade dos solos, bibliografia recomendada para o entendimento das normas e critérios ambientais tangentes ao uso do solo.

4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

As principais bases cartográficas foram obtidas a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-SISEMA).

Para a confecção do mapa geológico da região foi utilizado a base cartográfica do QF dos dados compilados por ENDO *et al.* (2019), que apresenta o detalhamento necessário das unidades litológicas e litodêmicas abordadas neste trabalho. Para a confecção de mapas a partir

de um modelo digital de elevação (MDE) como os mapas hipsométricos e de declividade, os dados foram retirados do portal Open Topography.

4.2.1 Base Cartográfica

As principais bases cartográficas foram obtidas a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-SISEMA).

Para a confecção do mapa geológico da região foi utilizado a base cartográfica do QF dos dados compilados por ENDO *et al.* (2019), que apresenta o detalhamento necessário das unidades litológicas e litodêmicas abordadas neste trabalho. Para a confecção de mapas a partir de um modelo digital de elevação (MDE) como os mapas hipsométricos e de declividade, os dados foram retirados do portal Open Topography.

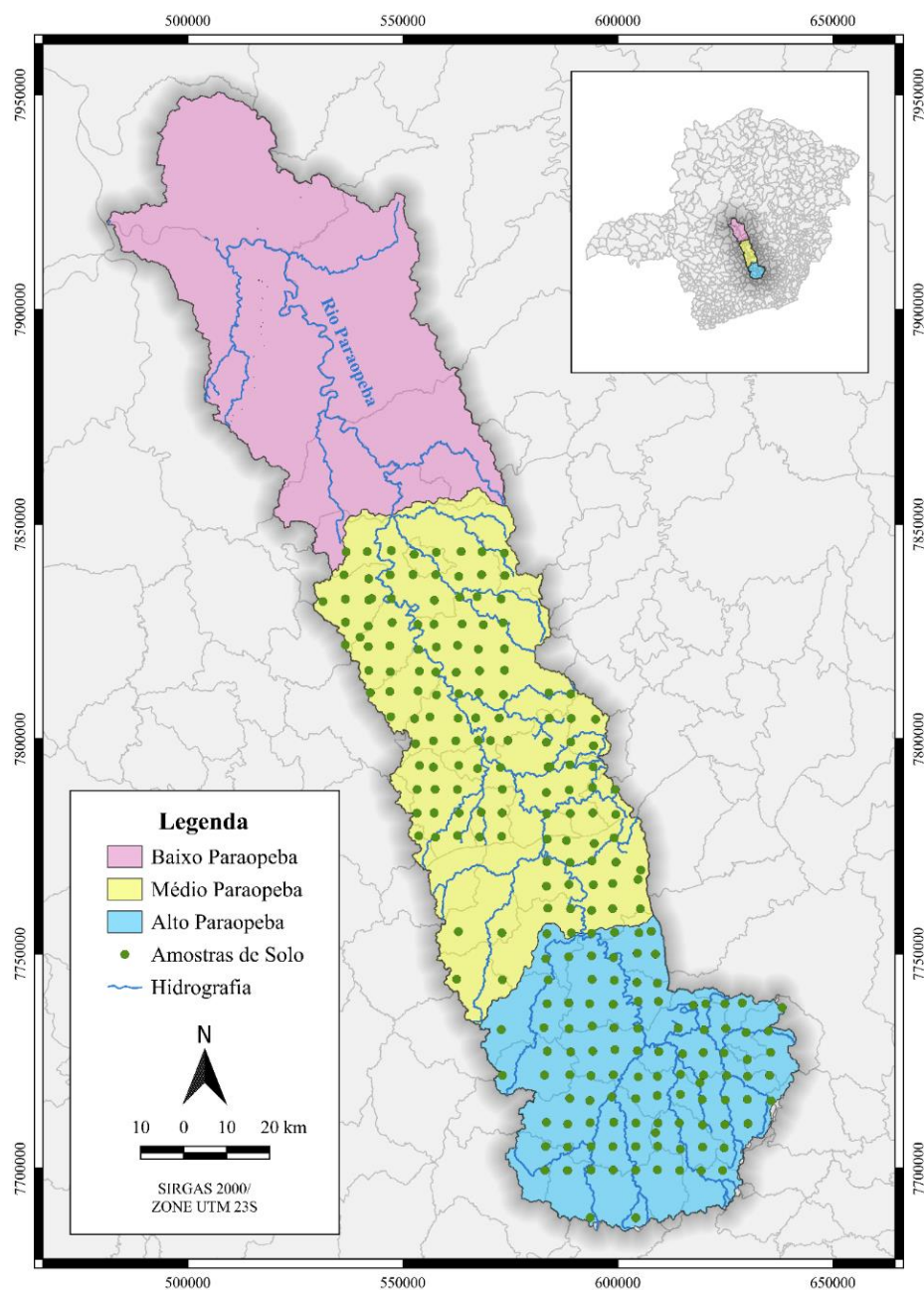
4.2.2 Dados Geoquímicos

Os dados geoquímicos originais utilizados e tratados neste trabalho são originários da campanha de amostragem de solos e sedimentos realizados no QF por LARIZZATTI *et al.* (2014) ao longo dos anos de 2008 e 2009. As amostras foram coletadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Materiais (CPRM). Durante a campanha, foram instauradas 256 estações para o levantamento da coleta de pelo menos 1 kg de material retirados do horizonte B. As amostras passaram por uma peneira de plástico com malha de 1 mm. Fragmentos consideravelmente maiores que essa fração, como porções rochosas e material vegetal, foram retirados a mão.

Para a preparação e análise das amostras, inicialmente o material foi seco à temperatura ambiente e posteriormente desagregados em gral de porcelana, no laboratório da CPRM. Em seguida o material foi peneirado em malha 80# e enviadas para o laboratório geoquímico responsável.

A densidade amostral deste trabalho, portanto, é de 1 amostra para cada 34,07 km². Para o presente estudo, serão analisados os elementos Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn em cada ponto amostral distribuídos conforme a Figura 14.

Figura 14 - Mapa da densidade amostral das coletas de solo realizados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.



Fonte: AUTOR, 2025.

4.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Todos os dados foram tratados a partir dos *softwares* Excel 2025 e MiniTab 18. A confecção dos mapas temáticos foi realizada a partir desses dados, e inseridos no *software* QGIS 3.34, conforme será detalhado no tópico de “Representação espacial dos dados”.

4.3.1 Análise univariada

Esse tipo de análise tem como objetivo identificar as distribuições normais de variáveis dentro do conjunto de dados, bem como calcular parâmetros estatísticos como medidas de tendência central (média e mediana), dispersão (variância e desvio padrão) e anomalias (*outliers*) e representações gráficas através de histogramas, tabelas de frequência e *boxplots*.

Dessa forma, a análise desses parâmetros auxilia não só na caracterização geoquímica de cada elemento, como também na identificação de padrões e distribuições (REIMANN *et al.*, 2008; LAPWORTH *et al.*, 2012), sendo uma ferramenta fundamental para estudos geoquímicos de natureza estatística. Dentre os principais métodos univariados, se destacam:

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

Para a análise estatística foram utilizados os dados dos elementos Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn via *software* MiniTab 18. Esses elementos foram selecionados devido a sua abundância na região (Al, Fe e Mn) e toxicidade (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn).

Para distinguir as concentrações dentro de intervalos de valores de *background* das anomalias geoquímicas foi realizada a partir da técnica de separação por faixa de concentração (REIMANN & GARRET, 2005; CARITAT *et al.*, 2007; CARRANZA, 2009). As anomalias geoquímicas foram determinadas através do método de “*Boxplot* Upper Fence (UIF)” baseado em TUKEY (1977). O gráfico de *boxplot* (Figura 13) separa os dados em quatro percentis iguais definidas como primeiro quartil (Q1), segundo quartil (Q2) e terceiro quartil (Q3), apresentando 25%, 50% e 75% dos dados, respectivamente. A faixa do terceiro quartil foi definida como o intervalo para os valores de *background*. O conjunto de valores situados entre Q1 e Q3 representam o *box* central ou IQR, intervalo interquartil, contendo aproximadamente 50% dos dados. O limite interno superior ou *Upper Inner Fence* (UIF) é calculado a partir da multiplicação do IQR por 1,5 vezes em direção aos valores máximos e mínimos, sendo esses dados considerados como os valores limiares superiores e inferiores. Os dados localizados acima do UIF são determinados como *outliers*, ou chamados de anomalias (MATSCHULLAT *et al.*, 2000; VICQ *et al.*, 2018; LEÃO *et al.*, 2019).

4.3.3 Legislação Vigente

Os resultados das análises geoquímicas serão comparados com os parâmetros estabelecidos pelas resoluções CONAMA 420/2009, que regulamentam a qualidade de sedimentos no Brasil.

A Resolução CONAMA 420/2009 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.

4.3.4 Representação Espacial dos Dados

Neste estudo, uma grande quantidade de dados de diferentes elementos químicos foi analisada. Nesse sentido, os mapas temáticos foram gerados com o intuito de apresentar esses dados de maneira espacial, permitindo uma melhor visualização dos dados e interpretação para a gestão das áreas impactadas.

Todas as amostras analisadas foram georreferenciadas a partir do *software* QGIS 3.34. Os mapas temáticos foram confeccionados a partir da metodologia de interpolação *Inverse Distance Weighted* (IDW). Essa ferramenta geostatística calcula o valor de um ponto a partir distância ponderada de um ponto amostral. Para a confecção dos mapas a partir da interpolação via IDW foi necessário definir o valor do expoente “ p ”, parâmetro responsável por controlar como a influência de pontos amostrais diminui com a distância. Para tal, foi definido o valor de $p = 2$ para representar os gradientes geoquímicos com a resolução espacial necessária e tamanho de pixel definido como 100, tanto para X, quanto Y (SHEPARD, 1968; PASSOS *et al.*, 2019).

A representação espacial dos dados geoquímicos foi realizada por meio de mapas temáticos, elaborados com auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), separando os dados em 5 quartis, para melhor visualização de regiões de valores baixos, médios e altos, e evidenciando pontos anômalos. 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

3.16, onde realizou-se a interpolação espacial das concentrações dos elementos selecionados, para isso utilizou-se o método de interpolação IDW 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).

5 RESULTADOS

Para a análise estatística dos elementos foram calculados uma série de parâmetros, conforme a Tabela 5, juntamente com a confecção dos mapas geoquímicos, histogramas e *boxplots* para o melhor entendimento da distribuição espacial de cada elemento.

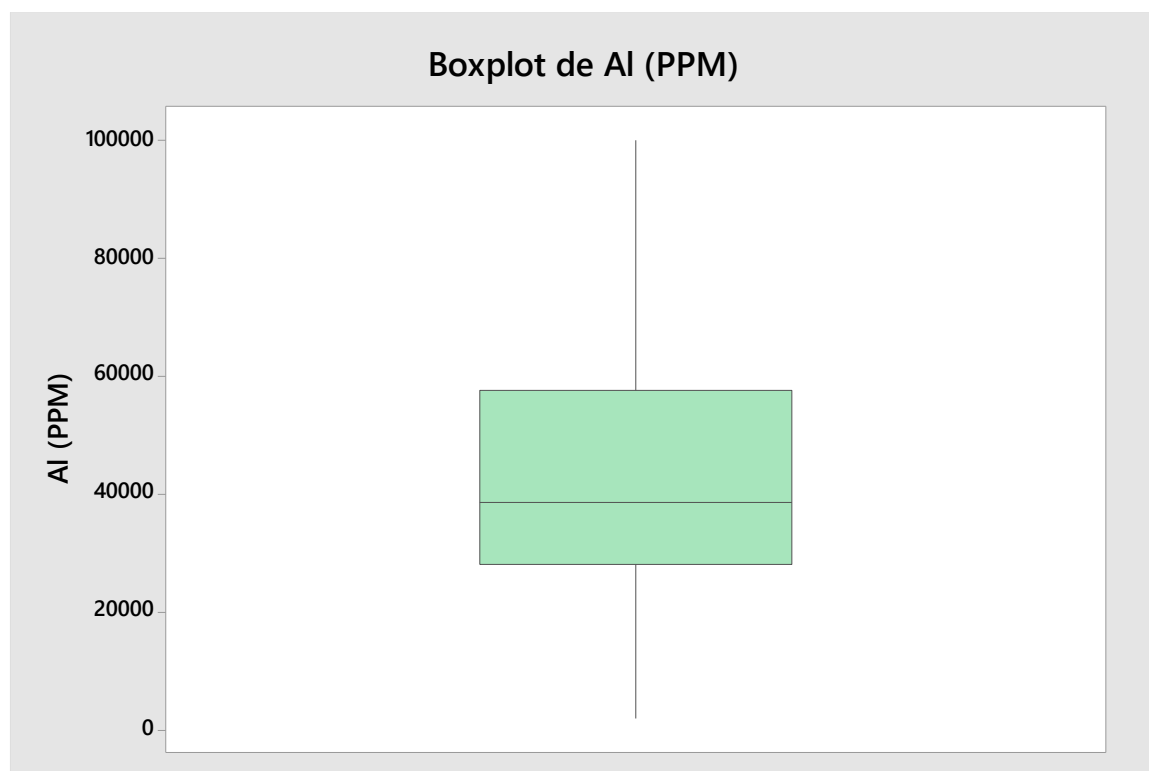
Tabela 5 – Parâmetros estatísticos dos elementos estudados na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Limite de Anomalia	Limiar Inferior de Background	Limiar Superior de Background
Al (PPM)	2,00E+03	1,00E+05	4,32E+04	3,87E+04	2,23E+04	1,02E+05	2,80E+04	5,77E+04
As (PPM)	0,05	422,00	9,40	2,00	34,67	10,75	1,00	4,90
Cd (PPM)	0,01	0,25	0,02	0,01	0,03	0,04	0,01	0,02
Cr (PPM)	0,03	898,90	75,26	33,20	120,50	225,60	9,10	95,70
Cu (PPM)	0,69	257,11	21,70	14,92	24,16	62,98	6,30	28,97
Fe (PPM)	2,10E+03	3,07E+05	4,63E+04	3,64E+04	3,97E+04	1,31E+05	1,89E+04	6,38E+04
Hg (PPB)	2,50	388,00	45,13	37,00	36,57	101,50	24,00	55,00
Mn (PPM)	9,00E+00	1,00E+04	2,79E+02	1,26E+02	8,98E+02	4,62E+02	7,20E+01	2,28E+02
Ni (PPM)	0,40	245,80	14,47	6,50	23,58	36,40	3,40	16,60
Pb (PPM)	3,61	121,89	19,92	16,55	16,01	43,93	10,38	23,80
Zn (PPM)	1,80	375,80	24,57	19,50	26,81	53,50	12,50	28,90

Fonte: AUTOR, 2025.

5.1 ALUMÍNIO

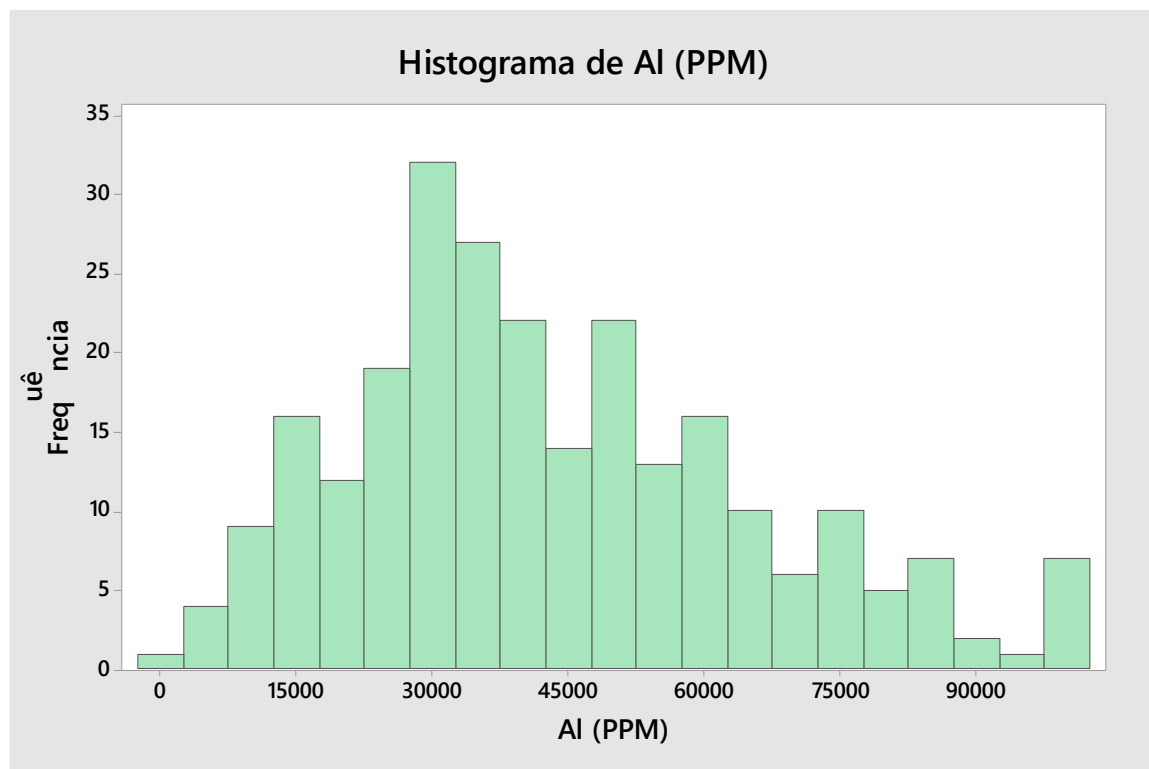
As concentrações de alumínio (Al) no local apresentaram uma variação de 2,00E+03 a 1,00E+05 ppm, com valores de *background* variando de 2,80+E04 a 5,77E+04 ppm, mediana igual a 3,87E+04 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 1,02E+05 ppm, logo, não foi detectado nenhuma anomalia, como ilustra o *boxplot* abaixo.

Figura 15 - Gráfico *boxplot* para concentração de alumínio.

Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Al, em um espectro geral, apresentam uma frequência crescente até $3,00+E04$ ppm, seguido por um padrão decrescente após este intervalo, como pode-se observar no histograma da Figura 16. A maioria das amostras, portanto, apresentaram valores entre $3,00+E04$ e $5,00+E04$ ppm.

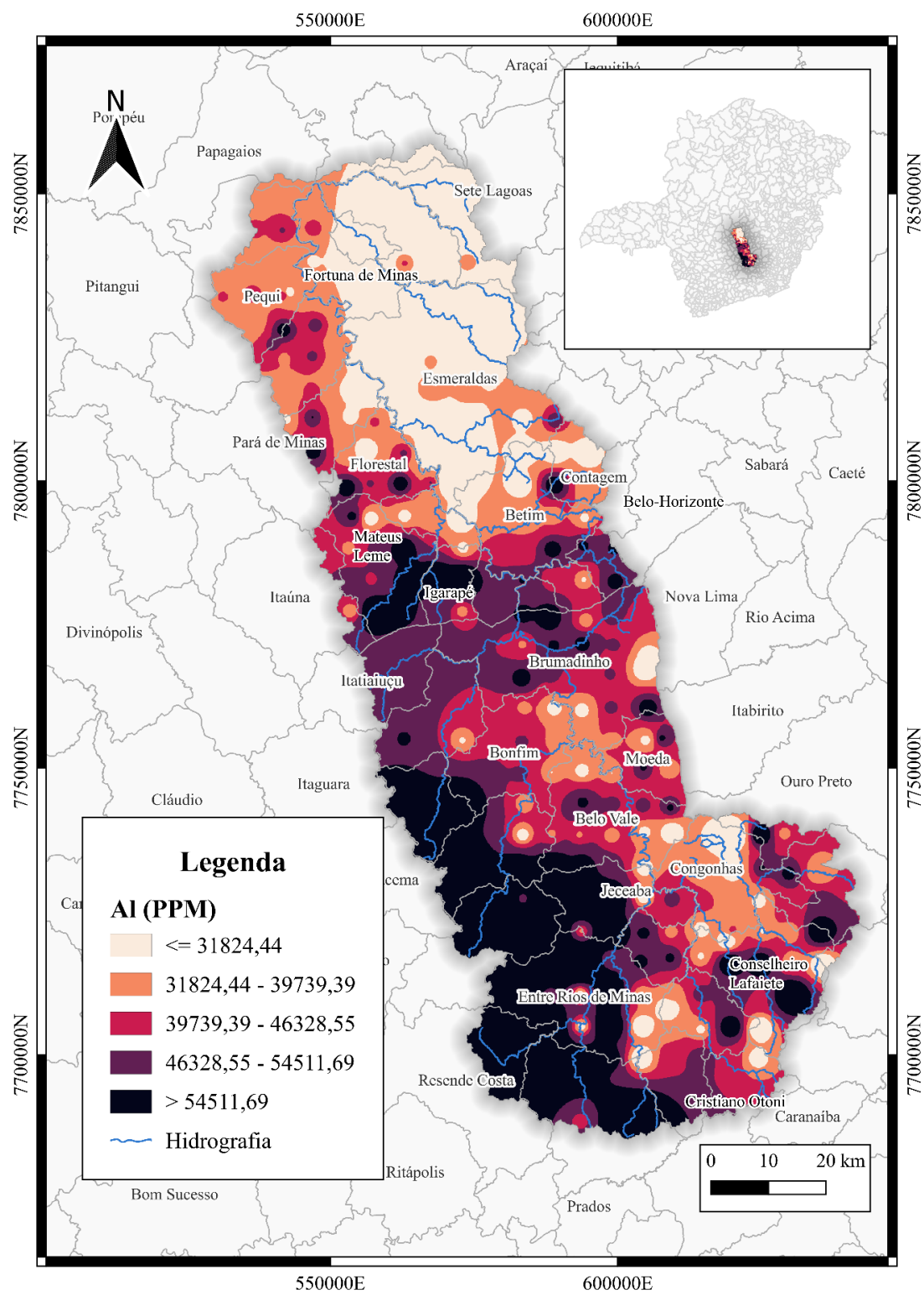
Figura 16 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de alumínio.



