



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ÍNDICES AMBIENTAIS PARA ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM
SEDIMENTOS DO RIO GUALAXO DO NORTE**

Raul Moreira Gonçalves

MONOGRAFIA nº 528

Ouro Preto, outubro de 2024

**ÍNDICES AMBIENTAIS PARA ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM
SEDIMENTOS DO RIO GUALAXO DO NORTE**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitor de Graduação

Prof. Dr. Adilson Pereira dos Santos

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Dr. Geraldo Magela Santos Sampaio

MONOGRAFIA

Nº 528

ÍNDICES AMBIENTAIS PARA SEDIMENTOS DO RIO GUALAXO DO NORTE

Raul Moreira Gonçalves

Orientador

Prof. Dr. Hubert Mathias Peter Roeser

Co-Orientadora

Dr.^a Deyse Almeida dos Reis

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2024/01.

OURO PRETO

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G635í Gonçalves, Raul Moreira.
Índices ambientais para elementos potencialmente tóxicos em sedimentos do rio Gualaxo do Norte. [manuscrito] / Raul Moreira Gonçalves. - 2024.
71 f.

Orientador: Prof. Dr. Hubert Mathias Peter Roeser Roeser.
Coorientadora: Dra. Deyse Almeida dos Reis Reis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Barragens de rejeitos. 2. Poluentes Ambientais. 3. Sedimentos (Geologia). 4. Metais. I. Roeser, Hubert Mathias Peter Roeser. II. Reis, Deyse Almeida dos Reis. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.136

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Raul Moreira Gonçalves

Índices Ambientais para elementos potencialmente tóxicos em sedimentos do Rio Gualaxo do Norte

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 15 de outubro de 2024

Membros da banca

Prof. Dr. Hubert Mathias Peter Roeser - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago - Universidade Federal de Ouro Preto
Ms. Lucas Cesar Vaz de Santos MDGEO Hidrologia e Meio Ambiente

Prof. Dr. Hubert Mathias Peter Roeser, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Hubert Mathias Peter Roeser, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/10/2024, às 08:51, 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 **0798774** e o código CRC **CD95D549**.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	APRESENTAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	JUSTIFICATIVA.....	2
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	4
2.1	ANÁLISE DE SEDIMENTOS DE FUNDO DA BACIA DO RGN.....	4
2.2	ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS.....	5
2.3	ÍNDICE DE GEOACUMULAÇÃO (IGEO).....	7
2.4	ÍNDICE DE RISCO ECOLÓGICO POTENCIAL (IRE).....	8
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
3.1	BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL.....	10
3.2	ESTAÇÕES DE AMOSTRAGEM.....	10
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS.....	13
4	CONTEXTO HIDROGRÁFICO.....	16
5	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	18
5.1	QUADRO ESTRATIGRÁFICO.....	21
5.1.1	Unidades do embasamento.....	21
5.1.2	Complexos metamórficos.....	21
5.1.3	Supergrupo Rio das Velhas.....	21
5.1.4	Supergrupo Minas.....	22
5.1.5	Supergrupo Estrada Real.....	23
5.2	ARCABOUÇO ESTRUTURAL E MODELO EVOLUTIVO.....	23
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
6.1	ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	25
6.2	DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DOS METAIS PESADOS NA ÁREA DE ESTUDOS 27	
6.2.1	Arsênio (As).....	27
6.2.2	Chumbo (Pb).....	31
6.2.3	Cobre (Cu).....	34
6.2.4	Cromo (Cr).....	37
6.2.5	Níquel (Ni).....	40
6.2.6	Zinco (Zn).....	43

6.2.7	Alumínio (Al).....	46
6.2.8	Ferro (Fe)	49
6.2.9	Manganês (Mn)	52
6.2.10	Mercúrio (Hg)	55
6.2.11	Comparação dos resultados do Gualaxo do Norte com a Bacia do Rio das Velhas 56	
6.3	ÍNDICES AMBIENTAIS.....	57
6.3.1	Índice de Geoacumulação	57
6.3.2	Índice de potencial risco ecológico	61
7	CONCLUSÃO	64
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 3.1: Localização das estações de amostragem nos diferentes litotipos presentes na bacia do Rio Gualaxo do Norte (Elaborado pelo autor, fontes dos dados: (Reis, 2019, Endo <i>et al.</i> 2019).....	12
Figura 3.2: Mapa hipsométrico da bacia do Rio Gualaxo do Norte com a localização das estações de amostragem. Elaborado pelo autor a partir de bases públicas (TOPODATA, 2021).	12
Figura 4.1 - Mapa de contextualização hidrográfica da microbacia do Rio Gualaxo do Norte. Elaborado pelo próprio autor a partir de bases públicas (IBGE & ANA, 2021).....	17
Figura 5.1 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> 2019b).....	19
Figura 5.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> 2019a).	20
Figura 5.3: Mapa geológico da bacia do Rio Gualaxo. Elaborado pelo autor, fonte: (Endo <i>et al.</i> 2019a).	20
Figura 5.4 - Modelo de Nappes do QF, apresentando falhas e dobras (Endo <i>et al.</i> , 2020).	24
Figura 6.1: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Rio Gualaxo do Norte. Fonte: (MapBiomias, 2019).	26
Figura 6.2: Gráfico de comparação da distribuição do Arsênio nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.	28
Figura 6.3: Mapas da distribuição geoquímica do arsênio nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.	30
Figura 6.4: Gráfico de comparação da distribuição do Chumbo nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.	32
Figura 6.4: Mapas da distribuição geoquímica do chumbo nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.	33
Figura 6.6: Gráfico de comparação da distribuição do Cobre nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.	35
Figura 6.7: Mapas da distribuição geoquímica do cobre nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.	36