Fonte: AUTOR, 2025.

Não foram identificadas anomalias de alumínio (Figura 17), entretanto, a porção sudoeste do Alto Paraopeba apresentou os maiores valores deste elemento. Já os menores valores estão localizados na região noroeste do Médio Paraopeba.

Figura 17 - Mapa do *background* geoquímico do alumínio em partes por milhão.

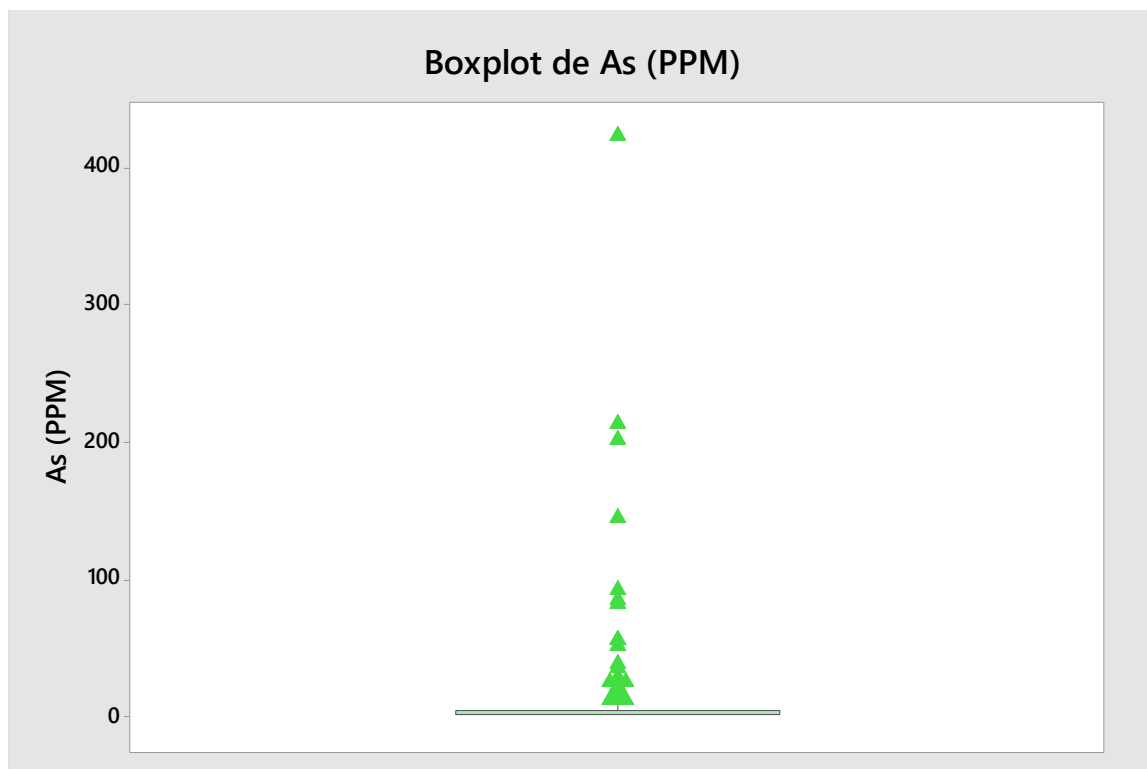


Fonte: AUTOR, 2025.

5.2 ARSÊNIO

As concentrações de arsênio (As) no local apresentaram uma variação de 0,05 a 422,00 ppm, com valores de *background* variando de 1,00 a 4,90 ppm, mediana igual a 2,00 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 10,75 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

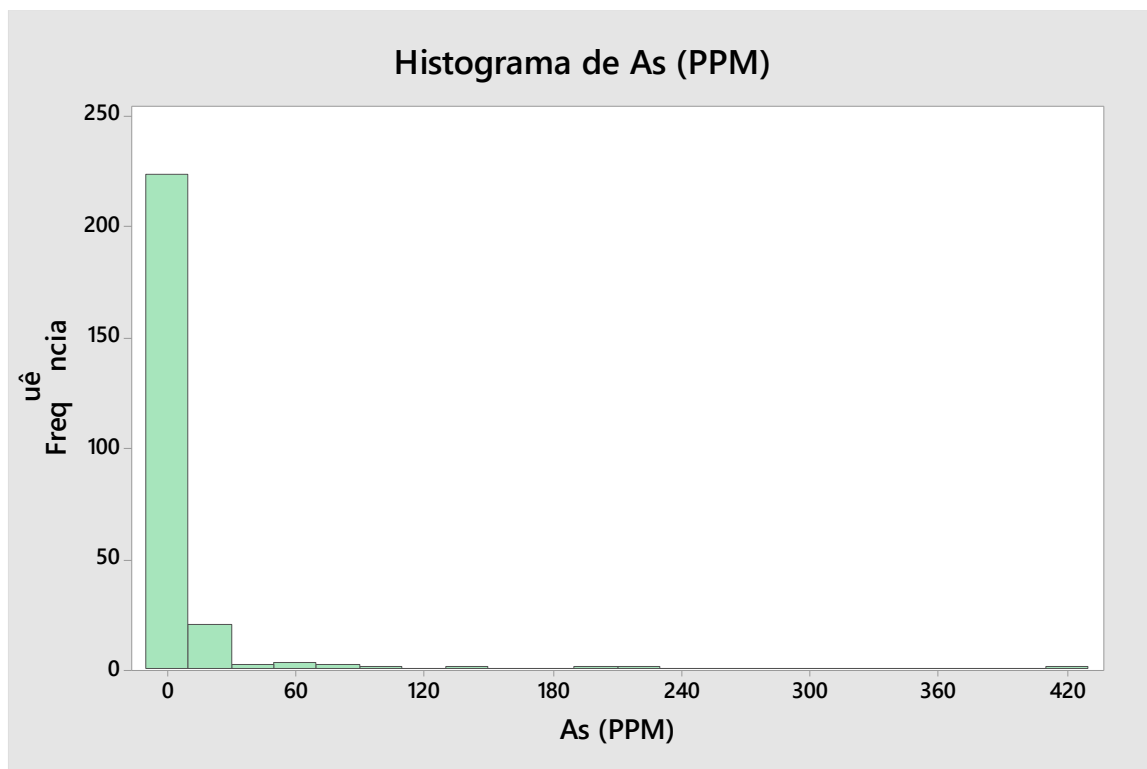
Figura 18 - Gráfico *boxplot* para concentração de arsênio. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de As em um espectro geral, apresentam uma alta concentração de amostras com até 15,00 ppm, com anomalias entre 180,00 e 240,00 ppm e até acima de 420,00 ppm, conforme o histograma da Figura 19.

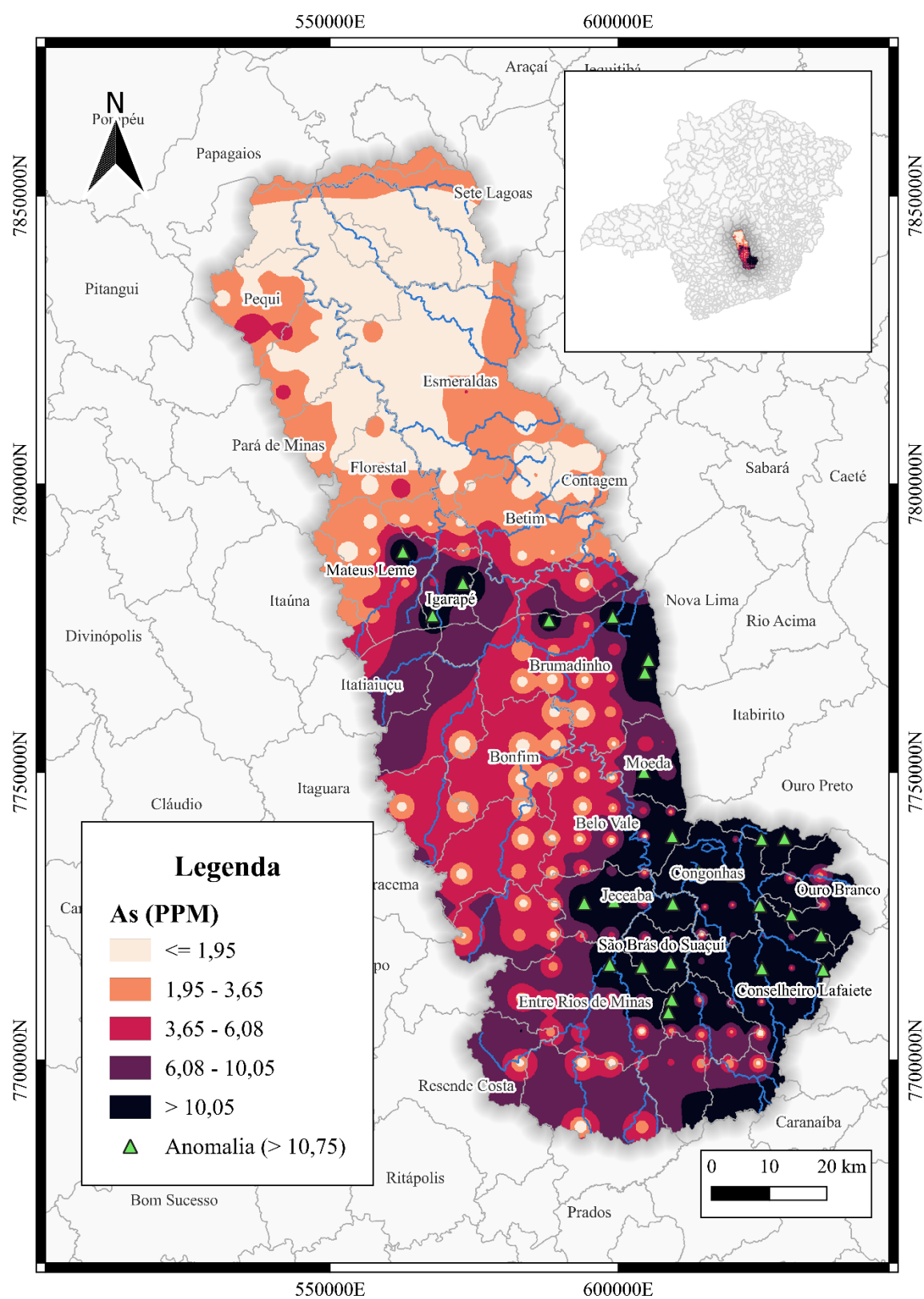
Figura 19 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de arsênio.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de As (Figura 20) é mais expressiva na sub-bacia do Alto Paraopeba, principalmente nas cidades de Conselheiro Lafaiete, Jeceaba, Ouro Branco, São Brás do Suaçuí e Ouro Preto. Entretanto, a sub-bacia do Médio Paraopeba também apresenta focos de anomalia em Igarapé, Mateus Leme e, principalmente, Brumadinho. As menores concentrações de As estão localizadas ao norte do Médio Paraopeba.

Figura 20 - Mapa do *background* geoquímico do arsênio em partes por milhão.

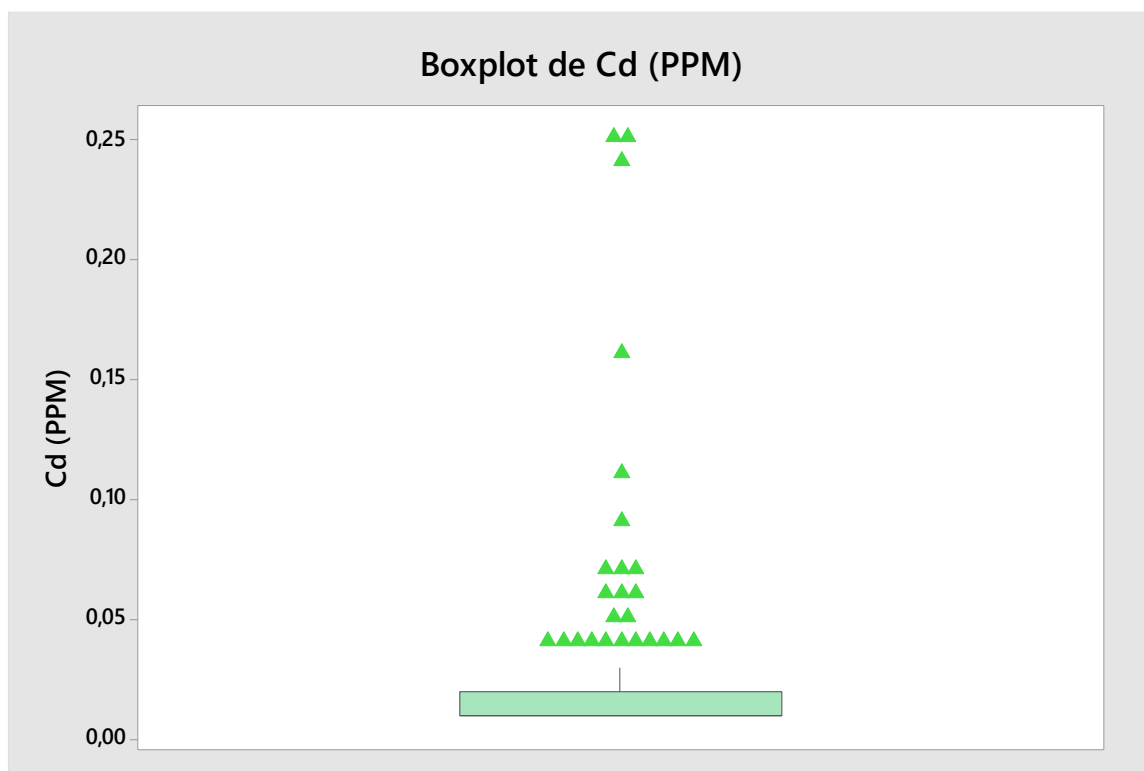


Fontes: AUTOR, 2025.

5.3 CÁDMIO

As concentrações de cádmio (Cd) no local apresentaram uma variação de 0,01 a 0,25 ppm, com valores de *background* variando de 0,01 a 0,02 ppm, mediana igual a 0,01 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 0,04 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

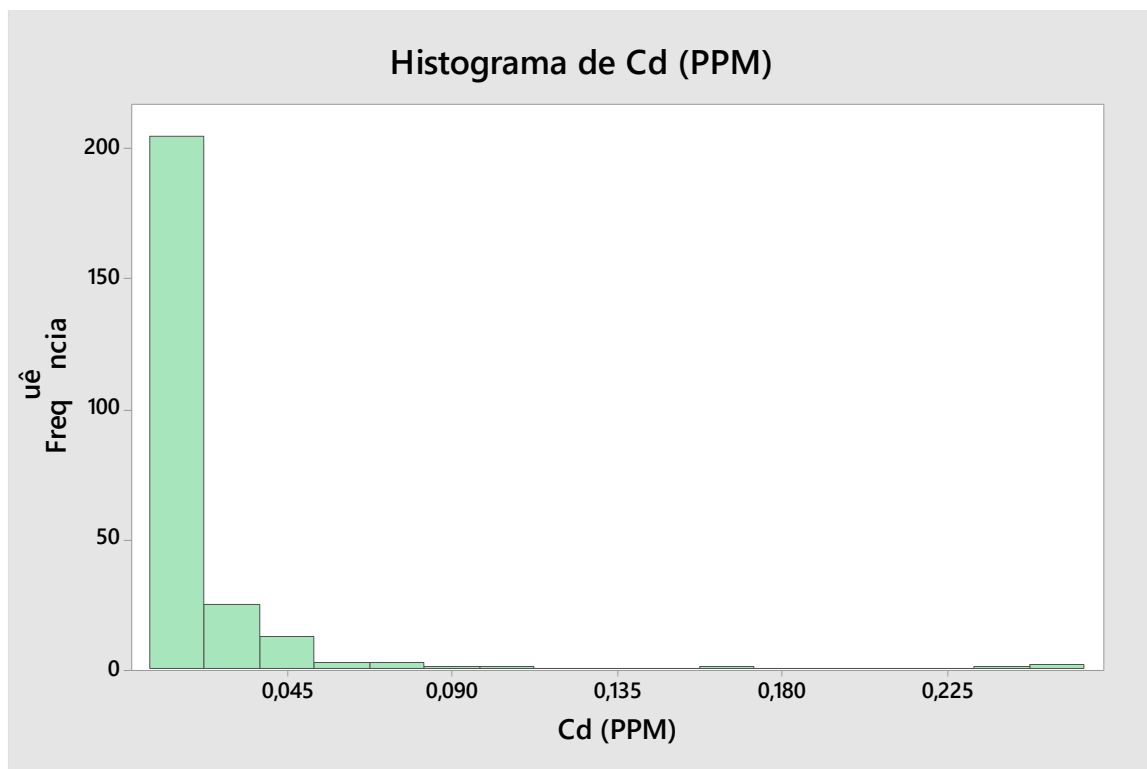
Figura 21 - Gráfico *boxplot* para concentração de cádmio. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Cd em um espectro geral, apresentam uma alta concentração de amostras com até 0,030 ppm, com anomalias entre 0,04 e 0,12 ppm e até acima de 0,23 ppm, conforme o histograma da Figura 22.

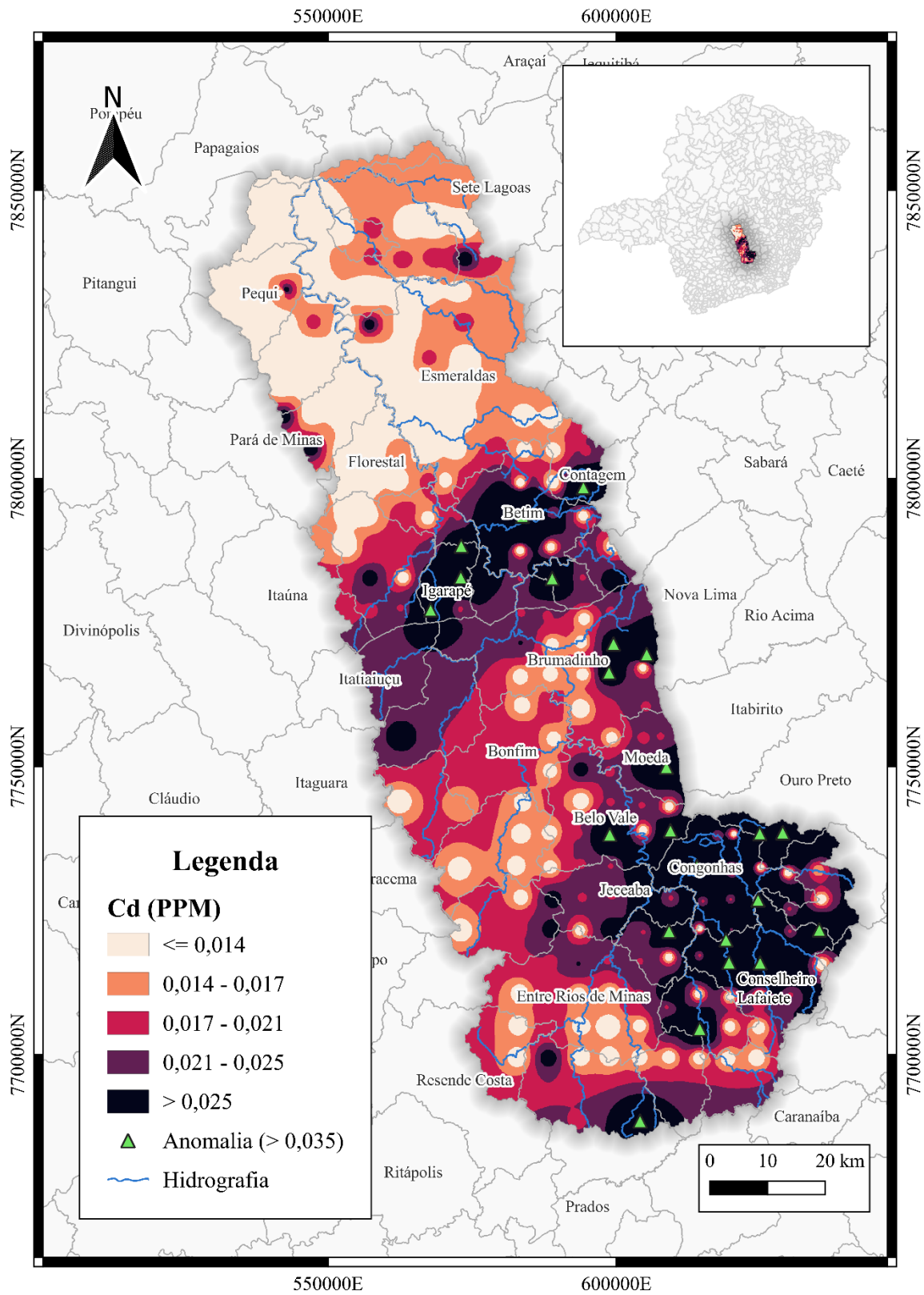
Figura 22 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de cádmio.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Cd (Figura 23) é mais expressiva na sub-bacia do Alto Paraopeba, principalmente nas cidades de Conselheiro Lafaiete, Ouro Preto, Jeceaba e Belo Vale. Entretanto, a sub-bacia do Médio Paraopeba também apresenta anomalias tanto a leste, como em Brumadinho, Betim, Contagem, quanto em sua porção centro-oeste, próximo a Igarapé e Mateus Leme. As menores concentrações de Cd estão localizadas ao norte do Médio Paraopeba, sem nenhuma anomalia nessa porção.

Figura 23 - Mapa do *background* geoquímico do cádmio em partes por milhão.

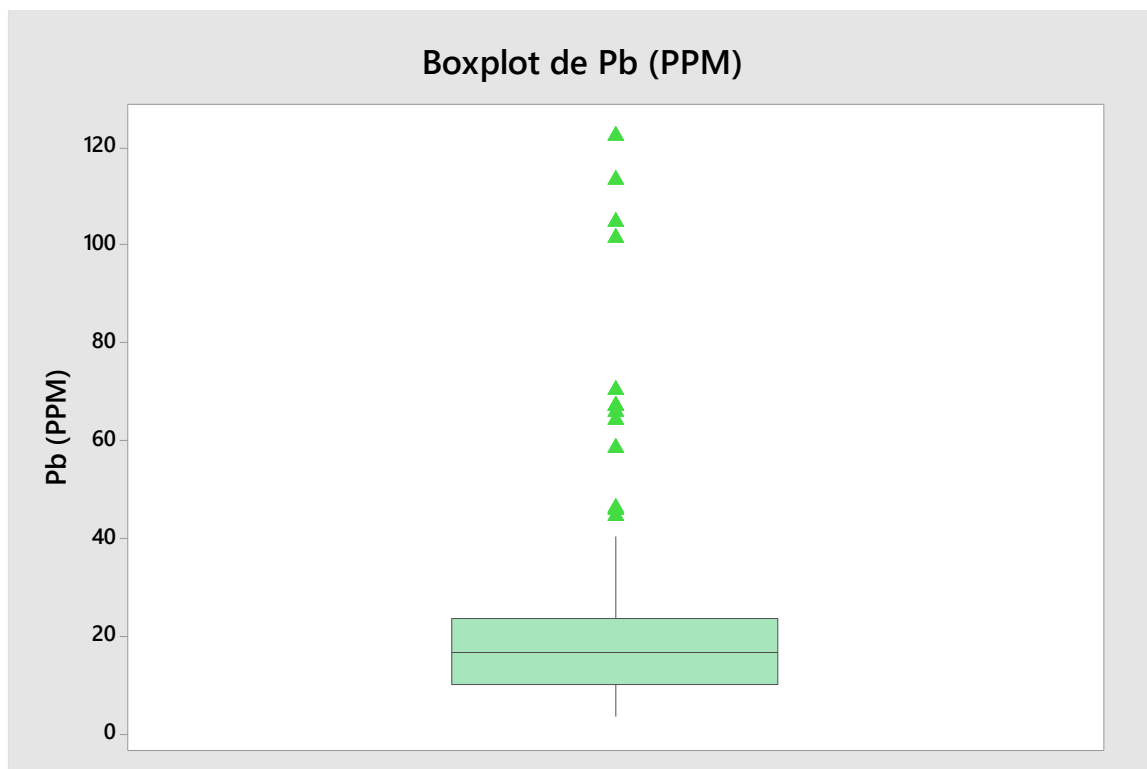


Fonte: AUTOR, 2025.

5.4 CHUMBO

As concentrações de chumbo (Pb) no local apresentaram uma variação de 3,61 a 121,89 ppm, com valores de *background* variando de 10,38 a 23,80 ppm, mediana igual a 16,55 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 43,93 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

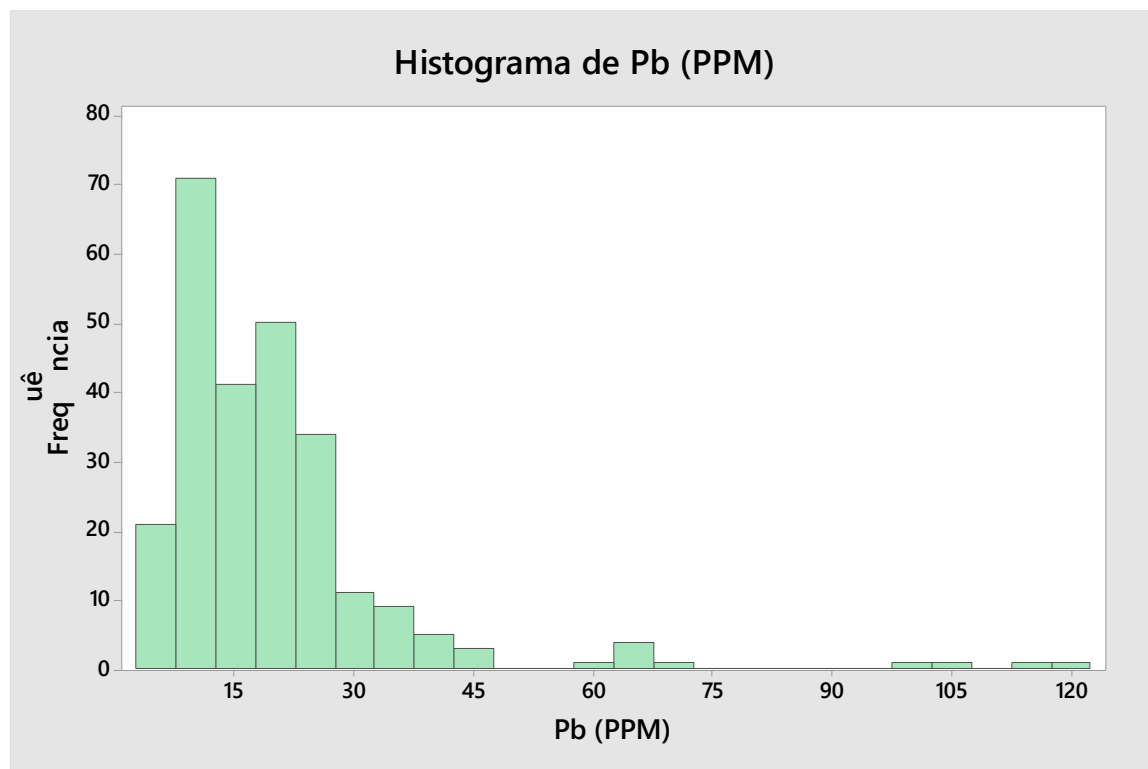
Figura 24 - Gráfico *boxplot* para concentração de chumbo. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Pb, em um espectro geral, apresentam uma frequência concentrada em 10 ppm, seguido por um padrão decrescente após este intervalo, como pode-se observar no histograma da Figura 25. A maioria das amostras, portanto, apresentaram valores entre 7,50 e 25,00 ppm.

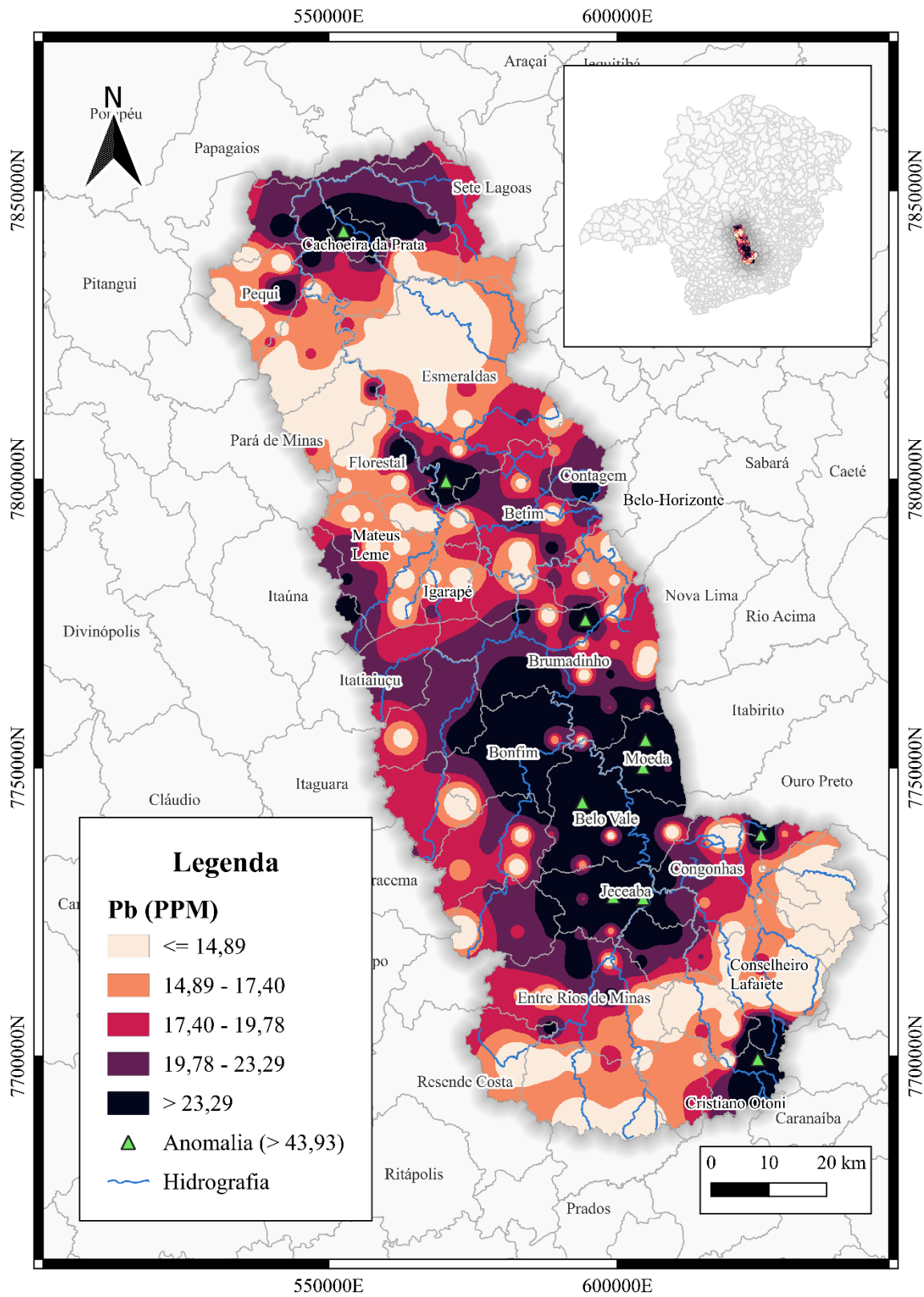
Figura 25 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de chumbo.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Pb (Figura 26) é mais dispersa, com anomalias entre a fronteira do Alto e Médio Paraopeba, nas cidades de Moeda, Belo Vale e Brumadinho. As menores concentrações de Pb estão localizadas ao norte do Médio Paraopeba, com anomalias e altas concentrações em locais pontuais como em Cachoeira da Prata, e no sul do Alto Paraopeba como em Conselheiro Lafaiete.

Figura 26 - Mapa do *background* geoquímico do chumbo em partes por milhão.

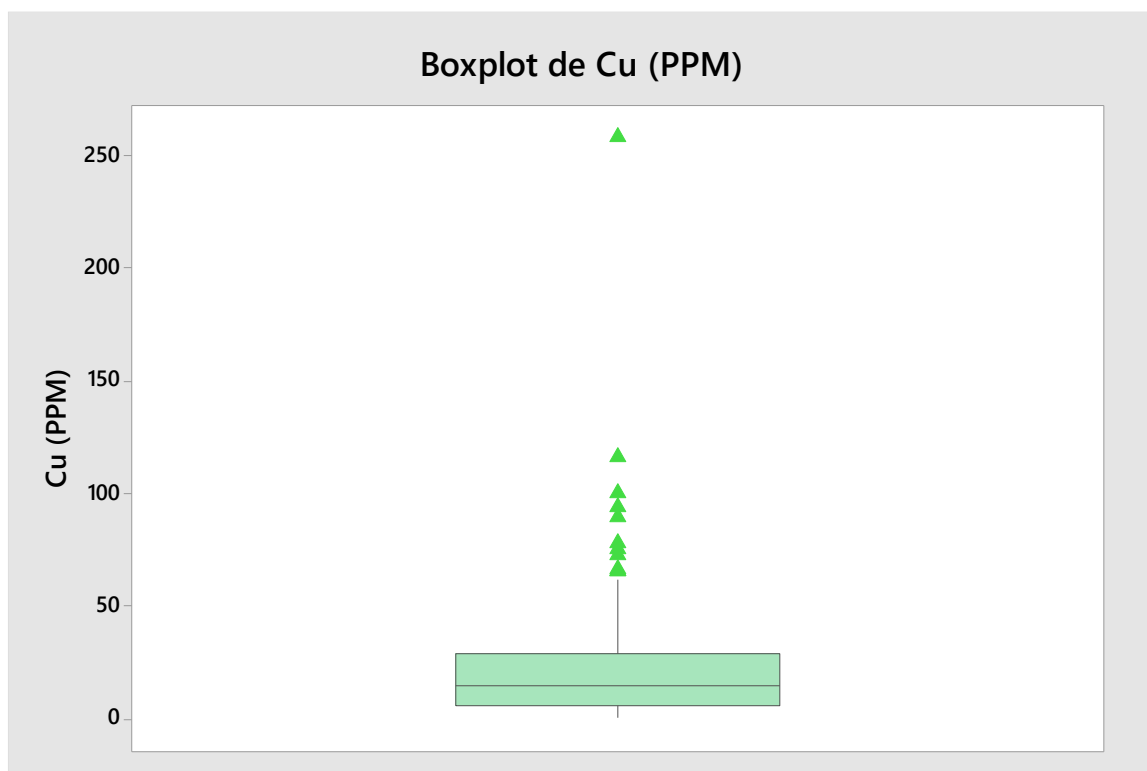


Fonte: AUTOR, 2025.

5.5 COBRE

As concentrações de cobre (Cu) no local apresentaram uma variação de 0,69 a 257,11 ppm, com valores de *background* variando de 6,30 a 28,97 ppm, mediana igual a 14,92 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 62,98 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

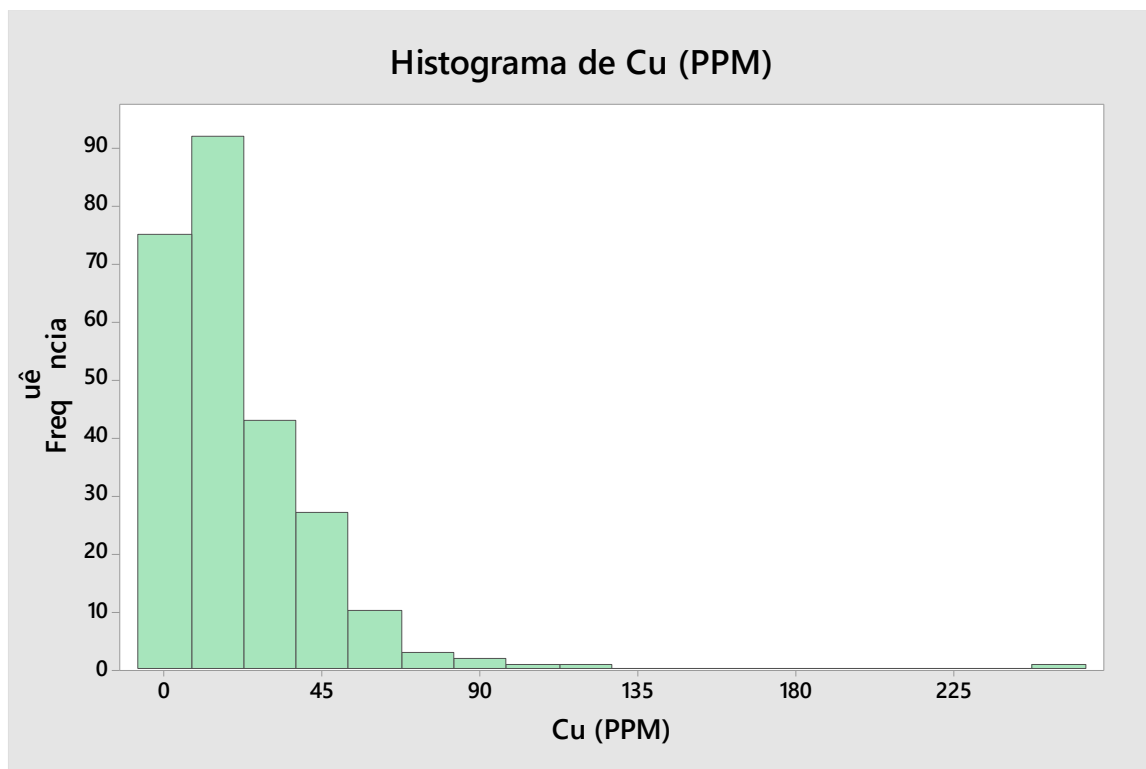
Figura 27 - Gráfico *boxplot* para concentração de cobre. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Cu, em um espectro geral, variam de 0,00 a 30,00 ppm, como pode-se observar no histograma da Figura 28, apresentando uma frequência inversamente proporcional à concentração após esse intervalo de valores. Apesar dos valores médios, algumas amostras apresentam valores acima de 250,00 ppm.

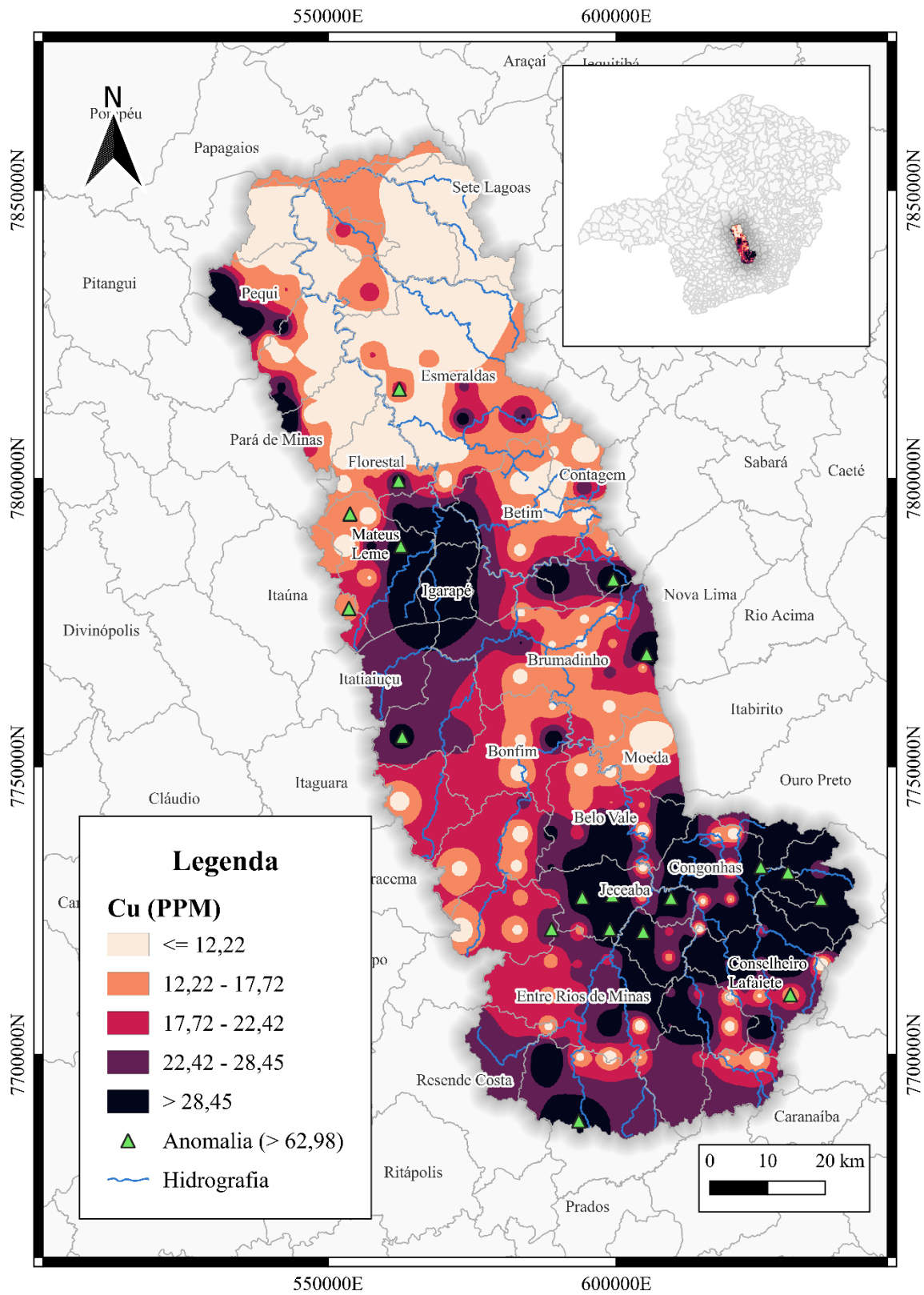
Figura 28 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de cobre.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Cu (Figura 29) é mais expressiva na sub-bacia do Alto Paraopeba, principalmente nas cidades de Jeceaba, Congonhas e Conselheiro Lafaiete. Entretanto, a sub-bacia do Médio Paraopeba também apresenta anomalias tanto a leste, como em Brumadinho, quanto em sua porção centro-oeste, próximo a Igarapé e Mateus Leme. As menores concentrações de Cu estão localizadas ao norte do Médio Paraopeba, com anomalias e altas concentrações em locais pontuais como em Esmeraldas, Pequi e Pará de Minas.

Figura 29 - Mapa do *background* geoquímico do cobre em partes por milhão.