Figura 6.8: Gráfico de comparação da distribuição do Cromo nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.	38
Figura 6.9: Mapas da distribuição geoquímica do cromo nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.	39
Figura 6.10: Gráfico de comparação da distribuição do Níquel nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.	41
Figura 6.11: Mapas da distribuição geoquímica do níquel nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.	42
Figura 6.12: Gráfico de comparação da distribuição do Zinco nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.	44
Figura 6.13: Mapas da distribuição geoquímica do zinco nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo, período seco e chuvoso.	45
Figura 6.14: Mapas da distribuição geoquímica do alumínio nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo, período seco e chuvoso.	48
Figura 6.15: Mapas da distribuição geoquímica do ferro nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.	51
Figura 6.16: Mapas da distribuição geoquímica do manganês nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo, período seco e chuvoso.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores de background para os elementos estudados (Rodrigues, 2012; Costa, 2015).....	5
Tabela 2.2: Classificação de níveis estabelecidos pelo CONAMA para materiais a serem dragados em águas doces, expressos por unidade de material seco. Adaptado de CONAMA (2012).....	7
Tabela 2.3 - Classes do Índice de Geoacumulação, segundo Duodu <i>et al.</i> (2011).....	8
Tabela 2.4 - Classificações de Er.	9
Tabela 2.5 - Classificações de RI.....	9
Tabela 3.1 - Localizações das estações de amostragem na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.....	10
Tabela 3.2 - Concentração de metais e semimetais em sedimentos no período seco (mg kg^{-1}).....	14
Tabela 3.3: Concentração de metais e semimetais em sedimentos no período chuvoso (mg kg^{-1}).	15
Tabela 6.1: Tabela com as classes utilizadas para comparação - IGEO.....	58
Tabela 6.2: Valores calculados de geoacumulação através dos dados de período seco.	58
Tabela 6.3: Valores calculados de geoacumulação através dos dados de período chuvoso.	59
Tabela 6.4: Classificações de IRE.	61
Tabela 6.5: Valores calculados para ERI nos períodos seco e chuvoso.	62

Resumo

Afetado diretamente pelo rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015, o rio Gualaxo do Norte tornou-se alvo de muitas pesquisas e monitoramentos hidrológicos e hidrogeológicos. Além disso, trata-se de um dos principais afluentes do rio Doce, uma das mais importantes bacias da região sudeste do Brasil, grande responsável pelo abastecimento de várias cidades e povoados entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Dessa forma, a presente pesquisa realizou um estudo de índices ambientais da localidade do rio Gualaxo do Norte. Para isto foi apresentada uma contextualização geológica, hidrográfica e hidrológica da região onde foram coletadas amostras de sedimentos do leito do rio e disponibilizados pela pesquisadora Deyse Reis. O estudo se baseou em abordagens anteriores sobre índices químicos e toxicológicos. As amostras foram analisadas usando o Índice de Geoacumulação (IGEO) e o Índice de Potencial Risco Ecológico (IRE), levando em consideração as condições geológicas e ambientais da região. A análise revelou concentrações elevadas de elementos como arsênio, chumbo, cobre e manganês, especialmente nas áreas a montante do rompimento da barragem, que foram mais impactadas pelas atividades de mineração. A jusante, foram observadas altas concentrações principalmente dos elementos presentes em grandes quantidades nos rejeitos, como ferro e alumínio, na maioria dos casos. No período seco, os valores de arsênio, por exemplo, chegaram a 118,10 ppm na estação P1, enquanto no período chuvoso atingiram até 353,60 ppm, superando em mais de dez vezes os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 454/2012. A pesquisa verificou, e demonstrou, possíveis irregularidades nas concentrações de elementos químicos que possam agir como contaminantes, podendo afetar a saúde humana ao longo da cadeia alimentar ou do próprio consumo da água.

Palavras-chave: Barragem de rejeitos, Poluentes ambientais, Sedimentos (Geologia), Metais.

Abstract

Directly impacted by the Fundão Dam collapse on November 5, 2015, the Gualaxo do Norte River became the subject of numerous hydrological and hydrogeological studies. As one of the main tributaries of the Doce River, which plays a crucial role in supplying water to several cities and towns across the states of Minas Gerais and Espírito Santo, the Gualaxo do Norte was chosen for an environmental index analysis. This study included a geological, hydrological, and hydrographic contextualization of the region, where sediment samples were collected from the riverbed and provided by researcher Deyse Reis. The research was based on previous studies of chemical and toxicological indices. The sediment samples were analyzed using the Geoaccumulation Index (IGEO) and the Potential Ecological Risk Index (PERI), considering the geological and environmental conditions of the area. The analysis revealed elevated concentrations of elements such as arsenic, lead, copper, and manganese, particularly in areas upstream of the dam breach that were most impacted by mining activities. Downstream, high concentrations were observed mainly for elements commonly found in the tailings, such as iron and aluminum, in most cases. Arsenic levels in station P1 reached 118.10 ppm during the dry season and 353.60 ppm during the rainy season, exceeding by more than tenfold the limits set by CONAMA Resolution 454/2012. The study identified and demonstrated irregularities in the concentrations of chemical elements that could act as contaminants, potentially impacting human health through the food chain or direct water consumption.

Keywords: Tailings Dam, Environmental Pollutants, Sediments (Geology), Metals.

1.1 APRESENTAÇÃO

O Rio Gualaxo do Norte, localizado no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, é um importante curso d'água que atravessa uma região caracterizada pela exploração mineral e pela diversidade geológica. Ele é uma fonte significativa de água para as comunidades locais, a agricultura e a fauna da região. Além disso, o rio desempenha um papel relevante na preservação da biodiversidade e no suporte às atividades econômicas e sociais. Políticas de gestão integrada de recursos hídricos, como a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelecida pela Lei Nº 9.433 de 1997, têm sido implementadas com o objetivo de promover o uso sustentável dos recursos hídricos e garantir o abastecimento de água para as necessidades humanas e ambientais (IBGE, 1997).

Adicionalmente, foi afetado pelo rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, ocorrido no dia cinco de novembro de 2015. A enorme quantidade de lama e resíduos liberados, aproximadamente 39,2 milhões de metros cúbicos, causaram um grande impacto ambiental, social e econômico em grande parte da extensão da bacia do Rio Doce, que apresenta o rio mencionado anteriormente como um de seus mais importantes afluentes (Brito *et al.*, 2019).