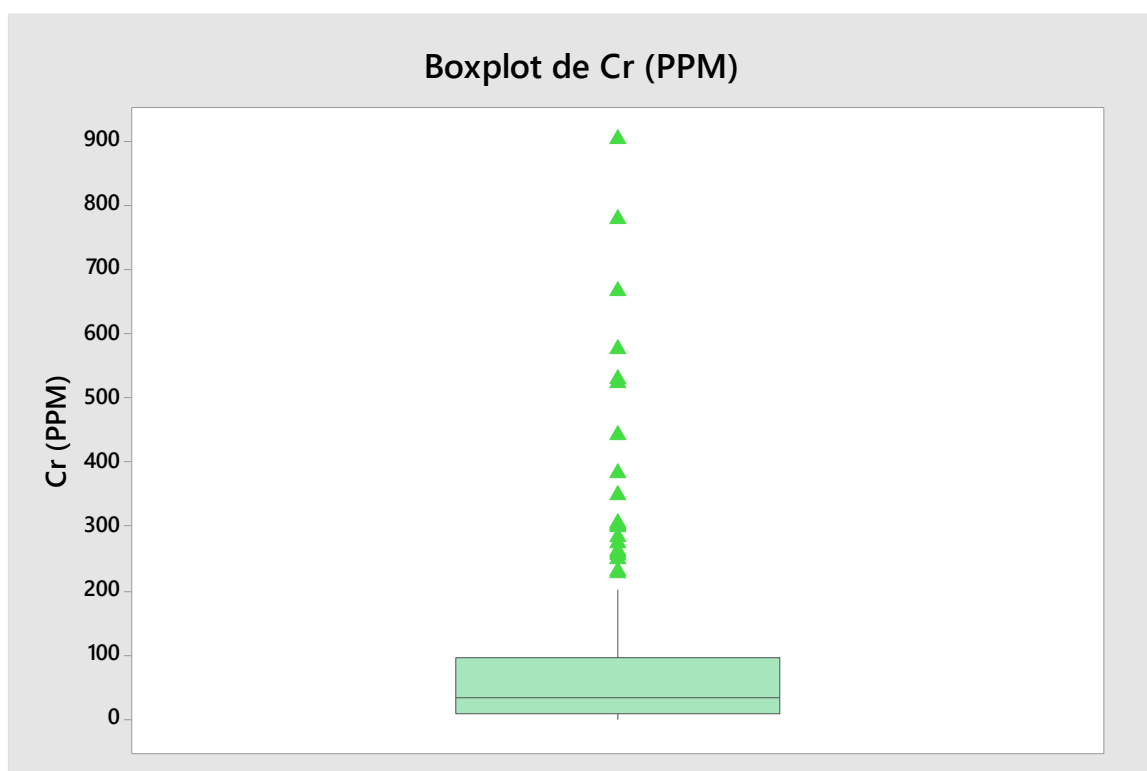


Fonte: AUTOR, 2025.

5.6 CROMO

As concentrações de cromo (Cr) no local apresentaram uma variação de 0,03 a 898,90 ppm, com valores de *background* variando de 9,10 a 95,70 ppm, mediana igual a 33,20 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 225,60 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

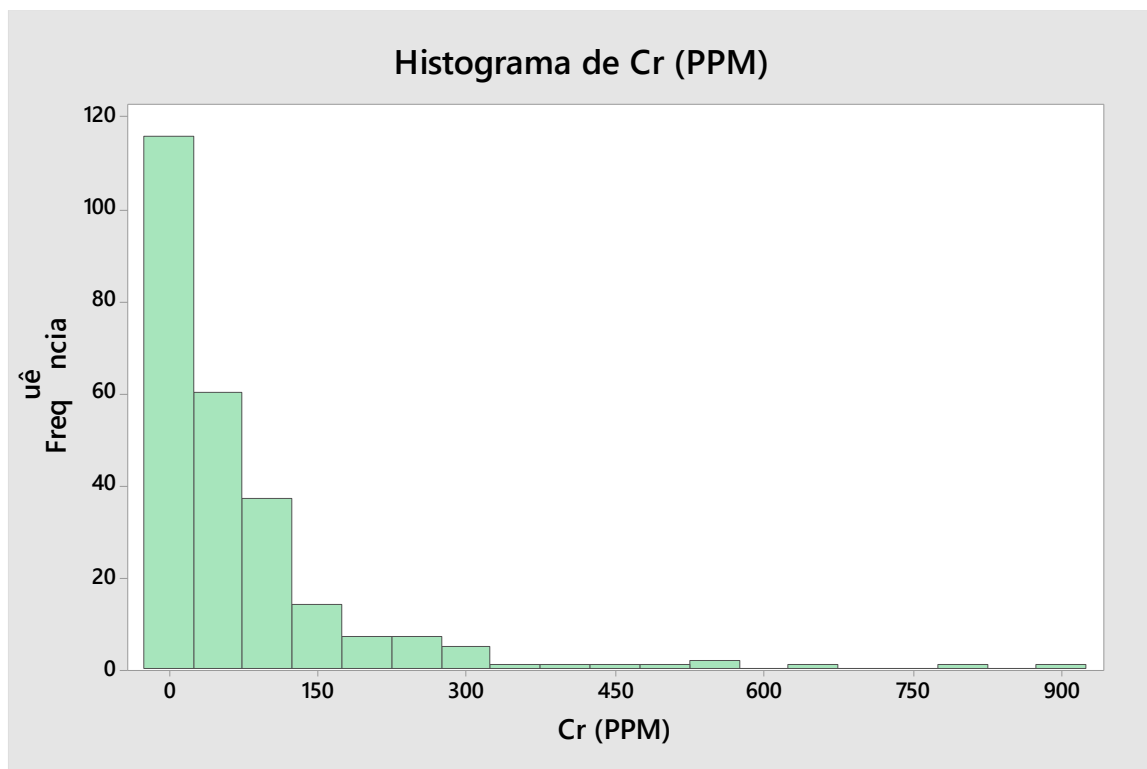
Figura 30 - Gráfico *boxplot* para concentração de cromo. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Cr apresentam um pico de concentração logo nas menores concentrações seguindo com um padrão decrescente, como pode-se observar no histograma da Figura 31. A maioria das amostras, portanto, apresentaram valores entre 0,00 e 150,00 ppm.

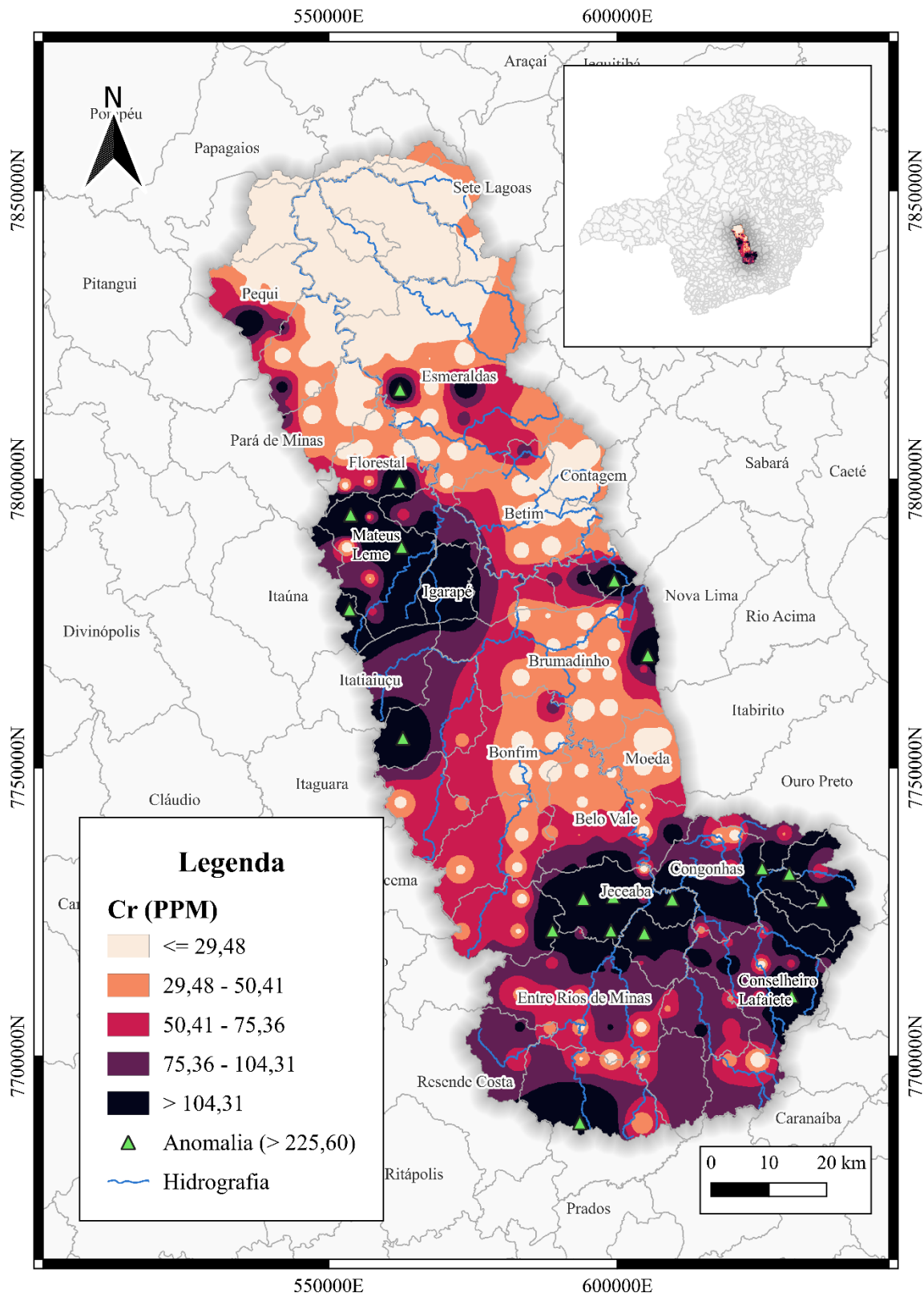
Figura 31 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de cromo.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Cr (Figura 32) é mais expressiva em uma faixa da sub-bacia do Alto Paraopeba, principalmente nas cidades de Jeceaba e Congonhas. Entretanto, a sub-bacia do Médio Paraopeba também apresenta um núcleo de anomalias em sua porção centro-oeste, próximo a Mateus Leme. As menores concentrações de Cr estão localizadas ao norte do Médio Paraopeba.

Figura 32 - Mapa do *background* geoquímico do cromo em partes por milhão.

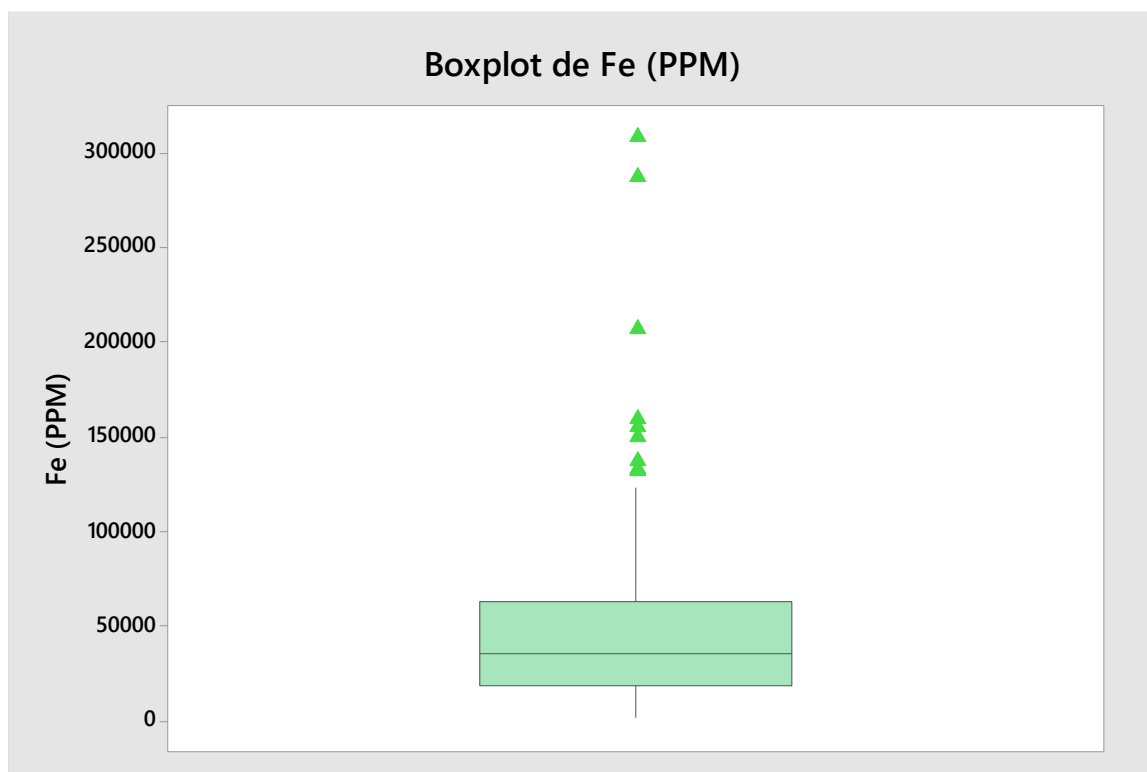


Fonte: AUTOR, 2025.

5.7 FERRO

As concentrações de ferro (Fe) no local apresentaram uma variação de 2100,00 a 307000,00 ppm, com valores de *background* variando 18900,00 a 63800,00 ppm, mediana igual a 36400,00 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 131000,00 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

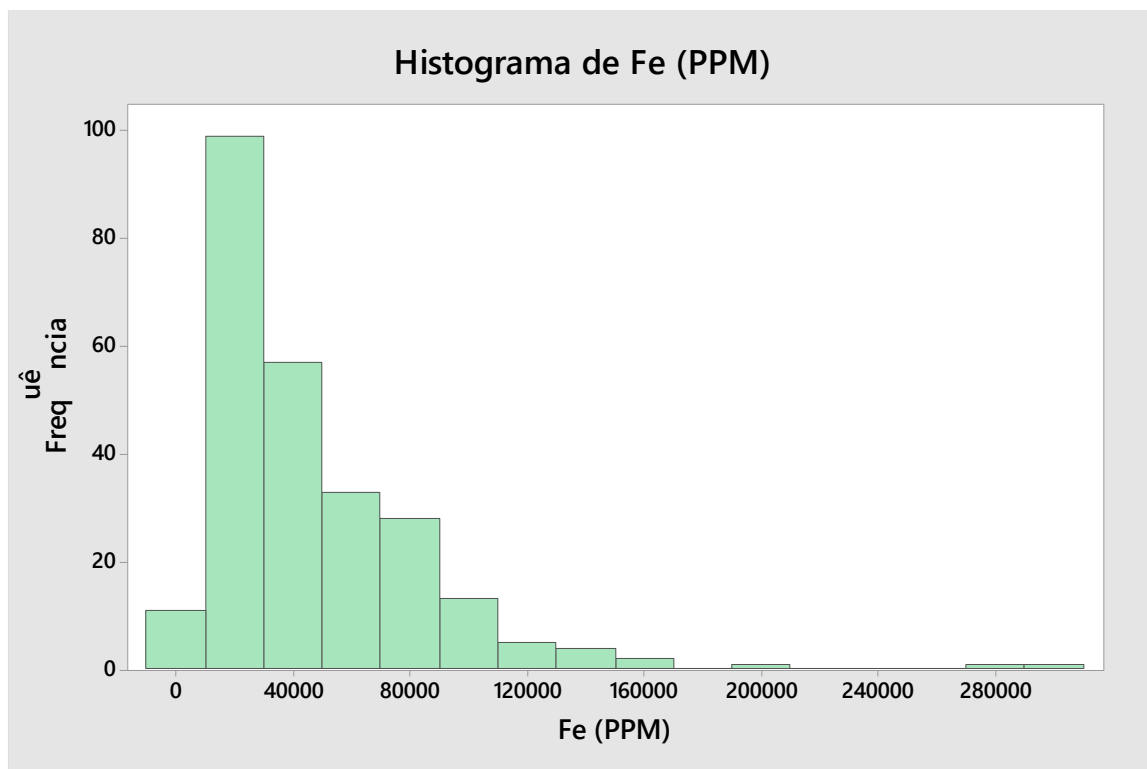
Figura 33 - Gráfico *boxplot* para concentração de ferro. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Fe apresentam um pico de concentração logo nas menores concentrações seguindo com um padrão decrescente, como pode-se observar no histograma da Figura 34. A maioria das amostras, portanto, apresentaram valores entre 15000,00 e 50000,00 ppm.

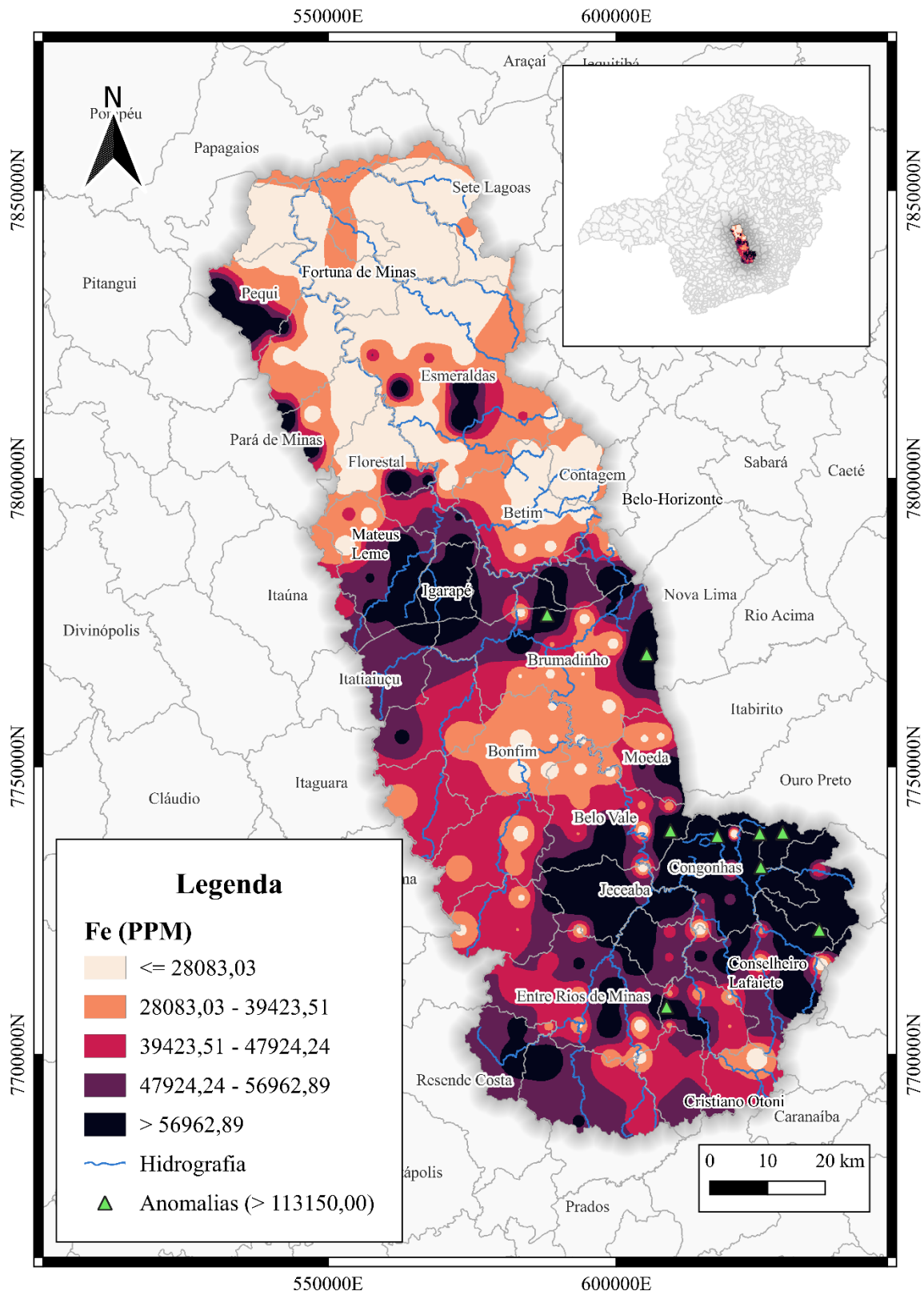
Figura 34 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de ferro.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Fe (Figura 35) é mais expressiva na sub-bacia do Alto Paraopeba, principalmente nas cidades de Ouro Preto e Congonhas. Entretanto, a sub-bacia do Médio Paraopeba também apresenta anomalia na cidade de Brumadinho. As menores concentrações de Fe estão localizadas ao norte do Médio Paraopeba.

Figura 35 - Mapa do *background* geoquímico do ferro em partes por milhão.

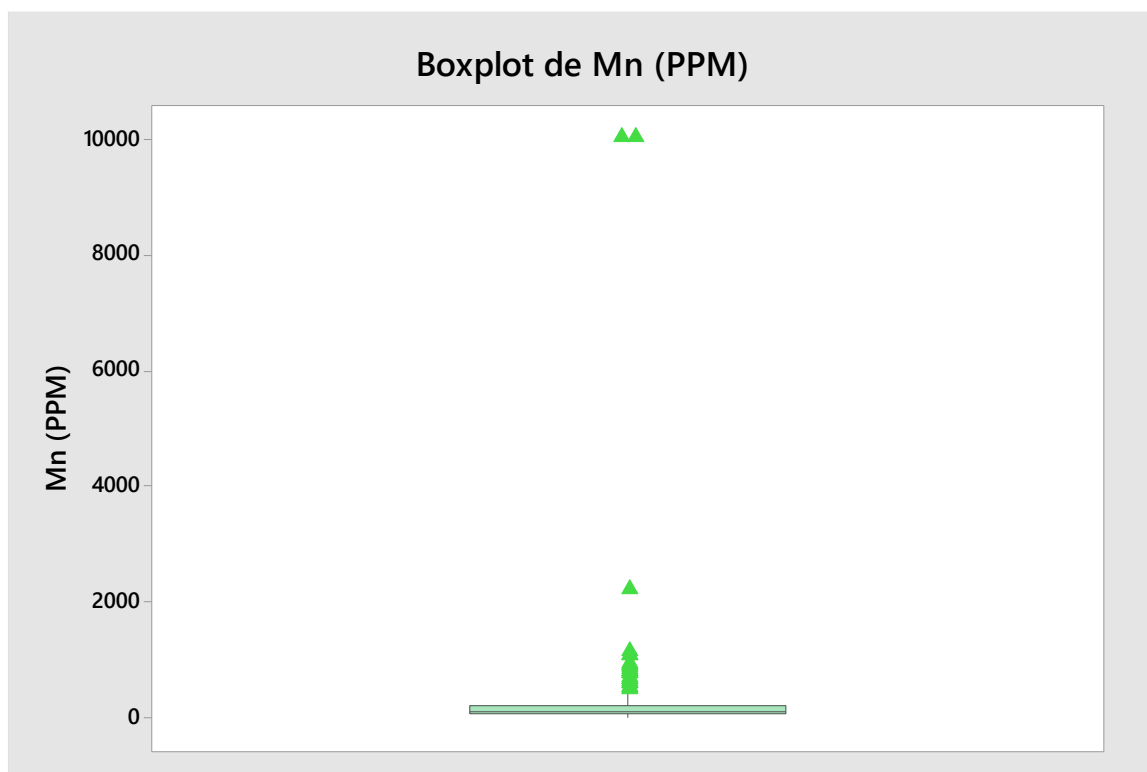


Fonte: AUTOR, 2025.