A sub-bacia do RGN apresenta registros de atividades de exploração mineral desde o final do século XVII, localiza-se na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, região caracterizada pela grande produção de minérios como o de ferro e manganês, principalmente a partir do começo dos anos 80. Esse tipo de atividade, sempre esteve entre as principais causas de poluição por metais pesados em meio aquático, sendo a contaminação agravada pela exploração extensiva, muitas vezes de forma rudimentar (Costa, 2001).

Diversos estudos hidrológicos foram realizados na região drenada pelo RGN. Segundo Peng *et al.* (2009) o monitoramento ambiental é fundamental para a compreensão da contaminação por metais, visto que a decomposição natural é ineficaz em seu tratamento, diferentemente do que acontece com poluentes orgânicos (Peng *et al.*, 2009).

A análise de amostras de sedimentos coletados no leito do RGN, através da aplicação de índices ambientais, é importante para dimensionar o impacto gerado através de atividades antrópicas recentes, como o rompimento da barragem de Fundão, relacionando com o provável,

e relativo, background marcado por um extenso histórico de intervenções humanas anteriores (Reis, 2019).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar e quantificar os níveis de contaminação por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nos sedimentos do rio Gualaxo do Norte, através da aplicação dos índices de geoacumulação (IGEO) e de risco ecológico potencial (IRE). Além disso, busca-se interpretar os resultados com base nas condições ambientais da região, associando as atividades antrópicas, como a mineração, aos impactos ambientais causados ao longo dos últimos anos. Este estudo pretende fornecer subsídios para a compreensão do grau de poluição local e contribuir para a definição de medidas de recuperação e mitigação na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.

Objetivos específicos incluem:

- Avaliar a distribuição espacial dos EPTs ao longo do rio Gualaxo do Norte, diferenciando as áreas a montante e jusante do local afetado pelo rompimento da Barragem de Fundão.
- Comparar os resultados obtidos nos períodos chuvoso e seco, verificando possíveis variações sazonais nas concentrações dos EPTs.
- Identificar os elementos com maior potencial de risco ecológico, através de pesquisa e comparação com estudos realizados em outras bacias brasileiras.

1.3 JUSTIFICATIVA

O rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 2015, liberou mais de 39 milhões de metros cúbicos de rejeitos contendo metais pesados, como ferro e manganês, diretamente no rio Gualaxo do Norte, um dos afluentes do rio Doce. Este evento foi descrito como uma das maiores tragédias ambientais do Brasil, causando impactos profundos na qualidade da água, na biota local e na saúde das comunidades ribeirinhas (Brito et al., 2019). Os sedimentos, particularmente, desempenham um papel crucial, funcionando como reservatórios de poluentes que podem ser remobilizados por variações climáticas e atividades antrópicas, representando riscos contínuos ao ecossistema e à saúde pública (Peng et al., 2009).

Variados estudos destacam que a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), como os metais pesados, pode afetar negativamente a fauna aquática, a flora e as populações humanas ao longo do tempo, devido à sua capacidade de bioacumulação e toxicidade mesmo em concentrações baixas (Alloway, 2013). No caso do Rio Gualaxo do Norte, o histórico de atividades mineradoras, combinado com o desastre de Fundão, reforça a necessidade de um monitoramento rigoroso dos EPTs (Reis, 2019).

Além disso, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece limites para a presença de metais pesados em sedimentos, conforme a Resolução nº 454/2012, que classifica os sedimentos em diferentes níveis de contaminação. Portanto, este estudo, ao aplicar os índices de geoacumulação (IGEO) e de risco ecológico (IRE), oferece uma avaliação técnica da contaminação dos sedimentos, permitindo diagnósticos precisos da qualidade ambiental e identificando áreas críticas para ações de remediação e controle (CONAMA, 2012).

A pesquisa contribui significativamente para o campo da geologia ambiental e ecotoxicologia, ao fornecer dados robustos que podem apoiar decisões em políticas públicas e estratégias de recuperação ambiental na bacia do rio Doce (Barbieri, 2016).

2.1 ANÁLISE DE SEDIMENTOS DE FUNDO DA BACIA DO RGN

Sedimentos são formados principalmente por rochas e solos degradados devido a processos de intemperismo, acumulando-se ao longo dos cursos d'água, onde são transportados pela força do rio. Eles tendem a se depositar em áreas de menor vazão e se dispõem em camadas intercaladas, o que resulta em composições variadas. Essas características tornam os sedimentos elementos essenciais para o entendimento das dinâmicas das bacias hidrográficas (Förstner, 2004; Costa, 2007).

O rompimento da barragem de Fundão em 2015 provocou alterações significativas nos sedimentos do Rio Gualaxo do Norte. Segundo Reis (2019), já existiam indicações de concentrações anômalas de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) devido à origem das rochas no Quadrilátero Ferrífero. A catástrofe resultou em modificações substanciais nas propriedades físico-químicas dos sedimentos de fundo, com um impacto notável no meio ambiente e na qualidade dos recursos hídricos.

Esta pesquisa foi embasada na tese de doutorado sobre a contaminação química e microbiológica em águas e sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, considerando tanto os fatores de pressão antrópicos quanto o desastre da barragem (Reis, 2019). Outra fonte importante foi o relatório do Programa de Caracterização Geoquímica de Rejeitos, Solos e Sedimentos, oferecido pela Fundação Renova (Golder Associates, 2017), que desempenha um papel crucial na recuperação da bacia.

No que se refere ao background geoquímico e índices ambientais para sedimentos, as principais fontes consultadas incluíram Dung *et al.* (2013), que apresenta uma síntese de diversos índices ambientais aplicados a solos e sedimentos; Barbieri (2016), que ressalta a importância do índice de geo-acumulação (IGEO) para avaliar a poluição em sedimentos de rios; e Arruda *et al.* (2020), que exploraram o índice de potencial risco ecológico (IREI) em estudos na sub-bacia do rio Cuñaní. Reimann *et al.* (2005) também contribuem com discussões sobre diferentes metodologias para estabelecer o background geoquímico.