5.8 MANGANÊS

As concentrações de manganês (Mn) no local apresentaram uma variação de 9,00 a 100000,00 ppm, com valores de *background* variando de 72,00 a 228,00 ppm, mediana igual a 126,00 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 462,00 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

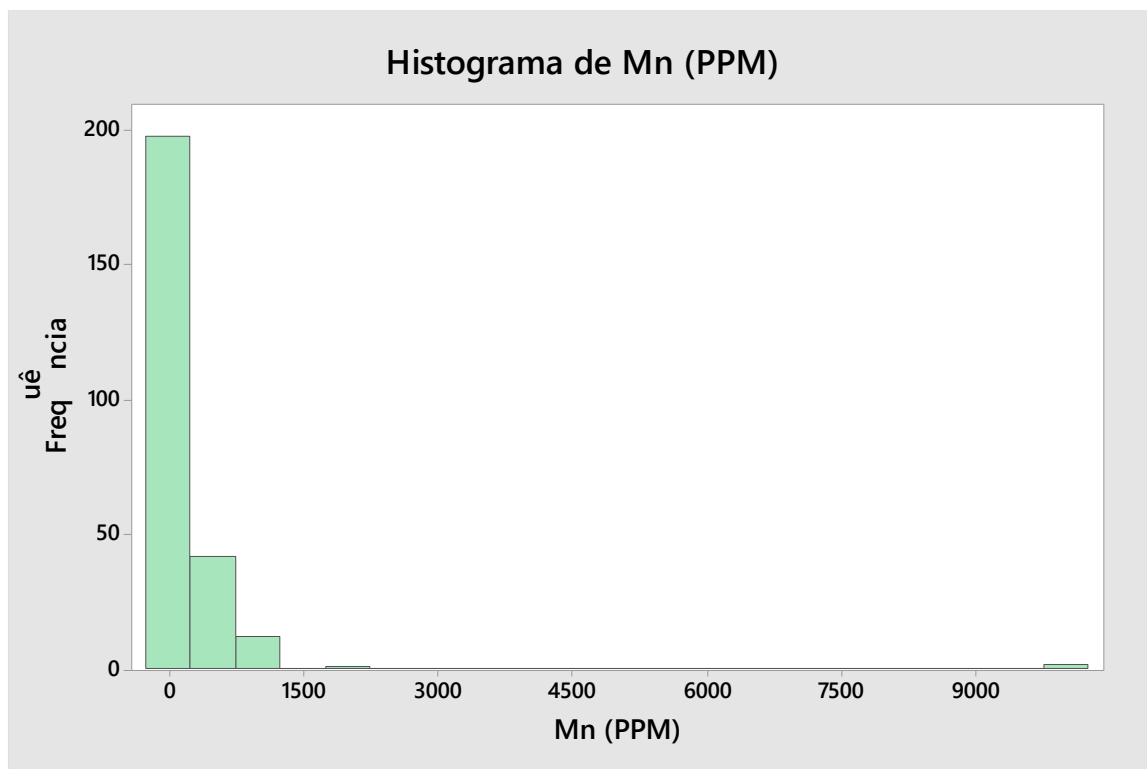
Figura 36 - Gráfico *boxplot* para concentração de manganês. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Mn apresentam um pico de concentração logo nas menores concentrações seguindo com um padrão decrescente, como pode-se observar no histograma da Figura 37. A maioria das amostras, portanto, apresentaram valores entre 0,00 e 500,00 ppm.

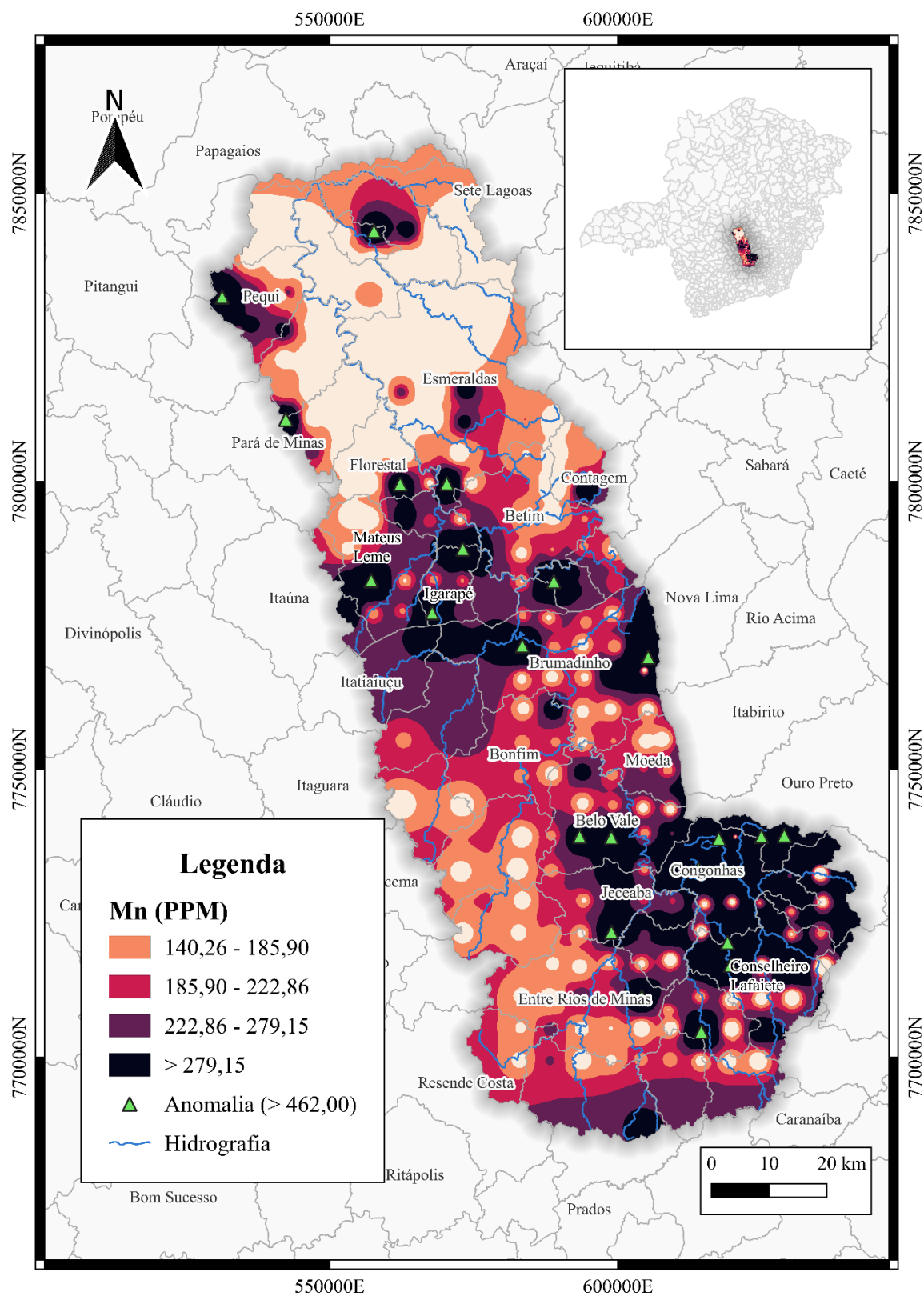
Figura 37 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de manganês.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Mn (Figura 38) é mais expressiva na sub-bacia do Alto Paraopeba, principalmente nas cidades de Congonhas, Ouro Preto e Belo Vale. Entretanto, a sub-bacia do Médio Paraopeba também apresenta anomalias tanto a leste, como em Brumadinho, quanto em sua porção centro-oeste, próximo a Igarapé e Mateus Leme. As menores concentrações de Mn estão localizadas ao norte do Médio Paraopeba, com anomalias e altas concentrações em locais pontuais como em Pequi e Pará de Minas.

Figura 38 - Mapa do *background* geoquímico do manganês em partes por milhão.

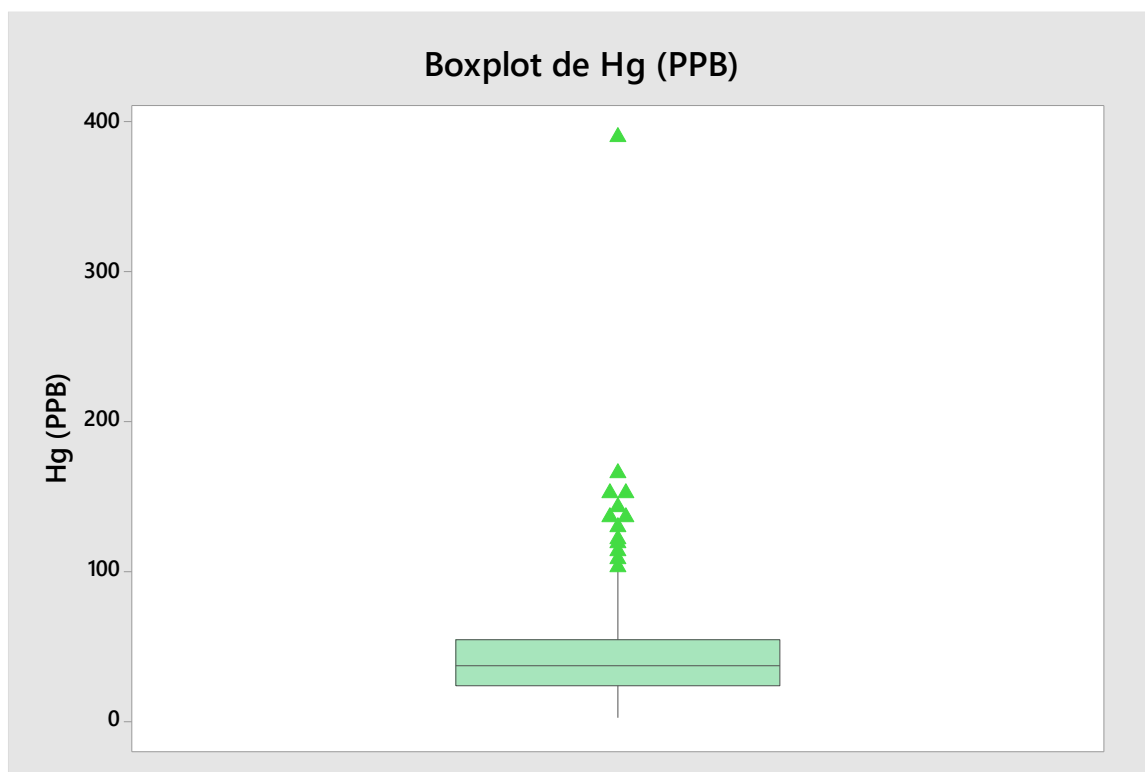


Fonte: AUTOR, 2025.

5.9 MERCÚRIO

As concentrações de mercúrio (Hg) no local apresentaram uma variação de 2,50 a 388,00 ppb, com valores de *background* variando de 24,00 a 55,00 ppb, mediana igual a 37,00 ppb, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 101,50 ppb, como ilustra o *boxplot* abaixo.

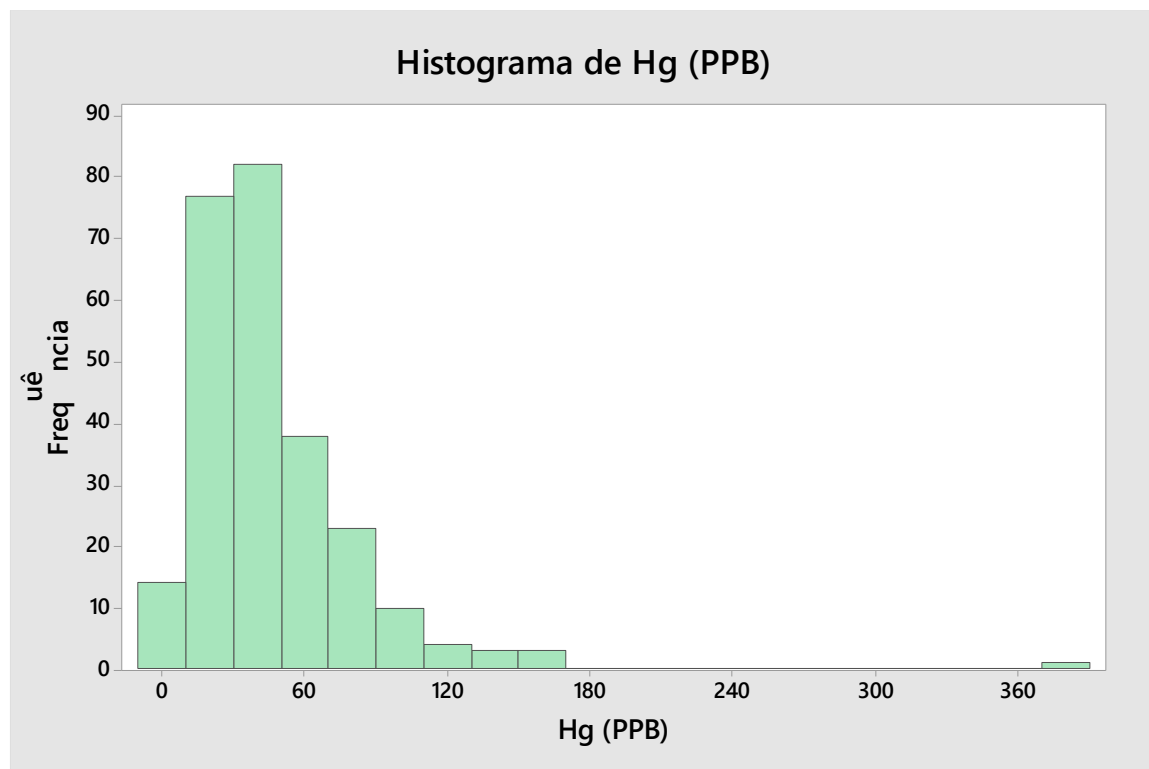
Figura 39 - Gráfico *boxplot* para concentração de mercúrio. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

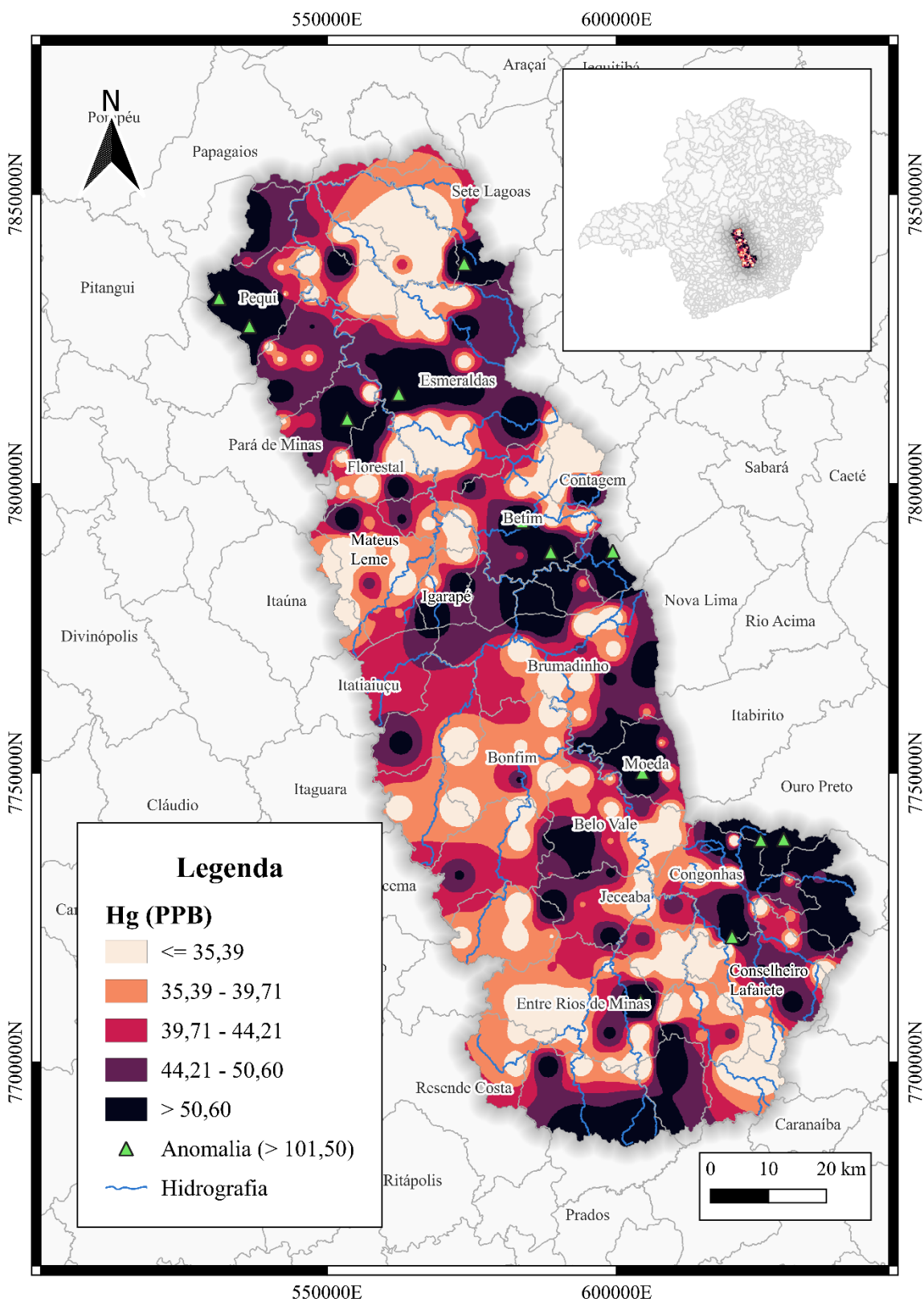
Os níveis de Hg, em um espectro geral, apresentam um pico em 30,00 a 50,00 ppb, seguido por um padrão decrescente após este intervalo, como pode-se observar no histograma da Figura 40. A maioria das amostras, portanto, apresentaram valores entre 10,00 e 50,00 ppb.

Figura 40 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de mercúrio.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Hg (Figura 41) é mais expressiva e bem distribuída ao longo da sub-bacia do Médio Paraopeba, com anomalias na cidade de Pequi, Sete Lagoas e Betim. Entretanto, a sub-bacia do Alto Paraopeba também apresenta anomalias como em Ouro Preto. Com uma distribuição mais homogênea, não é possível determinar uma zona de menor concentração de mercúrio na bacia, apresentando porções de valores mais baixos por toda sua extensão.

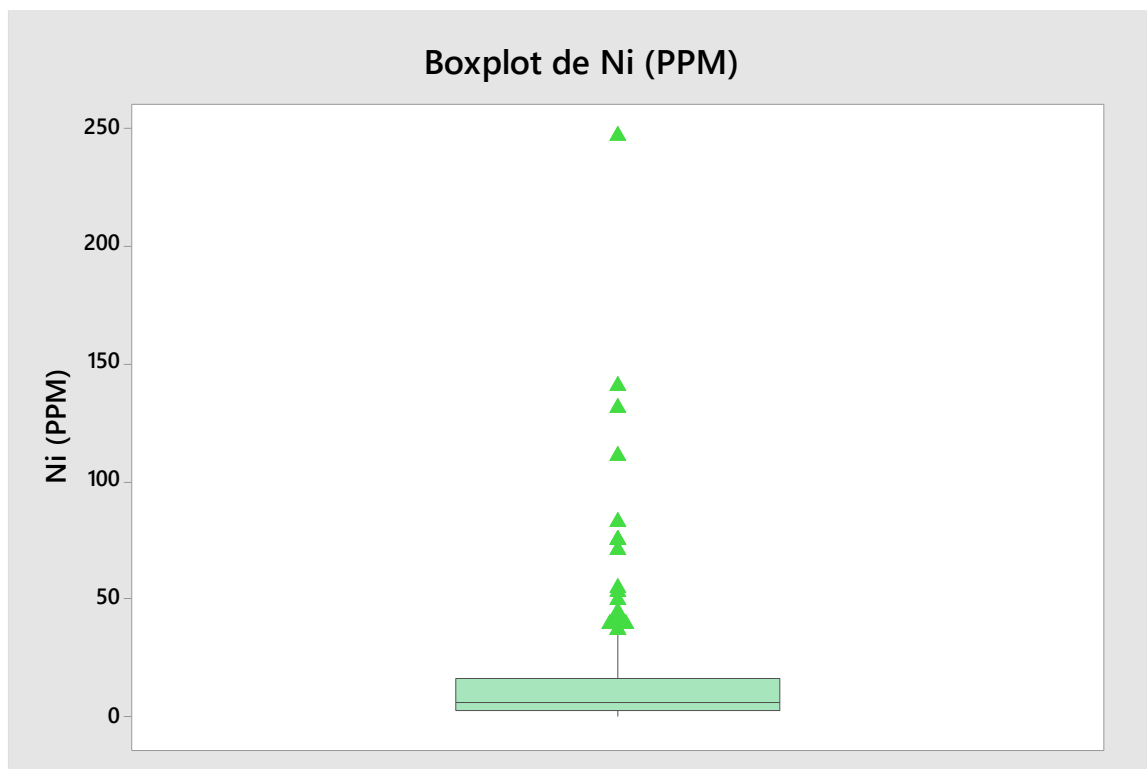


Fonte: AUTOR, 2025.