Para este estudo, os valores de background geoquímico foram essencialmente derivados dos trabalhos de Rodrigues (2012) e Costa (2015), que podem ser observados a seguir na **Tabela 2.1**, cujas pesquisas detalham as características geoquímicas naturais e as variabilidades

elementares no ambiente de estudo atual. Estes valores foram integrados para diferenciar as fontes naturais das antrópicas na acumulação de metais, permitindo uma avaliação mais precisa das condições ambientais da bacia do rio Gualaxo do Norte.

Tabela 2.1: Valores de background para os elementos estudados (Rodrigues, 2012; Costa, 2015).

Elementos	As (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Mn (ppm)	Al (ppm)	Fe (%)
Background	64,2	292,5	48,3	39,0	65,3	43,8	1600,0	1,8	8,2

2.2 ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

No contexto das discussões sobre os impactos dos elementos potencialmente tóxicos (EPTs) e como estes se relacionam com a bacia do Rio Gualaxo do Norte e o Quadrilátero Ferrífero, este capítulo explora a dinâmica e os efeitos destas substâncias. Os EPTs, incluindo metais pesados como arsênio, chumbo e cobre, são elementos que ocorrem naturalmente no ambiente, mas que podem tornar-se prejudiciais em concentrações elevadas. Eles podem ser mobilizados através de processos geológicos naturais, como a erosão e atividade vulcânica, ou por meio de atividades antrópicas, como mineração, indústria e agricultura. Tais elementos possuem a capacidade de bioacumular e apresentar toxicidade, destacando a importância de monitorá-los cuidadosamente para mitigar seus efeitos adversos à saúde humana e ao equilíbrio ecológico (Alloway, 2013; Dudka & Adriano, 1997).

No Quadrilátero Ferrífero, EPTs como arsênio, cobre, chumbo, cromo, níquel, zinco, alumínio, ferro e manganês são notáveis por suas concentrações potencialmente altas devido às extensas atividades de mineração. (elementos calcófilos como arsênio cobre e chumbo, no caso na mineração de ouro. Ferro e manganês, e metais pesados como o vanádio, na mineração de ferro). Estudos indicam que o manganês, por exemplo, encontra-se em altas concentrações em itabiritos e dolomitas ferruginosas, refletindo a complexidade mineralógica da área. Ferro e alumínio são predominantemente encontrados nas formações de Banded Iron Formations (BIFs), transformadas em hematita e magnetita através de processos geológicos (Dorr, 1969; Herz, 1970).

Especificamente na bacia do Rio Gualaxo do Norte, a mineralogia local apresenta uma relação direta com a presença de EPTs, onde o arsênio e o zinco são frequentemente encontrados em associação com minerais como arsenopirita (FeAsS) e esfalerita (ZnS), respectivamente. O cobre, chumbo e cromo estão associados à calcopirita (CuFeS_2), galena

(PbS) e cromita (FeCr_2O_4). Ademais, o níquel e o ferro são comumente ligados a lateritas e ricos depósitos de hematita (Fe_2O_3), enquanto o manganês é predominante na forma de pirolusita (MnO_2) (Costa, 2015).

O mercúrio (Hg), que não foi contemplado durante a amostragem apresentada no presente trabalho, é um dos principais contaminantes presentes nos sedimentos, especialmente em regiões de mineração, como na bacia do RGN. A atividade histórica de garimpo de ouro no Quadrilátero Ferrífero, associada à avalanche de lama, pode ter remobilizado esse elemento. Uma vez relançado dentro das águas, as mudanças nas condições físico-químicas do ambiente, como variações no pH e no potencial redox, favorecem a sua liberação para a coluna d'água. Isso pode resultar na formação de mercúrio metilado (MeHg), que é extremamente tóxico e bioacumulativo. Estudos realizados na Bacia do Rio São Francisco mostram que concentrações de mercúrio em sedimentos podem ultrapassar os limites estabelecidos pela legislação brasileira, o que demonstra a necessidade de monitoramento contínuo para evitar impactos no meio ambiente e na saúde humana. Amostras da região, do rio utilizado como exemplo, indicam que áreas de mineração de ouro apresentaram os maiores níveis de mercúrio (Rezende et al., 2011).

Dessa forma, é importante refletir sobre a importância de compreender as fontes, mobilização e impactos dos EPTs na saúde e no ambiente, ilustrando a necessidade de estudos continuados e de práticas de gestão ambiental e recuperação que considerem tanto as características geológicas quanto os aspectos de saúde pública relacionados aos EPTs no contexto do Quadrilátero Ferrífero. A pesquisa intensiva e as medidas mitigadoras são fundamentais para proteger os ecossistemas aquáticos e as comunidades locais dos riscos associados à contaminação por metais pesados.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em 2012, promulgou a Resolução CONAMA 454/2012, estabelecendo padrões específicos para as concentrações de metais pesados em sedimentos dragados. Esta resolução define dois níveis (classes) de classificação para as concentrações de contaminantes: Nível 1, sob o qual se espera uma baixa probabilidade de efeitos adversos à biota, e Nível 2, acima do qual há uma expectativa de efeitos adversos prováveis à biota.

Tabela 2.2: Classificação de níveis estabelecidos pelo CONAMA para materiais a serem dragados em águas doces, expressos por unidade de material seco. Adaptado de CONAMA (2012).

(PPM)	As (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Mn (ppm)	Al (ppm)	Fe (%)
Nível 1	5,9	37,3	35,7	18	123	35	-	-	-
Nível 2	17	90	197	35,9	315	91,3	-	-	-

Neste estudo, as concentrações dos elementos monitorados serão avaliadas com base nas classificações estabelecidas. No entanto, é essencial considerar as particularidades geológicas do local ao aplicar esses níveis de referência. A ausência de ferro, alumínio e manganês nas normas regulatórias, como estipulado pela Resolução CONAMA 454/2012, decorre de sua ampla presença no ambiente natural, do menor risco de toxicidade quando comparados a outros metais pesados, e das dificuldades em definir limites que sejam ao mesmo tempo significativos e aplicáveis de forma universal. Estes fatores, em conjunto, fundamentam a decisão de não incluir esses metais nas categorias de classificação de contaminação de sedimentos.