5.10 NÍQUEL

As concentrações de níquel (Ni) no local apresentaram uma variação de 0,40 a 245,80 ppm, com valores de *background* variando de 3,40 a 16,60 ppm, mediana igual a 0,01 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 36,40 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

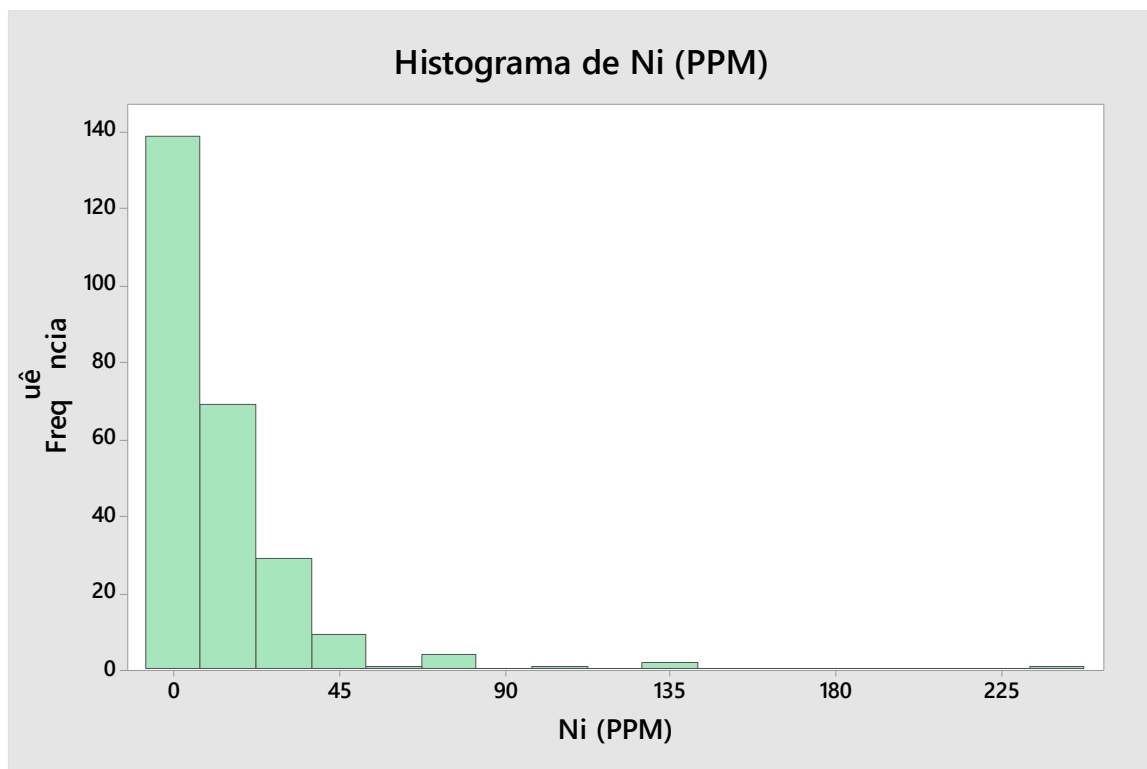
Figura 42 - Gráfico *boxplot* para concentração de níquel. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Ni apresentam um pico de concentração logo nas menores concentrações seguindo com um padrão decrescente, como pode-se observar no histograma da Figura 43. A maioria das amostras, portanto, apresentaram valores entre 0,00 e 20,00 ppm.

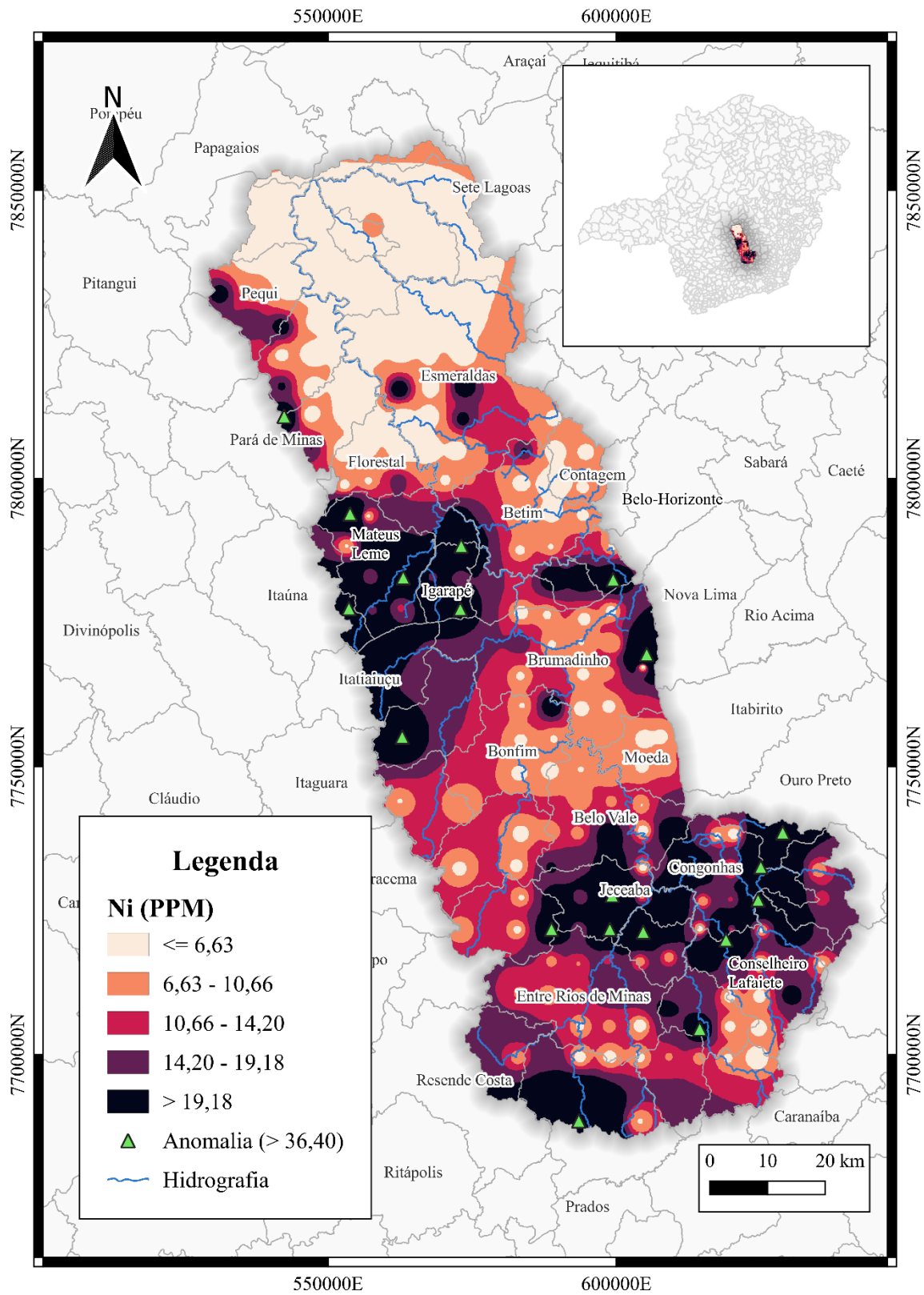
Figura 43 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de níquel.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Ni (Figura 44) é mais expressiva na sub-bacia do Alto Paraopeba, principalmente nas cidades de Jeceaba, Congonhas e Conselheiro Lafaiete. Entretanto, a sub-bacia do Médio Paraopeba também apresenta anomalias tanto a leste, como em Brumadinho, quanto em sua porção centro-oeste, próximo a Igarapé e Mateus Leme. As menores concentrações de Ni estão localizadas ao norte do Médio Paraopeba.

Figura 44 - Mapa do *background* geoquímico do níquel em partes por milhão.

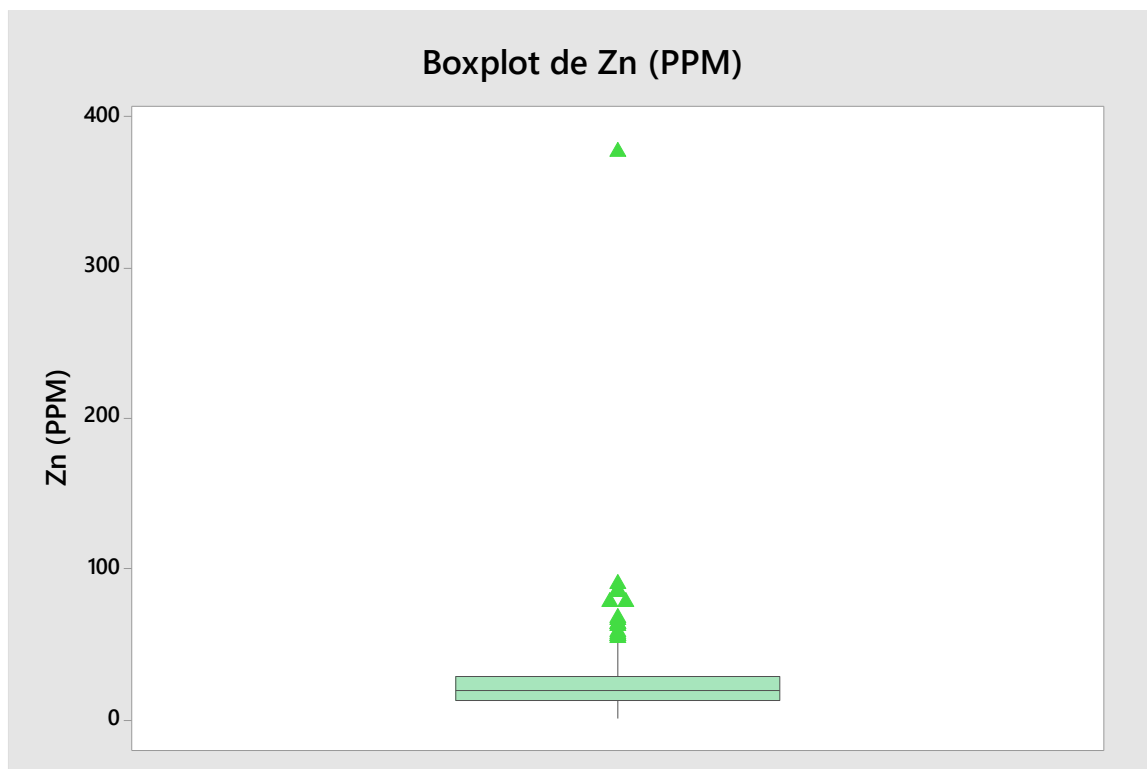


Fonte: AUTOR, 2025.

5.11 ZINCO

As concentrações de Zinco (Zn) no local apresentaram uma variação de 1,80 a 375,80 ppm, com valores de *background* variando de 12,50 a 28,90 ppm, mediana igual a 19,50 ppm, sendo consideradas anomalias os valores maiores que 53,50 ppm, como ilustra o *boxplot* abaixo.

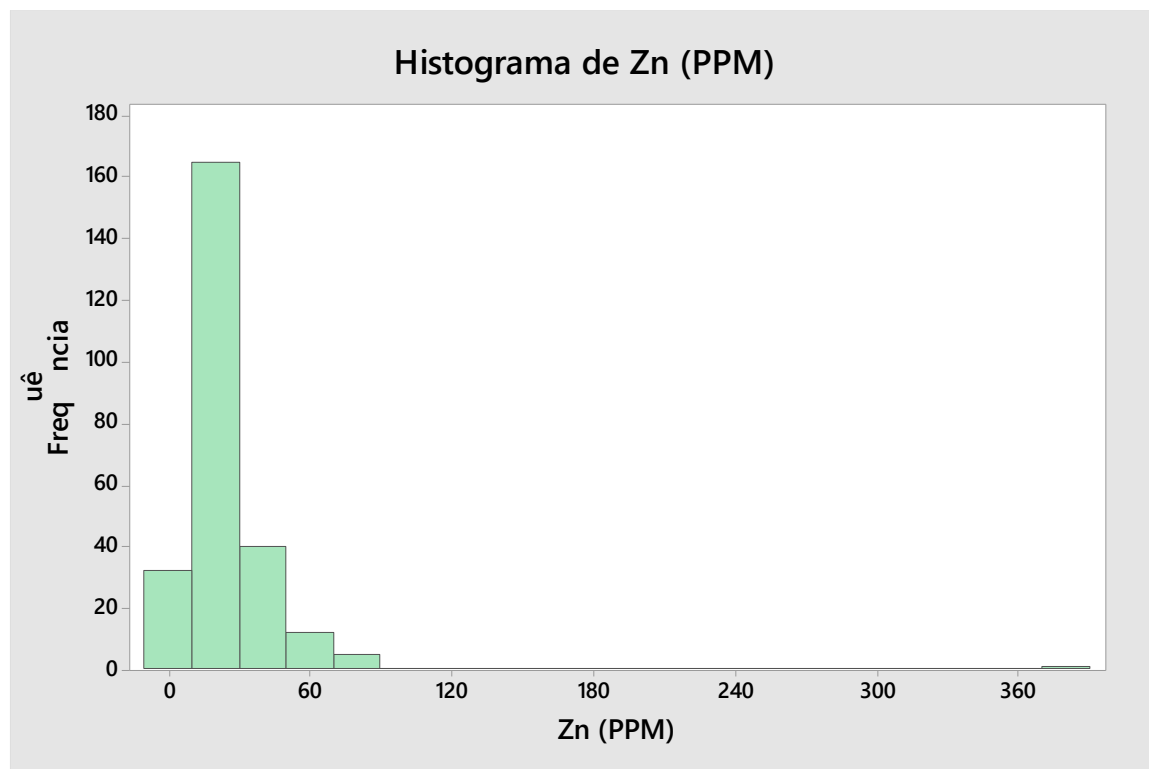
Figura 45 - Gráfico *boxplot* para concentração de zinco. Triângulos representam as anomalias.



Fonte: AUTOR, 2025.

Os níveis de Zn, em um espectro geral, apresentam um pico de frequência em 20,00 ppm, seguido por uma queda abrupta após este intervalo, como pode-se observar no histograma da Figura 46. A maioria das amostras, portanto, apresentaram valores entre 10,00 e 30,00 ppm.

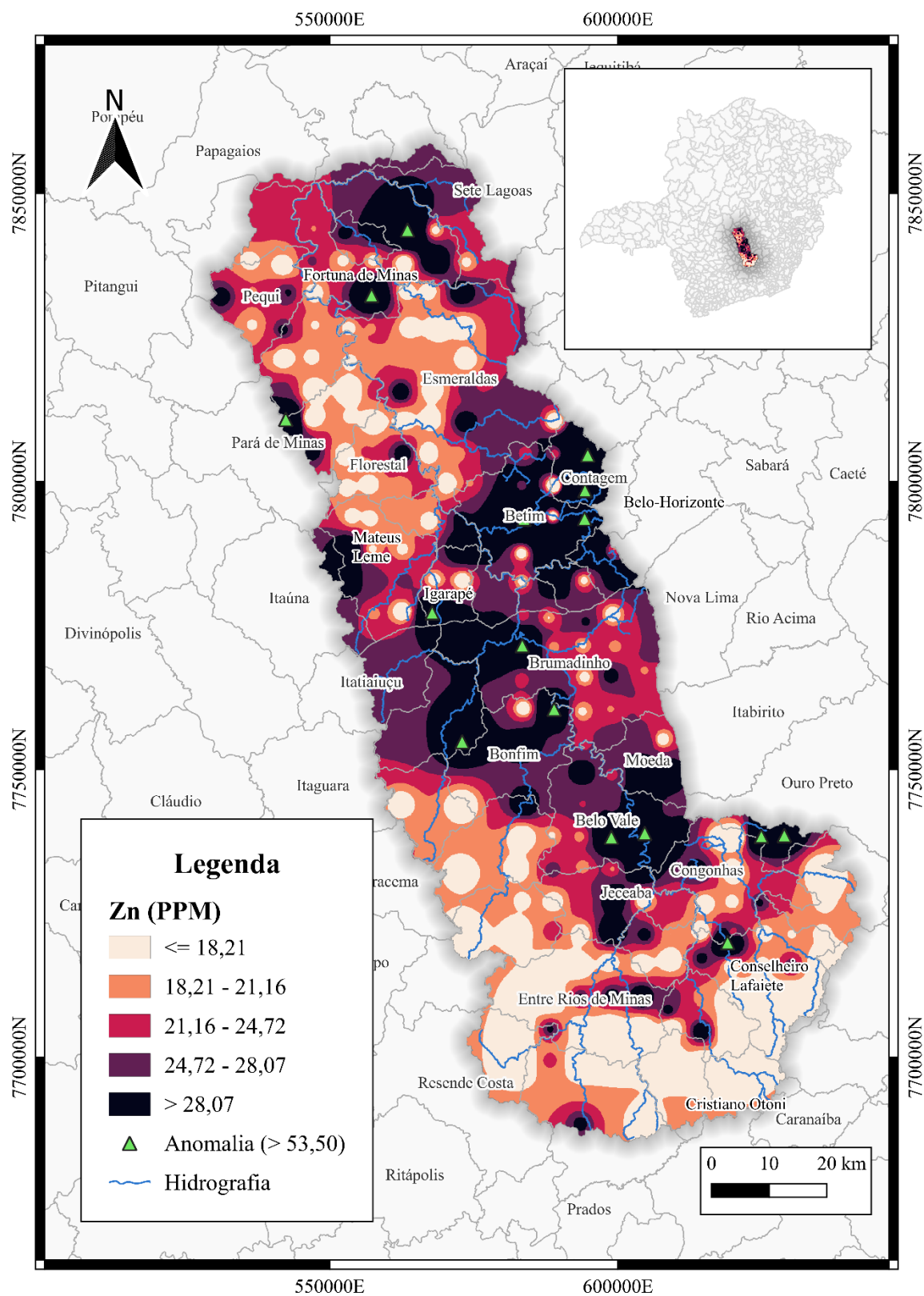
Figura 46 - Gráfico do tipo histograma para as concentrações de zinco.



Fonte: AUTOR, 2025.

A distribuição das anomalias geoquímicas de Zn (Figura 47) é mais expressiva na sub-bacia do Médio Paraopeba, tanto à leste em Betim e Contagem, quanto à norte como em Fortuna de Minas. Entretanto, a sub-bacia do Alto Paraopeba também apresenta focos de anomalia em Ouro Preto e Belo vale. As menores concentrações de Zn estão localizadas ao sul do Alto Paraopeba.

Figura 47 - Mapa do *background* geoquímico do zinco em partes por milhão.



Fonte: AUTOR, 2025.

6 DISCUSSÕES

Para que seja possível estabelecer correlações entre as anomalias observadas e a geologia local, primeiro, se faz necessário retomar e aplicar alguns dos conceitos sobre formação de solos mencionados anteriormente neste trabalho. Conforme WHITE & BRANTLEY (1995), a composição do solo não necessariamente deverá refletir a composição original da rocha mãe, uma vez que os minerais estão sujeitos ao intemperismo, portanto, a processos de desagregação (físico) e alteração (químico e biológico).

Para TOLEDO (2014), o relevo é um fator determinante para a pedogênese, uma vez que quanto menor a declividade, maior a capacidade de percolação de água, favorecendo ao intemperismo químico. Os pontos de coleta de amostras de solo, no entanto, foram limitados as sub-bacias do Alto e Médio Paraopeba, onde a declividade é em maioria de nível ondulada e forte ondulada. De acordo com OLIVEIRA & MARINS (2011) solos mais jovens e formados in situ apresentam, em geral, teores mais elevados de metais-traço, como os neossolos e cambissolos. Ademais, horizontes mais argilosos e com teores mais elevados de matéria orgânica, como horizonte B textural e horizonte B espódico, tendem a concentrar ainda mais elementos (NAEL *et al.*, 2009), como os argissolos.

Dessa maneira, pode-se afirmar que a região apresenta uma compatibilidade entre solo e rocha mãe no mínimo satisfatória.

6.1 INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA-GEOQUÍMICA

Para que seja possível correlacionar as anomalias às unidades litodêmicas e litoestratigráficas é preciso quantificar a distribuição desses elementos dentro de cada unidade. Assim, a Tabela 6 destrincha os percentuais de valores anômalos cada unidade.

Tabela 6 - Tabela com o percentual de valores anômalos relativos de cada unidade.

Unidades	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Coberturas Sed.	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%	50,0%	0,0%
Gp. Bambuí	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gp. Barbacena	0,0%	9,7%	19,4%	12,9%	6,5%	3,2%	6,5%	19,4%	19,4%	0,0%	3,2%
Gp. Itacolomi	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sg. Minas	0,0%	11,8%	14,7%	5,9%	8,8%	11,8%	8,8%	14,7%	11,8%	2,9%	8,8%
Sg. Rio das Velhas	0,0%	15,8%	10,5%	10,5%	10,5%	0,0%	10,5%	21,1%	15,8%	0,0%	5,3%
C. Ígneos-Metamórficos	0,0%	19,5%	12,2%	13,4%	4,9%	4,9%	7,3%	7,3%	7,3%	9,8%	13,4%

Fonte: AUTOR, 2025.

As características de *background* e valores anômalos dos Complexos Ígneos-Metamórficos apresentam forte correlação com as características composicionais dessas unidades. O Cr está relacionado às associações máficas e ultramáficas da região. O Cr, por sua vez, pode se concentrar em depósitos lateríticos formados pela alteração de rochas ultramáficas (WEDEPOHL, 1978; HEM, 1987). O Cd também pode estar associado às associações máficas da unidade, além de uma possível origem hidrotermal juntamente ao As, Pb e Zn realizando uma substituição isomórfica com o Zn, devido à proximidade dos tamanhos dos raios iônicos (DUAN *et al.*, 2023). Na sub-bacia do Alto Paraopeba os *outliers* estão situados sob latossolo vermelho distrófico, caracterizados pela predominância de um horizonte B latossólico que apresenta alto nível de intemperização evidenciado pela transformação quase completa dos minerais mais suscetíveis a alteração, seguido por uma intensa dessilicificação, lixiviação de bases e concentração residual de argilominerais do tipo 1:1 e minerais resistentes ao intemperismo (EMBRAPA, 2025), fomentada por uma declividade pouco acentuada. A sub-bacia do Médio Paraopeba, por sua vez, apresenta os *outliers* situados sob argissolo vermelho-amarelo distrófico com horizonte B textural de argila de baixa ou alta atividade gerado a partir de processos de iluviação ou concentração de argila. A presença deste tipo de solo pode estar relacionada a abundância de granitóides nessa região (NOCE *et al.*, 1994; SOUZA; 2017). Com alto teor de silicatos, os granitoides, são altamente suscetíveis ao intemperismo químico (GOLDICH, 1938), resultando na alteração desses silicatos em argilomineirais, essenciais para a formação dos argissolos. Este tipo de solo está associado a relevos de declividade intermediária, onde não há um grau de declividade o suficientemente alto do relevo para a gênese de neossolos, onde ocorre baixo teor de alteração da rocha por intemperismo químico, ou menores níveis de declividade para a gênese de latossolos, com alto padrão de alteração via intemperismo químico.