2.3 ÍNDICE DE GEOACUMULAÇÃO (IGEO)

O Índice de Geoacumulação (Igeo), calculado a partir da proposição feita por Müller (1979), é um dos métodos de estimativa mais amplamente usados para determinar o grau, ou o nível de contaminação, de um metal pesado específico no ambiente. O índice é representado pela equação:

$$I_{geo} = \ln \frac{C_n}{(1,5 \times B_n)}$$

Onde C_n é a concentração medida do elemento nos sedimentos, B_n é o valor de *background* geoquímico e a constante 1,5 permite a análise de flutuações naturais que ocorrem na quantificação de uma determinada substância, presente no ambiente, e detectar influências antrópicas mesmo que pequenas (Barbieri, 2016).

Este índice divide o espaço amostral em sete graus, ou classes, diferentes que podem ser observadas na Tabela 2.3, a seguir.

Tabela 2.3 - Classes do Índice de Geoacumulação, segundo Duodu *et al.* (2011).

Classe	Qualidade do Sedimento
Igeo < 0	Não Poluído
0 < Igeo < 1	Não poluído a moderadamente poluído
1 < Igeo < 2	Moderadamente poluído
2 < Igeo < 3	Moderadamente a muito poluído
3 < Igeo < 4	Muito poluído
4 < Igeo < 5	Muito a altamente poluído
Igeo > 5	Altamente poluído

Se o valor calculado para algum metal pesado específico for negativo, significa que não há influência antrópica no ambiente para esse parâmetro, caso o valor seja positivo, significa que existe interferência antrópica e o nível de contaminação escala na medida que o valor do índice aumenta.

2.4 ÍNDICE DE RISCO ECOLÓGICO POTENCIAL (IRE)

A maioria das metodologias desenvolvidas para avaliar poluição de metais pesados em amostras de sedimentos trata apenas de um contaminante por vez, como no caso do índice de geoacumulação, porém é de domínio da ciência que variados tipos de elementos traços acumulam-se simultaneamente, podendo causar poluição combinada. Dessa forma, Hakanson (1980) desenvolveu o Índice de Risco Ecológico Potencial que possibilita uma abordagem mais abrangente, através da introdução de um fator de toxicidade para determinada substância que também pode ser utilizado para avaliar o risco combinado de poluentes em diversos ambientes.

Essa metodologia inovadora ainda foi muito pouco utilizada, aparecendo apenas em trabalhos recentes como o de Soliman *et al.* (2015) que exalta a importância de uma análise de background geoquímico minuciosa, considerando não somente o nível de metais pesados nos sedimentos, mas associando fatores ecológicos e ambientais com a toxicologia. Sendo assim, o risco ecológico potencial de um único elemento (E_r) e o índice de risco ecológico potencial multielemento (RI), podem ser calculados através das seguintes equações:

- $C_f^i = C_S^i / C_n^i$

Onde C_f^i é o coeficiente de poluição de um único elemento; C_S^i é o valor medido de metais pesados nos sedimentos e C_n^i é o valor de *background* para os metais pesados.

- $E_r^i = T_r^i \times C_f^i$

Onde E_r^i representa o risco ecológico potencial de um único elemento; T_r^i é o fator de toxicidade.

- $RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$

De acordo com Hakanson, (1980), as classificações sugeridas para os valores de Er são:

Tabela 2.4 - Classificações de Er.

Valores	Classificação
$Er < 40$	risco ecológico baixo;
$40 < Er \leq 80$	risco ecológico moderado;
$80 < Er \leq 160$	risco ecológico considerável;
$160 < Er \leq 320$	risco ecológico alto;
$Er > 320$	risco ecológico altíssimo.

Fonte: (Hakanson, 1980).

As classificações para os valores de RI são:

Tabela 2.5 - Classificações de RI.

Valores	Classificação
$RI \leq 150$	risco ecológico baixo;
$150 < RI \leq 300$	risco ecológico moderado;
$300 < RI \leq 600$	risco ecológico alto;
$Er > 600$	risco ecológico altíssimo.

Fonte: (Hakanson, 1980).

O trabalho foi elaborado conforme os itens descritos a seguir.

3.1 BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL

Na elaboração dos mapas temáticos presentes neste trabalho, foi utilizado o software de código aberto QGIS 3.16 Hannover, desenvolvido pelo QGIS Development Team 2020, utilizando-se de bases cartográficas de domínio público, fornecidas por órgãos e instituições governamentais. A base cartográfica geológica trata-se do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero 2019, disponibilizada pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), produzida através do levantamento, e compilação, de numerosos estudos realizados anteriormente.

3.2 ESTAÇÕES DE AMOSTRAGEM

Após avaliação de pontos estratégicos, foram selecionadas 27 estações de amostragem ao longo da bacia do rio Gualaxo do Norte, de forma a abranger a geologia regional com eficiência, a informações de localização podem ser vistas, a seguir, na Tabela 3.1. Houve campanhas em março e agosto de 2018, respectivamente período chuvoso e seco que fizeram parte da tese de doutorado da Dra Deyse Almeida dos Reis.

Tabela 3.1 - Localizações das estações de amostragem na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.

Estações	Manancial	Coordenadas sistema UTM		Coordenadas geográficas	
		mE	mS	S	O
P1	Rio Gualaxo do Norte	658681	7756081	20°17'12.18"S	43°28'51.32"O
P2	Córrego Água Suja	658681	7756081	20°17'13.90"S	43°28'51.16"O
P3	Rio Gualaxo do Norte	659100	7756339	20°17'50.21"S	43°28'36.99"O
P4	Sem nome "Brejo"	659477	7756634	20°16'55.76"S	43°28'21.84"O
P5	Rio Gualaxo do Norte	659828	7756731	20°16'51.48"S	43°28'10.58"O
P6	Sem nome "Ponte de madeira"	659968	7756890	20°16'43.42"S	43°28'30.62"O
P7	Córrego do Lopes	660719	7756120	20°17'10.99"S	43°27'39.66"O
P8	Rio Gualaxo do Norte	662828	7756847	20°16'46.88"S	43°26'28.48"O
P9	Córrego da Lavoura	662881	7756718	20°16'51.25"S	43°26'24.99"O
P10	Rio Gualaxo do Norte	663817	7757180	20°16'35.50"S	43°25'54.16"O

Estações	Manancial	Coordenadas sistema UTM		Coordenadas geográficas	
		mE	mS	S	O
P11	Rio Gualaxo do Norte	677700	7757999	20°16'50.23"S	43°17'57.42"O
P12	Córrego do Gama	677716	7758049	20°16'30.12"S	43°17'55.83"O
P13	Córrego Gamela	677948	7757337	20°16'25.90"S	43°17'47.77"O
P14	Rio Gualaxo do Norte	682831	7753819	20°18'13.35"S	43°14'57.29"O
P15	"Sem nome"	682833	7753820	20°18'19.72"S	43°14'58.02"O
P16	Córrego Coelho	683769	7753953	20°18'14.41"S	43°14'25.68"O
P17	Córrego do Crasto	686182	7753692	20°18'21.56"S	43°13'2.38"O
P18	Rio Gualaxo do Norte	687821	7754377	20°17'59.76"S	43°12'7.91"O
P19	Córrego das Pedras	688519	7754649	20°17'49.58"S	43°11'41.94"O
P20	Ribeirão Águas Claras	687845	7757992	20°16'00.15"S	43°12'6.35"O
P21	Rio Gualaxo do Norte	689465	7757456	20°16'16.97"S	43°11'11.37"O
P22	Córrego Campinas	691063	7757807	20°16'6.17"S	43°10'15.63"O
P23	Córrego do Engenho	695505	7758227	20°15'51.05"S	43° 7'42.98"O
P24	Ribeirão Paciência	695799	7758888	20°15'28.59"S	43° 7'33.91"O
P25	Rio Gualaxo do Norte	696005	7758838	20°15'29.23"S	43° 7'24.46"O
P26	Córrego Grande	699362	7756892	20°16'32.41"S	43° 5'28.80"O
P27	Rio Gualaxo do Norte	701982	7755756	20°17'8.86"S	43° 3'57.53"O

Os pontos com códigos indo de P01 a P10 foram coletados a montante do local do desastre ambiental, enquanto o restante se localiza a jusante dele (P11 a P27). A comparação dos dois grupos mencionados é importante para identificar impactos negativos causados por outras práticas poluentes alheias ao rompimento da barragem, pois na região da bacia estudada há inúmeras atividades antrópicas ocorrendo por longos períodos, aumentando a assertividade da pesquisa

O mapa geológico da Figura 3.1, a seguir, apresenta a localização dos pontos de amostragem, a indicação dos principais litotipos presentes na região. A Figura 3.2, se trata do mapa hipsométrico da área de estudos.

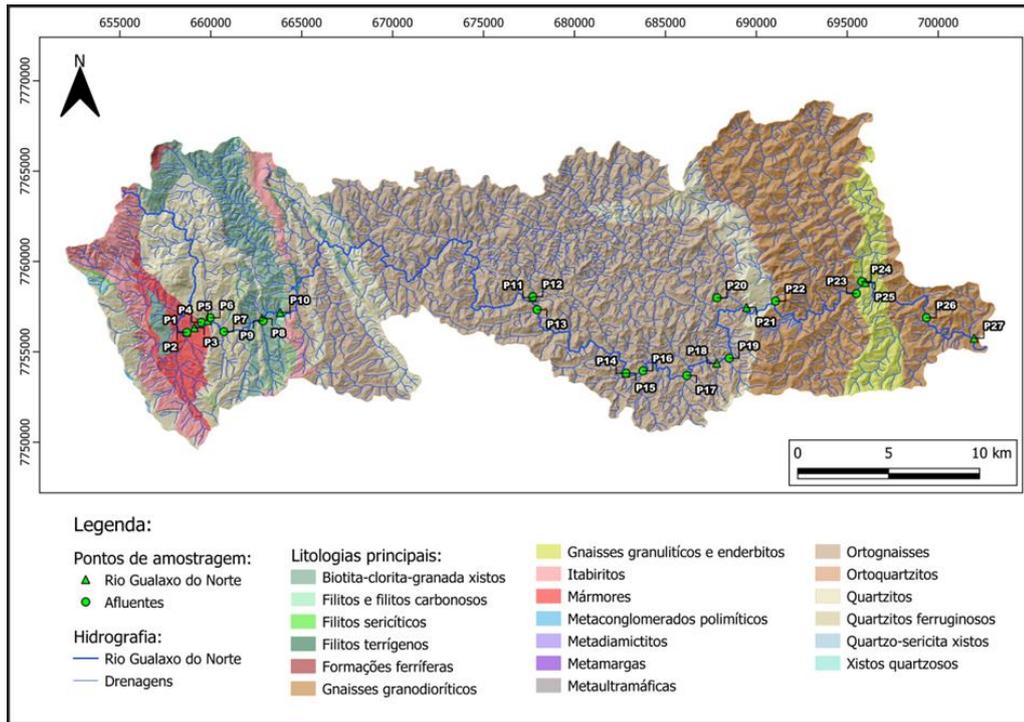


Figura 3.1: Localização das estações de amostragem nos diferentes litotipos presentes na bacia do Rio Gualaxo do Norte (Elaborado pelo autor, fontes dos dados: (Reis, 2019, Endo *et al.* 2019).