O Supergrupo Rio das Velhas apresentou As, Mn e Ni como principais elementos com valores anômalos. A concentração desses elementos se destaca principalmente no Grupo Nova Lima, marcado por rochas meta-vulcanossedimentares marcadas pela presença de arsenopirita (FeAsS) em sua assembléia mineral. A região é caracterizada pela ocorrência de Au (ouro), sendo o As um dos principais farejadores para encontrar essas ocorrências (MARQUES, 2017). Alguns corpos d'água da BHRP apresentam histórico de exploração aurífera sob o Grupo Nova Lima. O processo de extração dessas rochas sob leitos e galerias pode fomentar condições oxidantes necessários para a liberação de As, enriquecendo o meio. Dessa forma, pode-se associar os altos teores de As com fatores tanto geogênicos, quanto antropogênicos, como a exploração aurífera na região. Os altos teores de Mn podem estar associados aos níveis

manganesíferos de gonditos das rochas meta-vulcanossedimentares do Grupo Nova Lima e associado aos litotipos ferruginosos de todo Supergrupo Rio das Velhas. O Ni, por sua vez, é um elemento de baixas concentrações na crosta terrestre, possivelmente estando associado a fluidos mesotermiais e epitermais de As-Co-Ag-U (PARRA, 2007) e rochas máficas e ultramáficas da unidade. Os *outliers* dessa unidade se situam principalmente sob latossolos vermelho-amarelo distróficos ao longo da sub-bacia do Médio Paraopeba, cuja as características e processos pedogenéticos são análogos as condições descritas para este tipo de solo nos Complexos Ígneos-Metamórficos. Outro tipo de solo predominante é o cambissolo háplico Tb distrófico, marcado por um horizonte B incipiente. Esse horizonte é diagnóstico de baixas alterações físicas e químicas em estágios avançados, porém o suficiente para que mais da metade do volume de todos os sub-horizontes não consista em estrutura da rocha mãe (EMBRAPA, 2025).

As ocorrências de valores anômalos do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi apresentam correlação direta com as unidades geológicas regionais. O Supergrupo Minas é caracterizado por apresentar a principal fonte de ferro da área de estudo, associada aos itabiritos do tipo Lago Superior da Formação Cauê (Grupo Itabira). A origem do ferro no Grupo Itacolomi é análoga ao Supergrupo Minas, também apresentando itabiritos. Em ambas as unidades, o Mn também apresentou valores expressivos, porém esperados, devido ao processo de coprecipitação do Mn junto ao Fe (REIMANN & CARITAT, 1998) e a presença desse elemento na rocha mãe. A acumulação de Cd na região pode se dar através da substituição catiônica do Cd^{2+} por Mn^{2+} (REIMANN & CARITAT, 1998). Outra possível origem da alta concentração de valores anômalos de Cd na região seria a queima de carvão mineral, que apresenta metais traços em sua composição liberados ao serem queimados (VEJAHATI *et al.*, 2010) ou em poeira de mineração (FARIA & BLANCO, 2020). A região apresenta forte setor siderúrgico com indústrias como a Vallourec em Jeceaba, LGA Mineração e Siderurgia em Congonhas e a Nexus Ligas em Ouro Preto. Os *outliers* na região estão situados majoritariamente sob neossolo litólico distrófico, tanto no Alto, quanto no Baixo Paraopeba. Este tipo de solo é caracterizado por apresentar alterações inexpressivas, contendo material mineral ou orgânico de espessura diminuta, com baixo grau de intemperismo e alta correlação com a rocha mãe (EMBRAPA, 2025). O domínio quase exclusivo deste tipo de solo nestas unidades pode ser explicado pelo alto nível de declividade, que em grande parte varia de montanhoso a escarpado, dificultando os processos de intemperismo químico.

O Grupo Barbacena é caracterizado por uma sequência vulcanossedimentar expressiva em Mn, apresentando rochas com este elemento em sua estrutura como os queluzitos, gonditos

e xistos manganésíferos característicos da Formação Lafaiete (SANTOS *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013). Os altos valores de Cd podem também ser explicados pela capacidade de substituição catiônica do Cd^{2+} por Mn^{2+} , visto os altos teores de Mn (REIMANN & CARITAT, 1998). O Ni também apresentou altas concentrações nesta unidade, estando associado, principalmente, as rochas máficas e ultramáficas neste contexto. Os *outliers* dessa unidade se encontram principalmente sob cambissolo háplico Tb distrófico, cujos processos pedogenéticos são análogos as condições desse mesmo tipo de solo no Supergrupo Rio das Velhas.

6.2 COMPARAÇÃO COM A CONAMA 420/2009

Com o intuito de correlacionar os dados estatísticos deste trabalho com a legislação nacional, os resultados foram comparados com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA 420/2009). Esta legislação “dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas (BRASIL, 2009)”.

Conforme essa resolução, a avaliação de qualidade do solo pode ser pautada em valores orientadores de referência para a presença de substâncias e elementos químicos, pautados em Valores de Prevenção (VP) e Valores de Investigação (VI). Os VIs foram derivados em 3 classes, baseado no nível de risco à saúde humana, em cenários de diferentes tipos de uso do solo, sendo o de menor risco Agrícola (VIA), seguindo para Residencial (VIR) e Industrial (VII) como nível mais alto.

Assim, VPs sugerem a implementação de um controle preventivo para a análise e manutenção da qualidade de solo, ao passo que VIs sugerem a investigação na área seguindo a metodologia disposta na resolução.

A Tabela 7 apresenta os valores orientadores de referência (VOR) para cada um dos elementos e a porcentagem acima de cada classe.

Tabela 7 – Valores orientadores de referência (VOR) de cada elemento, conforme a CONAMA 420/2009, e valores em % de cada classe.

Elemento	VOR VP (PPM)	VOR VI - Agrícola (PPM)	VOR VI - Residencial (PPM)	VOR VI - Industrial (PPM)	% Acima de VOR VP	% Acima de VOR VI - Agrícola	% Acima de VOR VI - Residencial	% Acima de VOR VI - Industrial
Al	-	-	-	-	-	-	-	-
As	15	35	55	150	5,9%	2,0%	1,6%	1,2%
Cd	1,3	3	8	20	0%	0%	0%	0%
Cr	75	150	300	400	18,2%	8,7%	1,6%	2,8%
Cu	60	200	400	600	2,8%	0,4%	0%	0%
Fe	-	-	-	-	-	-	-	-
Hg	500	1200	3600	7000	0%	0%	0%	0%
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	30	70	100	130	9,9%	1,6%	0,4%	1,2%
Pb	72	180	300	900	1,6%	0%	0%	0%
Zn	300	450	1000	2000	0,4%	0%	0%	0%

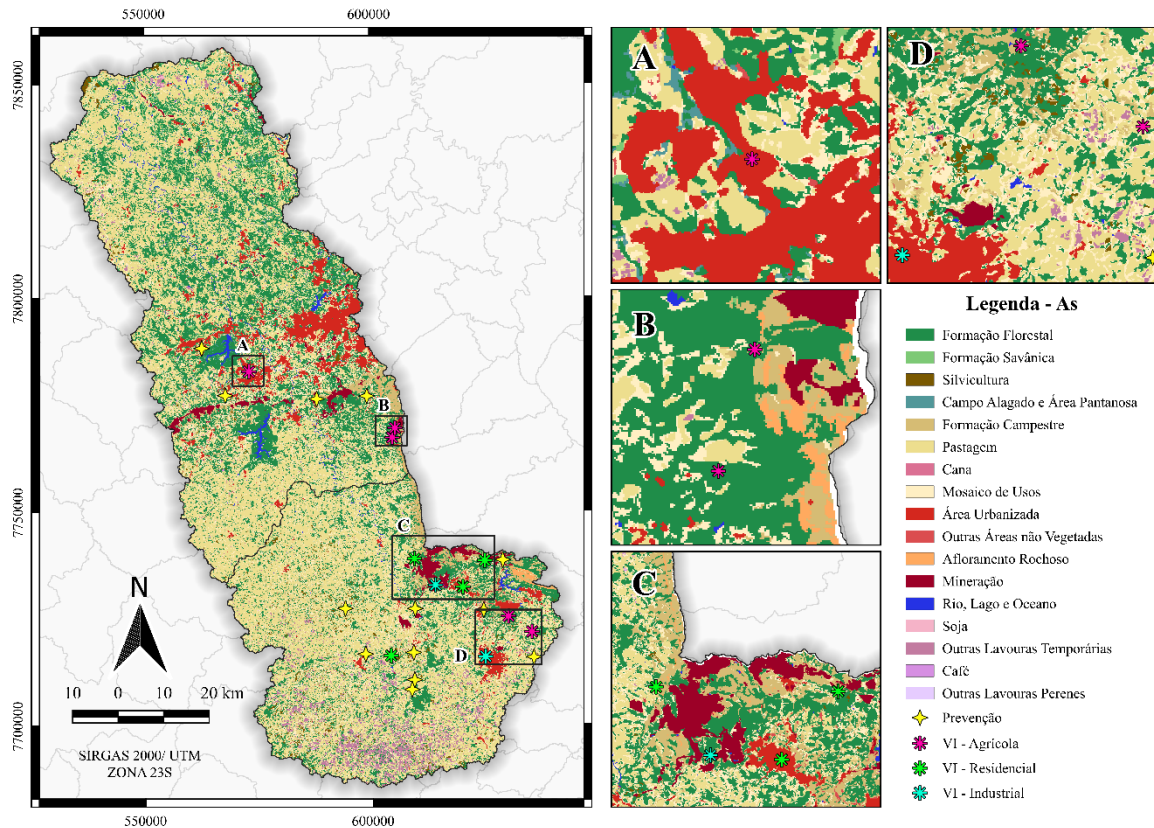
Fonte: AUTOR, 2025.

A BHRP apresenta grande relevância para a economia do estado de Minas Gerais, apresentando uma matriz de uso e ocupação do solo heterogênea, conforme a Figura 9. Para uma melhor compreensão da distribuição espacial dos dados, juntamente a sua classificação conforme a resolução CONAMA 420/2009, os mapas dos valores orientadores de referência do As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn foram confeccionados a partir do mapa de uso e ocupação do solo do Alto e Médio Paraopeba, visto que a classificação da resolução categoriza os VIs conforme o uso e ocupação do solo. A partir dessa abordagem será possível não apenas inferir espacialmente as concentrações que violam os VPs e VIs, como também entender sob que contexto essas se aplicam.

Os elementos Al, Fe e Mn não apresentam VOR na resolução. Tanto Cd, quanto Hg não apresentaram nenhum ponto que se enquadrasse acima de VP ou VI. Portanto, não foram confeccionados mapas para tais elementos.

6.2.1 Arsênio

Figura 48 - Mapa das concentrações de As que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.

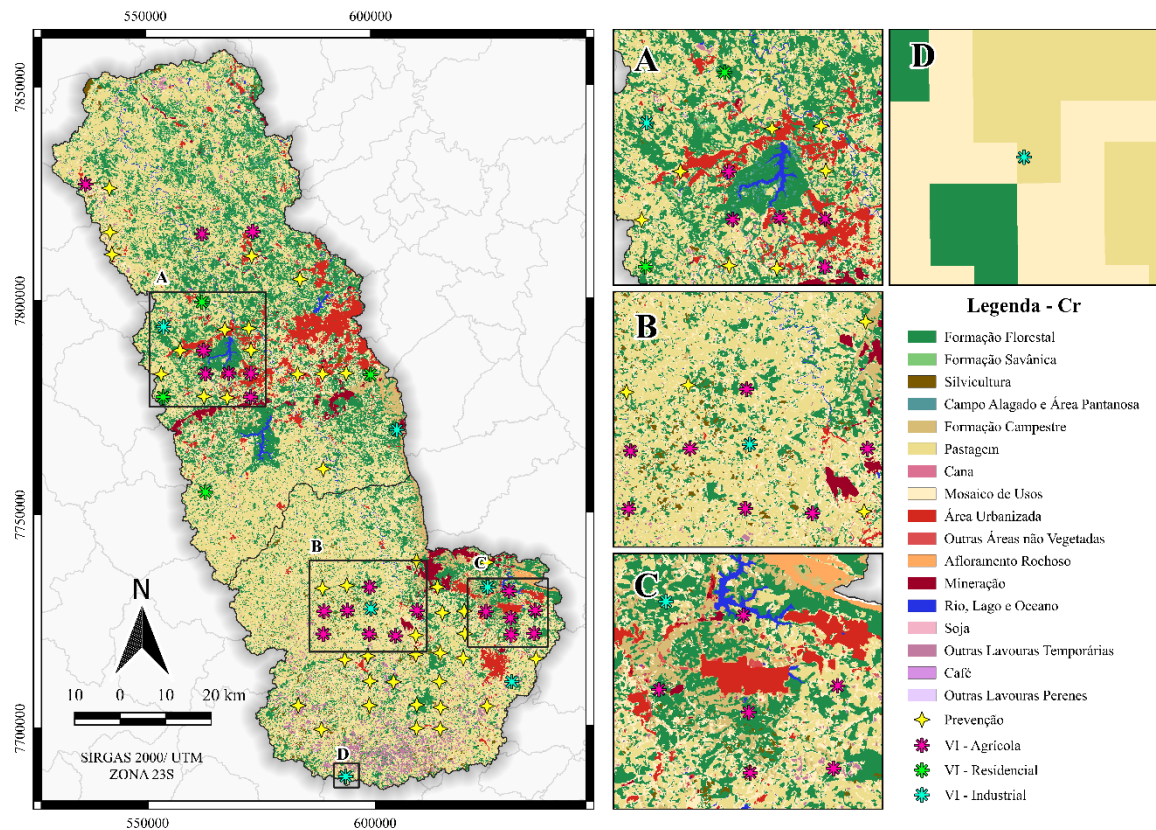


Fonte: AUTOR, 2025.

As violações de As se concentram principalmente no Alto Paraopeba, onde apresenta violações de VIR e VII em áreas urbanizadas, como na Figura 48C (Congonhas) e Figura 48D (Conselheiro Lafaiete) e VII sobre zonas de mineração Figura 48C (Congonhas), podendo estar associado as atividades executadas na mina Casa de Pedra, pela CSN . As violações de VIA estão situadas majoritariamente sob formação florestal, com exceção no Médio Paraopeba (Figura 48A) em Igarapé.

6.2.2 Cromo

Figura 49 - Mapa das concentrações de Cr que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.

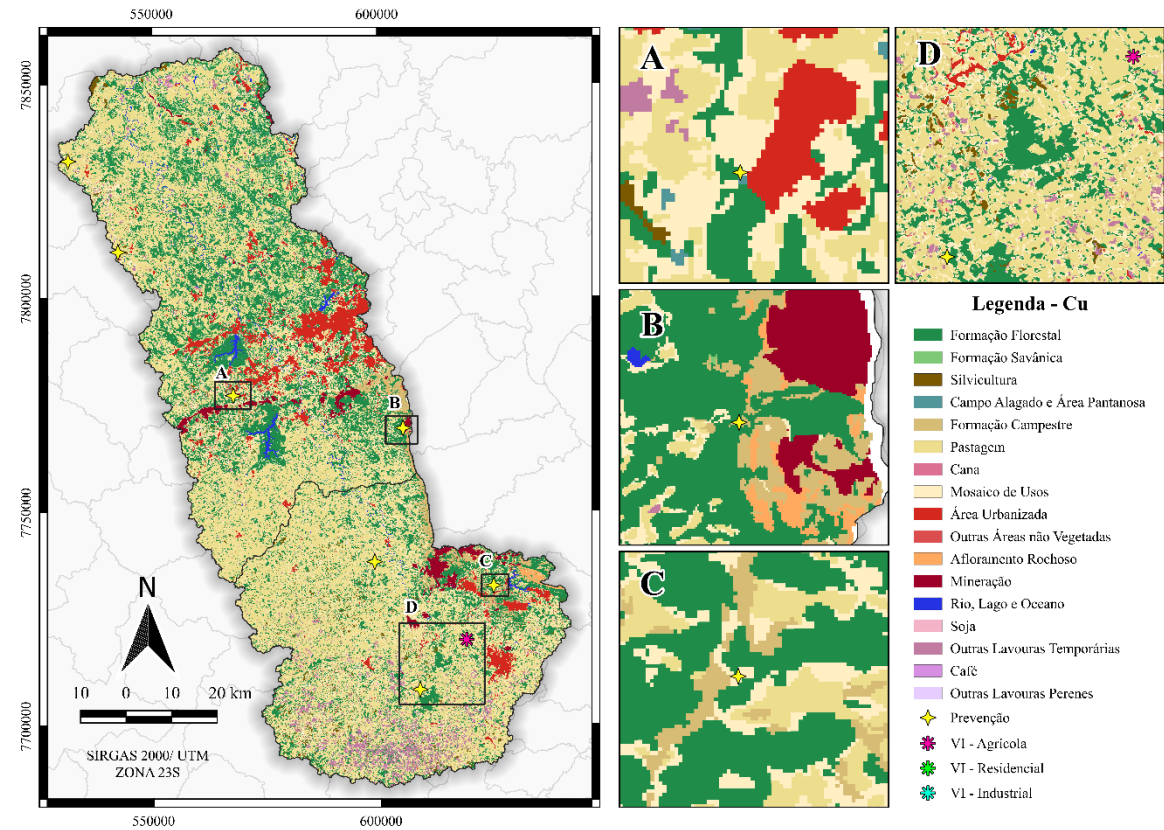


Fonte: AUTOR, 2025.

As violações de Cr se concentram tanto no Alto, quanto no Médio Paraopeba. No Alto Paraopeba o Cr apresentou diversas VIAs associadas a pastos e silvicultura (Figura 49B e Figura 49C). Os VIIs dessa sub-bacia estão sob pastagens. Já no Médio Paraopeba as violações de VIAs estão situadas em áreas urbanizadas (Figura 49A) nos municípios de Igarapé e Mateus Leme. Já as violações de VIRs e VIIs se encontram sob pastagens e formações florestais.

6.2.3 Cobre

Figura 50 - Mapa das concentrações de Cu que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.

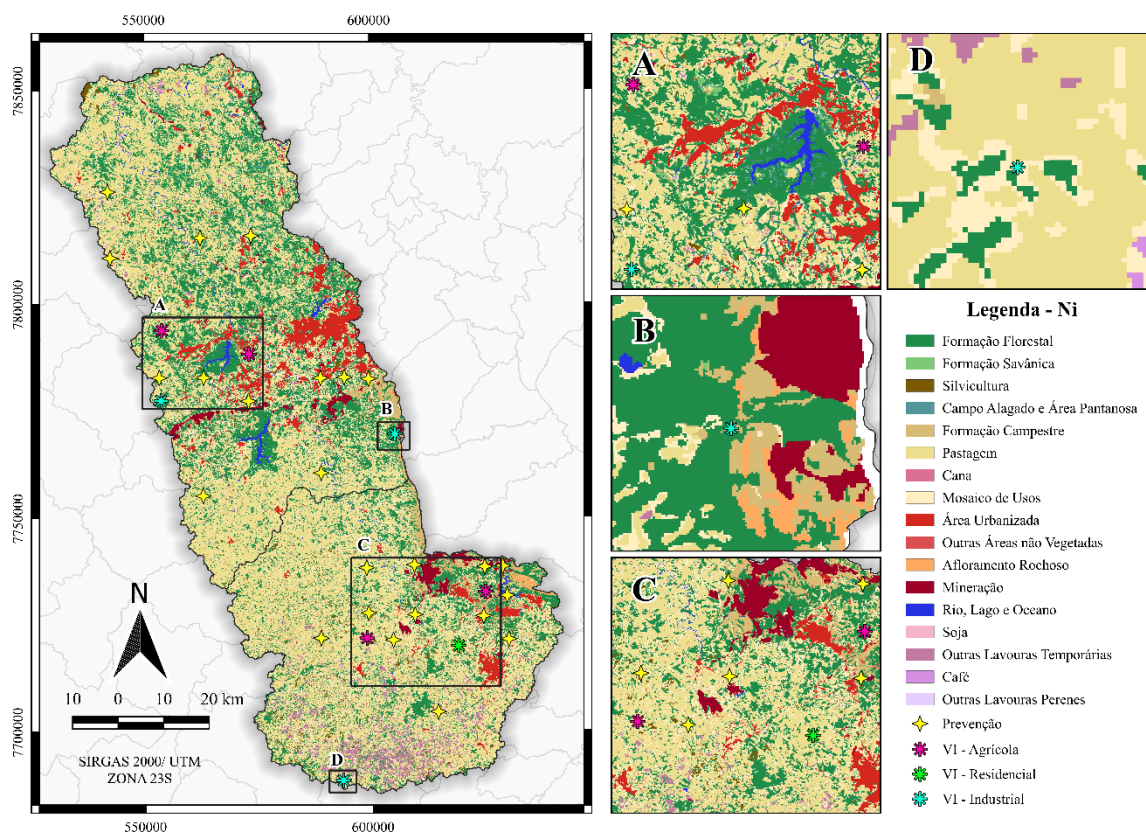


Fonte: AUTOR, 2025.