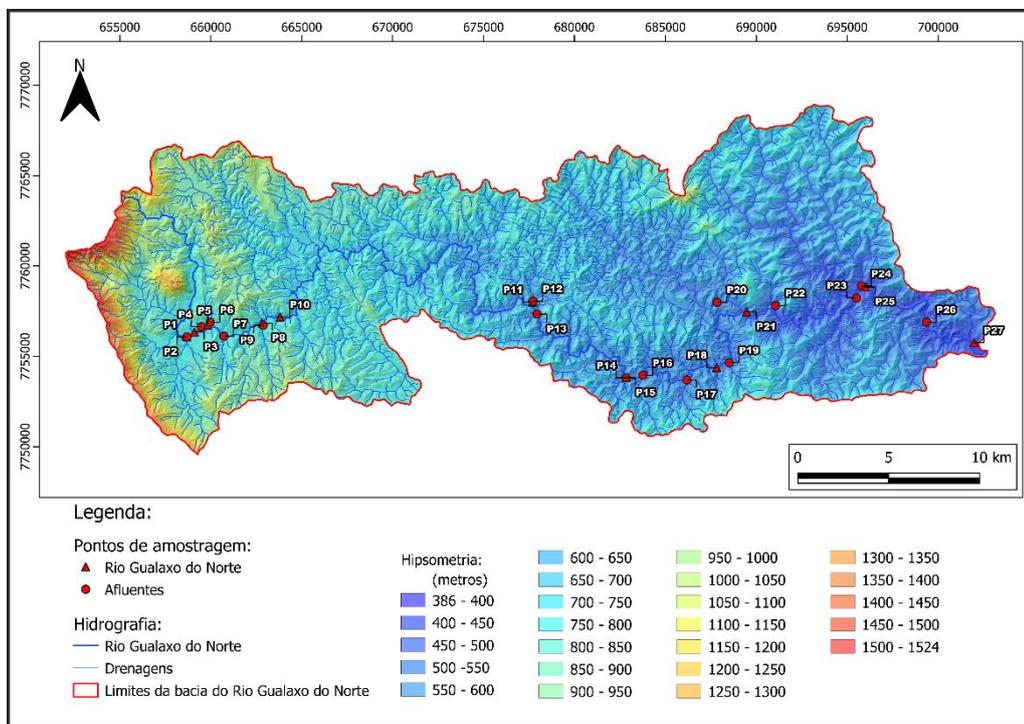


Figura 3.2: Mapa hipsométrico da bacia do Rio Gualaxo do Norte com a localização das estações de amostragem. Elaborado pelo autor a partir de bases públicas (TOPODATA, 2021).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS

De acordo com Reis (2019), em 27 estações de amostragem, foram coletados aproximadamente 2 kg de sedimento de fundo nos leitos pertencentes à bacia do Rio Gualaxo do Norte, utilizando uma haste alongada. As amostras foram acondicionadas em vasilhames plásticos e secas à temperatura ambiente. Posteriormente, os sedimentos passaram por processos laboratoriais específicos para caracterização granulométrica, conforme a classificação de tamanhos proposta por Wentworth (1922), que separa as frações em: areia muito grossa ($>1000 \mu\text{m}$), areia grossa ($500-1000 \mu\text{m}$), areia média ($250-500 \mu\text{m}$), areia fina ($125-250 \mu\text{m}$), areia muito fina ($63-125 \mu\text{m}$) e silte ($<63 \mu\text{m}$).

Para a análise da matéria orgânica, 20 g dos sedimentos, da fração de $250 \mu\text{m}$, foram submetidos à oxidação com dicromato de potássio, seguindo as diretrizes de Donagema *et al.* (2011). A menor fração granulométrica ($<63 \mu\text{m}$) foi digerida com água régia (HCl, 3:1) para extração de metais e semimetais. As amostras peneiradas (1 g) foram secas em estufa por 2 horas a $100 \text{ }^\circ\text{C}$. A digestão parcial foi realizada adicionando 7,0 mL de HCl concentrado e 2,3 mL de HNO_3 , seguida de repouso por 16 horas à temperatura ambiente e aquecimento em placa a $90-100 \text{ }^\circ\text{C}$ por 2 horas.

Após o aquecimento, as amostras foram filtradas utilizando papel quantitativo JP-41 e o resíduo foi lavado com água deionizada. O filtrado foi coletado em frascos volumétricos de 50 mL e armazenado a $4 \text{ }^\circ\text{C}$. As concentrações químicas foram determinadas por Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES, modelo Agilent 725). Os resultados foram validados com um Material de Referência Padrão (SRM LKSD-2), garantindo taxas de recuperação entre 95% e 120%.

As Tabelas 3.2 e 3.3, a seguir, apresentam as concentrações de metais e semimetais nas amostras coletadas durante os períodos seco e chuvoso, evidenciando uma tendência de maior mobilização no período chuvoso.

Tabela 3.2 - Concentração de metais e semimetais em sedimentos no período seco (mg kg⁻¹).