O Cu apresentou poucos pontos com concentrações que violassem os VORs da resolução. Com apenas 4 pontos violando os VPs sob formações florestais e mosaico de usos. O Cu apresentou apenas um ponto acima do VIA, localizado em uma pastagem (Figura 50D).

6.2.4 Níquel

Figura 51 - Mapa das concentrações de Ni que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.

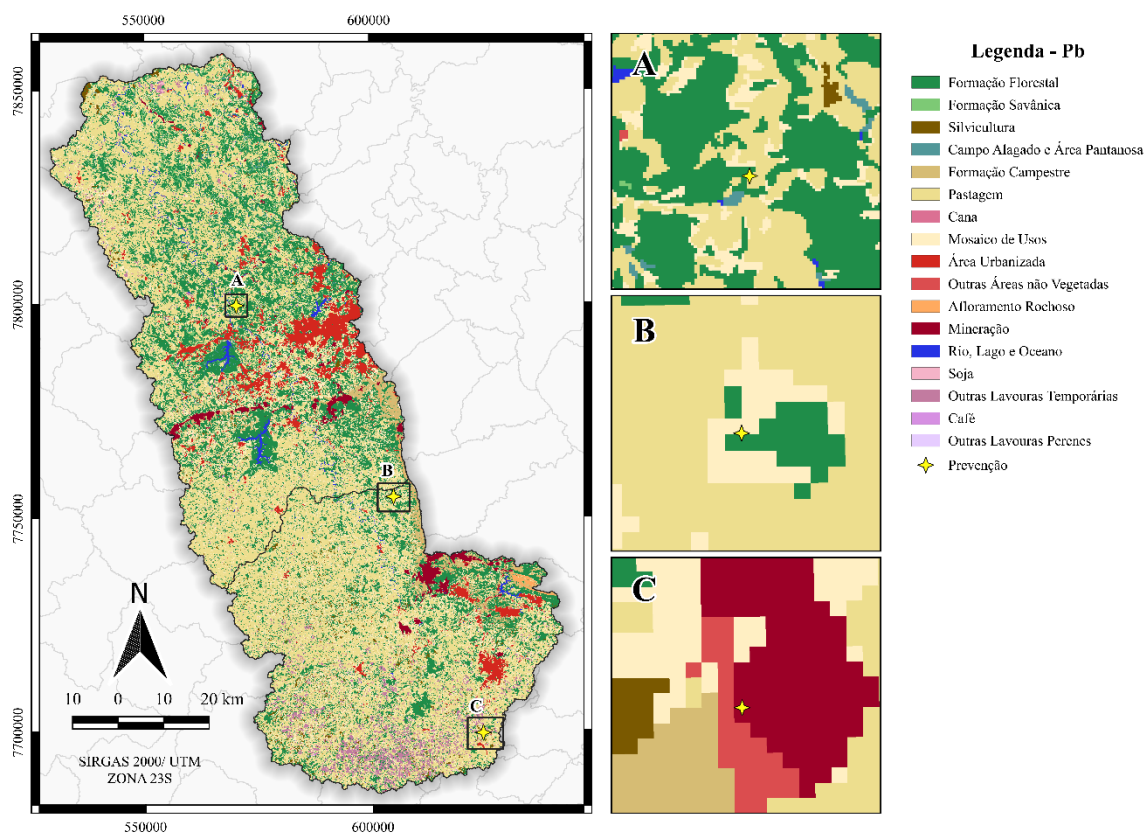


Fonte: AUTOR, 2025.

As violações de Ni se concentram tanto no Alto, quanto no Médio Paraopeba. No Alto Paraopeba o Ni apresentou uma violação do VIR associada a pastagem, duas violações VIA em formações florestais (Figura 51C) e uma violação VII em formação campestre (Figura 51D). Já no Médio Paraopeba as violações de VIAs e VII estão situadas em formações florestais (Figura 51A).

6.2.5 Chumbo

Figura 52 - Mapa das concentrações de Pb que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.

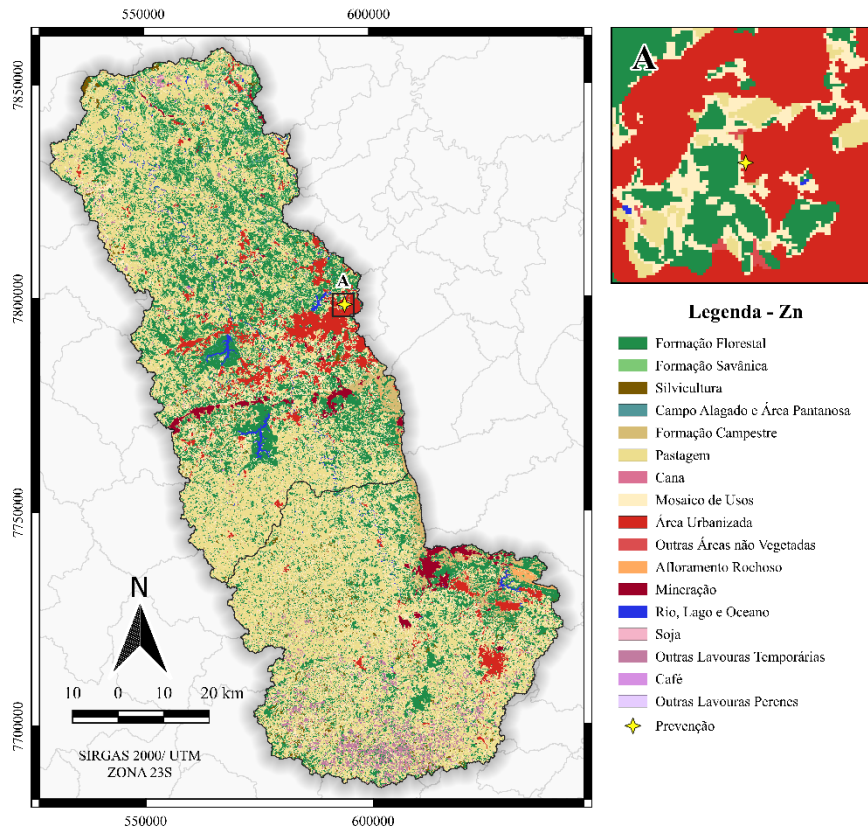


Fonte: AUTOR, 2025.

O Pb apresentou poucos pontos com concentrações que violassem os VORs da resolução. Com apenas 3 pontos violando os VPs sob formações florestais (Figura 52A e Figura 52B) e mineração no município de Cristiano Ottoni (Figura 52C).

6.2.6 Zinco

Figura 53 - Mapa das concentrações de Zn que violam os valores orientadores de referência da CONAMA 420/2009.



Fonte: AUTOR, 2025.

O Zn apresentou apenas um ponto com concentração que viola o VP, estando situado sob área urbanizada no município de Contagem (Figura 53A).

7 CONCLUSÕES

A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba protagonizou um importante papel na história de Minas Gerais, sendo um importante palco da corrida do ouro ao final do século XVII. A geologia da região, portanto, não é apenas importante para o entendimento das mineralizações da área, mas sim uma peça fundamental em todos os aspectos geográficos da bacia, caracterizando o relevo e tecendo a cultura, história e o desenvolvimento de núcleos urbanos de todo um povo.

Nesse sentido, este trabalho teve como foco unir geologia, pedologia, geoquímica ao uso e ocupação do solo ao longo dessa bacia cuja relevância transcende cifras e capítulos em livros de história. Para tanto, foram determinados os valores de *background* geoquímico dos elementos Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn, tornando possível entender as relações destes elementos com as unidades geológicas, tipos de solo, relevo e uso do solo.

A integração entre relevo, geologia, pedologia e geoquímica proporcionou um grande entendimento sobre como todos esses fatores estão intrinsecamente relacionados. Os processos geológicos na região são fundamentais para a compreensão do relevo, onde zonas montanhosas e escarpadas, com altas altitudes, predominam o Supergrupo Minas, principal unidade responsável pelas mineralizações de ferro na região. Essa alta declividade precariza a percolação de fluidos, diminuindo o impacto do intemperismo químico local. Esse processo, por sua vez resulta em solos com alto grau de parentesco à rocha mãe, como os neossolos. Portanto, o resultado é um acervo de anomalias em elementos contidos nas estruturas cristalinas das rochas do Supergrupo Minas, como o Fe, Mn e Cd. Consequentemente, essa região se destaca pela mineração. De forma análoga, os Complexos Ígneos-Metamórficos da região apresentam relevo mais suave, fomentando o intemperismo químico. Como resultado, tem-se o desenvolvimento de latossolos e cambissolos.

Ademais, a comparação dos dados geoquímicos com a legislação nacional (CONAMA 420/2009), tornou possível a identificação de áreas com valores que violam o estipulado em norma, tanto em zonas urbanas como Congonhas, Conselheiro Lafaiete e Igarapé para arsênio; Mateus Leme e Igarapé para cromo; Cristiano Ottoni para chumbo; Contagem para zinco; e em zonas não-ocupadas. Permitindo o entendimento espacial de regiões onde se faz necessário a prevenção ou investigação seguindo os parâmetros preconizados pela CONAMA.

Portanto, a realização do mapeamento geoquímico, da caracterização de áreas com violação da legislação nacional para elementos potencialmente tóxicos e a caracterização do *background* geoquímico da área, o estudo em questão proporcionou a compreensão de

alterações nas condições geoquímicas locais. Esse conhecimento, portanto, é fundamental não apenas a fins acadêmicos como o auxílio de estudos futuros sobre a qualidade ambiental da região, como também para a elaboração de futuras políticas ambientais que garantam a devida atenção a esta bacia portadora de um legado histórico-cultural de primazia para o povo mineiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBANESE, S. *et al.* **Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy).** *Journal of Geochemical Exploration*, v. 93, p. 21-34, 2007.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil.** *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 4 ago. 2025.

BARBOSA, Natali. **Evolução paleoproterozoica do Cinturão Mineiro: geocronologia U-Pb, isótopos de Nd-Hf-Sr e geoquímica de rochas plutônicas.** 2015. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44141/tde-24082015-150603/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

BARBOSA, O. **Resumo da Geologia do Estado de Minas Gerais.** Boletim do Departamento de Serviços Geográfico e Geológico, n. 3, p. 1-40, 1954.

BALTAZAR, O. F.; PEDREIRA, A. J. Associações litofaciológicas. In: ZUCCHETTI, M.; BALTAZAR, O. F. (Org.). **Projeto Rio das Velhas: Texto explicativo do mapa geológico integrado. Escala 1:100.000.** Belo Horizonte: Convênio DNPM/CPRM, 1998.

BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. **Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits.** *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 471-499, 2007.

BOWEN, Norman L. **The evolution of the igneous rocks.** Princeton: Princeton University Press, 1928. 334 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução N° 420, de 28 de dezembro de 2009.** Brasília: Diário Oficial da União, 2009.

CARITAT, P. *et al. National Geochemical Survey of Australia: The Geochemical Atlas of Australia*. Canberra: Geoscience Australia, 2007.

CARRANZA, E. J. M. *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Handbook of exploration and environmental geochemistry*; 2009. vol. 11. Elsevier publications. Budapeste. Hungria. 310 p.

CHENG, Z. *et al. Multi-element geochemical mapping in Southern China*. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 139, p. 183–192, 2014.

DARNLEY, A. G. *et al. A global geochemical database for environmental and resource management: recommendations for International Geochemical Mapping: final report of IGCP Project 259*. Paris: UNESCO Publishing, 1995.

DE VIVO, B. *et al. FOREGS geochemical baseline mapping programme: Italian territory*. In: *EUROPEAN CONGRESS ON REGIONAL GEOSCIENTIFIC CARTOGRAPHY AND INFORMATION SYSTEMS, 2003*, Bologna. *Anais...* Bologna: [s.n.], 2003. v. II, p. 639-640.

DORR II, J. V. N. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Washington, D.C.: United States Geological Survey (USGS), 1969. 110 p. (*Professional Paper*, 641-A).

DUAN, Hongyu *et al. Supernormal enrichment of cadmium in sphalerite via coupled dissolution-reprecipitation process*. *Communications Earth & Environment*, [S. l.], v. 4, n. 1, 2023. DOI: [10.1038/s43247-023-01025-8](https://doi.org/10.1038/s43247-023-01025-8).

EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 530 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1176834/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 4 ago. 2025.

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.

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, 2019b.

FADIGAS, F. D. S. *et al.* **Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 3, p. 699-705, 2006.

FARIA, L. P. C.; BLANCO, C. J. C. ***Dust emission in iron ore storage yard: an environmental and occupational approach.*** Research, Society and Development, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 2, e05921873, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i1.1873>.

GAŁUSZKA, Agnieszka. ***Different approaches in using and understanding the term “Geochemical Background” – Practical implications for environmental studies.*** Polish Journal of Environmental Studies, v. 16, n. 3, p. 389-395, 2007.

GOLDICH, S. S. ***A study of Rock weathering.*** Journal of Geology, Chicago, v. 46, p. 17-58, 1938.

GROSSI SAD, J. H.; PINTO, C. P.; DUARTE, C. L. **Geologia do Distrito Manganêsífero de Conselheiro Lafaiete, MG.** In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2., 1983, Belo Horizonte. Anais do 2º Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Minas Gerais, 1983. v. 3, p. 259-270. (*Boletim SBG-MG*, 3).

HEM, John David. ***Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water.*** 3rd ed. Reston: U.S. Geological Survey, 1985. (*Water-Supply Paper*, 2254).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **IBGE Cidades.** Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Identificação de municípios com condição crítica para a qualidade de água na bacia do rio Paraopeba.** Belo Horizonte: 2013.

JOHNSON, R. C. *et al.* ***Borrelia coriaceae* sp. nov.: putative agent of epizootic bovine abortion.** *Journal of Clinical Microbiology*, Washington, v. 25, n. 5, p. 872-874, 1987.

LANA, C. *et al.* ***The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil.*** *Precambrian Research*, v. 231, p. 157-173, 2013.

LANCIANESE, V.; DINELLI, E. ***Different spatial methods in regional geochemical mapping at high density sampling: An application on stream sediment of Romagna Apennines, Northern Italy.*** *Journal of Geochemical Exploration*, v. 154, p. 143–155, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.014>.

LAPWORTH, D. J. *et al.* ***Geochemical mapping using stream sediments in west-central Nigeria: implications for environmental studies and mineral exploration in West Africa.*** *Applied Geochemistry*, v. 27, n. 6, p. 1035-1052, 2012.

LARIZZATTI, J. H.; MARQUES, E. D.; SILVEIRA, F. V. **Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno – MG.** Informe de Recursos Minerais. (Série metais - Informes Gerais; 2). CPRM, 208 p., 2014.

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

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. Capítulo 1, p. 15-30.

LEPSCH, Igo F. **19 lições de pedologia.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. Capítulo 3: Intemperismo: a transformação das rochas, p. 63-92.

LICHT, O. A. B. **Prospecção Geoquímica: Princípios, Técnicas e Métodos.** Rio de Janeiro: CPRM, 1998. 216 p.

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.

MARQUES, E. D. Capítulo 6 – Mapeamento Geoquímico. In: PINHO, J. M. M. et al. (Orgs.). **Geologia e recursos minerais das folhas Cabeceira Grande, Unaí, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas: texto explicativo**. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil – CPRM/SGB, 2017. 25 p.

MATOS, F.; DIAS, R. **A Gestão dos Recursos Hídricos em MG e a Situação da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba**. *Gestão e Regionalidade*, v. 28, n. 83, 2012.

MATSCHULLAT, Jörg; OTTENSTEIN, Robert; REIMANN, Clemens. **Geochemical background – can we calculate it?** *Environmental Geology*, v. 39, n. 9, p. 990-1000, 2000.

MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L.; OGANDO, L. D. **Desenvolvimento e inovação em mineração e metais**. *Mineração e Metais - BNDS Setorial*, v. 43, p. 325-361, 2016.

NAEL, M. *et al.* **Effect of geo-pedological conditions on the distribution and chemical speciation of selected trace elements in forest soils of western Alborz, Iran**. *Geoderma*, v. 152, p. 157-170, 2009.

NOCE, C. M. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 1995. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. 129 p.

OLIVEIRA, R. C. B.; MARINS, R. V. **Dinâmica de Metais-Traço em Solo e Ambiente Sedimentar Estuarino como um Fator Determinante no Aporte desses Contaminantes para o Ambiente Aquático: Revisão**. *Revista Virtual Química*, v. 3, p. 88-102, 2011.

PARRA, R. R. et al. **Influência antrópica na geoquímica de água e sedimentos do rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Brasil.** *Geochimica Brasiliensis*, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 36-49, 2007. DOI: 10.21715/gb.v21i1.255.

PASSOS, I. et al. **Optimization of Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation parameters via cross-validation: A case study of rainfall patterns in tropical watersheds.** *International Journal of Climatology*, v. 39, n. 15, p. 5926–5939, dez. 2019.

PIRES, F. R. M. **Geologia do Distrito Manganêsífero de Conselheiro Lafaiete.** 1977. 344 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1977.

PIRES, F. R. M. **The Archean Barbacena greenstone Belt in its typical development and the itabirite distribution at the Lafaiete District.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 59, p. 599-600, 1978.

QUEMÉNEUR, J. J. G.; VIDAL, P. **Primeiras datações radiométricas dos granitos da região de São João del Rei, Minas Gerais.** In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 5., 1989, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBG-MG, 1989. p. 50-54.

REIMANN, C. et al. **Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R.** John Wiley e Sons, 2008.

REIMANN, Clemens; GARRETT, Robert G. **Geochemical background - concept and reality.** *Science of the Total Environment*, v. 350, p. 12-27, 2005.

REIS, L. A.; MARTINS-NETO, M. A.; GOMES, N. S.; ENDO, I. **A bacia de antepaís paleoproterozoica Sabará, Quadrilátero Ferrífero, MG.** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, p. 43-58, 2002.

REIMANN, C.; CARITAT, P. de. **Chemical Elements in the Environment: Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist.** Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-72016-1>. Acesso em: 06 jan. 2026.

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. **O Quadrilátero Ferrífero - Mg, Brasil: Aspectos Sobre Sua História, Seus Recursos Minerais E Problemas Ambientais Relacionados.** *Geonomos*, v. 18, n. 1, p. 33–37, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v18i1.67>

SALOMÃO, G. N. **Mapeamento geoquímico e estimativa de *background* em solos na região da província mineral do Carajás – leste do cráton amazônico, Brasil.** 133 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

SANTOS, L. D.; BALTAZAR, O. F. **Carta geológica: Folha Conselheiro Lafaiete - SF.23-X-A-VI. Escala 1:100.000.** Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2013. 1 mapa, color. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21429>. Acesso em: ago. 2025.

SHEPARD, D. ***A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data.*** In: *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, 1968. p. 517–524.

SILVA, M. A. *et al.* **Mapa geológico do Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: CPRM, 2020. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21828>. Acesso em: 27 jul. 2025.

SILVA, R. S.; BALTAZAR, O. F. **Carta geológica: Folha Entre Rios de Minas - SF.23-X-A-V. Escala 1:100.000.** Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2013. 1 mapa, color. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17750>. Acesso em: ago. 2025.

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS - SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos.** 2021. Disponível em: idesisema.meioambiente.mg.gov.br. Acesso em: 11 jan. 2021.

SOARES, A. F. S.; SOARES, F. S. **Avaliação da qualidade da água do Rio Paraopeba em Brumadinho, após rompimento da barragem B1 e considerações técnicas acerca da alteração do ponto de captação nesse manancial para abastecimento da Região**

Metropolitana de Belo Horizonte. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 4, n. 1, p. 1148–1160, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n1-091>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SOARES, A. L. C. **Bacia hidrográfica do rio Paraopeba: análise integrada dos diferentes impactos antrópicos.** 2021. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SOUZA, Sheila Fabiana Marcelino de. **Geocronologia U-Pb SHRIMP no Complexo Mantiqueira na região entre Juiz de Fora e Santos Dumont, sudeste de Minas Gerais.** 2017. 178 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/7012>. Acesso em: 11 ago. 2025.

SUZANO. **Relatório de Sustentabilidade 2025.** São Paulo: Suzano S.A., 2025. 80 p.

TAVARES, Túlio Tavares. **Proveniência sedimentar da Formação Três Marias no Sinclinal de Buenópolis (MG).** 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. 132 p.

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, M. C. M. **Intemperismo e pedogênese.** In: *Geologia USP/UNIVESP/EDUSP*, 2014.

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

VAN DEN BERG, C. M. G.; KRAMER, J. R. **Determination of complexing capacities of ligands in natural waters and constants of conditional stability constants of copper complexes**

by means of manganese dioxide. Analytica Chimica Acta, Amsterdam, v. 106, p. 113-120, 1979.

VEJAHATI, Farshid; XU, Zhenghe; GUPTA, Rajender. *Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization – A review. Fuel, [S. l.]*, v. 89, n. 4, p. 904-911, abr. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.06.005>. Acesso em: 05 jan. 2026.

VICQ, R. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

VICQ, R. *et al. Geochemical mapping of potentially hazardous elements in surface waters and stream sediments of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Geochimica Brasiliensis*, v. 32, p. 243-267, 2018.

VIEIRA, R. R. *et al. Evidências da colocação sintectônica de plutons revelada por estudos de campo, petrográficos, microestruturais e de química mineral: estudo de caso da Suíte Alto Maranhão (2130 Ma), Cinturão Mineiro*. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 43, p. 376-396, 2020.

WEDEPOHL, K. Hans. **The composition of the continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, Amsterdam**, v. 59, n. 7, p. 1217-1232, 1995

WHITE, A. F.; BRANTLEY, S. L. *Chemical weathering rates of silicate minerals: an overview. Chemical Geology, Amsterdam*, v. 105, n. 1, p. 295-310, 1995.

YOUSEFI, M.; CARRANZA, E. J. M.; KAMKAR-ROUHANI, A. *Weighted drainage catchment basin mapping of geochemical anomalies using stream sediment data for mineral potential modeling. Journal of Geochemical Exploration*, v. 128, p. 88-96, 2013.