Estações	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Al	Fe	Pb
P1	118.1	26.4	54.7	35.1	62.0	11410.1	5552.3	234184.0	12.4
P2	63.9	45.9	27.6	16.1	42.4	9473.1	9504.0	236319.8	8.8
P3	43.3	38.4	12.2	11.7	31.9	8539.1	4267.6	303676.8	8.0
P4									
P5	65.1	38.9	17.0	15.3	33.1	11331.0	5554.5	281001.5	11.6
P6	51.5	68.2	16.6	35.2	37.1	4729.5	5928.2	188293.6	13.4
P7	17.7	103.2	38.6	123.4	65.0	8762.7	5142.5	260682.7	12.1
P8	18.4	94.8	23.8	24.5	46.2	2292.5	13362.0	175760.4	10.4
P9	43.6	37.7	8.3	13.6	29.5	4227.8	2396.6	267012.9	<LQ
P10	59.4	39.3	23.3	23.8	38.5	8132.8	8234.4	222464.3	9.7
P11	9.4	41.9	8.8	14.0	38.3	1141.1	21430.0	93586.7	14.3
P12	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	5.9	97.1	1166.5	<LQ
P13	16.6	25.1	7.2	7.1	28.2	1217.5	6267.6	194332.8	<LQ
P14	<LQ	12.9	2.5	<LQ	28.5	735.9	1418.3	283013.4	<LQ
P15	<LQ	11.9	3.7	<LQ	20.8	806.9	6088.2	203830.3	<LQ
P16	<LQ	11.4	3.5	<LQ	22.2	924.5	3389.4	207927.0	<LQ
P17	<LQ	16.8	5.1	<LQ	28.9	825.7	4784.8	221372.7	<LQ
P18	9.1	27.0	5.1	6.9	28.9	915.1	3749.3	251125.6	<LQ
P19	<LQ	18.0	4.1	<LQ	24.3	498.3	6728.9	194268.1	<LQ
P20	<LQ	28.1	7.2	7.7	48.6	3133.8	33265.5	60665.7	48.2
P21	11.3	26.1	6.1	6.2	28.0	1214.4	3814.1	257730.4	<LQ
P22	<LQ	125.1	21.1	25.4	42.9	561.9	32007.8	129064.5	21.3
P23	<LQ	24.2	8.2	4.0	23.7	690.1	8577.2	208877.4	<LQ
P24	<LQ	23.4	10.2	5.3	28.3	675.5	7200.3	175791.8	7.1
P25	<LQ	8.1	1.5	<LQ	26.1	735.5	624.9	301504.6	<LQ
P26	<LQ	12.8	4.6	<LQ	18.9	496.1	7386.8	187767.9	<LQ
P27	8.2	13.4	2.8	<LQ	26.5	626.6	1572.2	292060.3	<LQ
LQ	7.6	1.1	1.2	3.0	0.3	5.6	24.5	7.2	7.1

LQ*- Limite de Quantificação (mg kg⁻¹)

Tabela 3.3: Concentração de metais e semimetais em sedimentos no período chuvoso (mg kg⁻¹).

Estações	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Al	Fe	Pb
P1	353.6	34.2	53.4	44.0	64.4	9004.2	9496.6	249963.7	18.0
P2	48.4	50.0	66.1	20.4	50.4	18683.6	20819.6	209055.0	17.6
P3	39.8	38.2	12.7	9.8	32.6	4856.7	4802.1	255357.8	<LQ
P4									
P5	33.6	34.9	17.1	8.2	24.9	5919.8	5582.0	224963.0	<LQ
P6	36.5	64.2	18.9	36.8	43.8	2788.1	5641.4	178257.2	11.9
P7	15.6	63.0	36.3	101.6	87.6	7996.0	4457.9	170496.9	15.2
P8	44.9	42.2	19.5	12.8	32.0	6983.9	6761.2	252898.4	7.5
P9	26.9	103.1	32.6	51.1	93.5	2536.6	19472.8	139300.5	31.0
P10	48.1	34.1	22.7	12.8	30.5	7336.3	12179.6	191574.8	9.1
P12	16.3	59.0	11.5	11.4	114.8	1136.3	19466.9	111119.0	13.8
P13	<LQ	14.7	3.2	3.1	30.0	383.6	6224.6	162180.0	<LQ
P14	12.9	13.4	5.2	3.4	19.9	1279.5	2165.1	175311.4	<LQ
P15	<LQ	14.6	5.4	<LQ	24.6	1020.3	9457.3	172645.2	<LQ
P16	<LQ	11.9	2.7	<LQ	20.1	718.8	5376.1	185015.4	<LQ
P17	9.4	14.0	3.3	5.5	21.0	941.1	2045.3	210449.7	<LQ
P18	32.8	24.2	8.9	10.0	98.5	4370.8	2169.5	203656.3	<LQ
P19	<LQ	12.9	3.9	<LQ	25.6	394.7	5350.2	161140.7	8.0
P20	<LQ	15.1	4.4	<LQ	49.3	224.0	13009.0	39991.3	16.5
P21	8.7	12.0	3.5	<LQ	22.1	868.5	2074.6	240287.4	<LQ
P24	19.8	117.8	34.6	23.3	402.9	937.3	19091.5	96438.9	25.8
P25	<LQ	10.1	2.2	<LQ	22.7	683.3	1102.1	255051.3	<LQ
P26	<LQ	36.8	14.5	9.7	40.5	826.0	40072.7	134012.7	26.2
P27	<LQ	15.6	3.6	<LQ	29.8	916.6	1202.5	328741.2	<LQ
LQ	7.6	1.1	1.2	3.0	0.3	5.6	24.5	7.2	7.1

LQ*- Limite de Quantificação (mg kg⁻¹)

CONTEXTO HIDROGRÁFICO

A bacia do Rio Gualaxo do Norte, localizada no estado de Minas Gerais abrange uma área de aproximadamente 143 mil hectares. Ela pode ser abordada como uma microbacia existente dentro do contexto da sub-bacia do Rio Piranga, que por sua vez, trata-se de um afluente do Rio Doce, que dá nome a bacia principal (IBGE, 1997). A relação descrita pode ser observada no mapa da Figura 4.1, a seguir.

O RGN nasce na Serra do Espinhaço, em altitudes próximas a 1380 metros, nas redondezas do município de Ouro Preto (Minas Gerais), percorrendo 60 quilômetros até desaguar no Rio do Carmo. O Rio Piranga brota na cidade de Ressaquinha (Minas Gerais), também na serra da Mantiqueira, percorrendo 5 cidades até se encontrar com o Rio do Carmo na divisa dos municípios de Ponte Nova e Rio Doce, dando origem ao rio de mesmo nome (IBGE & ANA, 2021).

A bacia do Rio Doce, considerada uma das mais importantes da região Sudeste do Brasil, drena toda a porção leste do estado de Minas Gerais e grande parte do oeste e centro do estado do Espírito Santo. Com uma orientação predominante de oeste para leste (W-E), como mencionado, o Rio Doce nasce na Serra da Mantiqueira e percorre cerca de 853 km até desaguar no Oceano Atlântico, na cidade de Linhares, Espírito Santo. Ao longo de seu percurso, a bacia hidrográfica abrange uma área de aproximadamente 83.400 km² e atravessa dois estados, abrangendo 230 municípios, dos quais 202 estão em Minas Gerais e 28 no Espírito Santo.

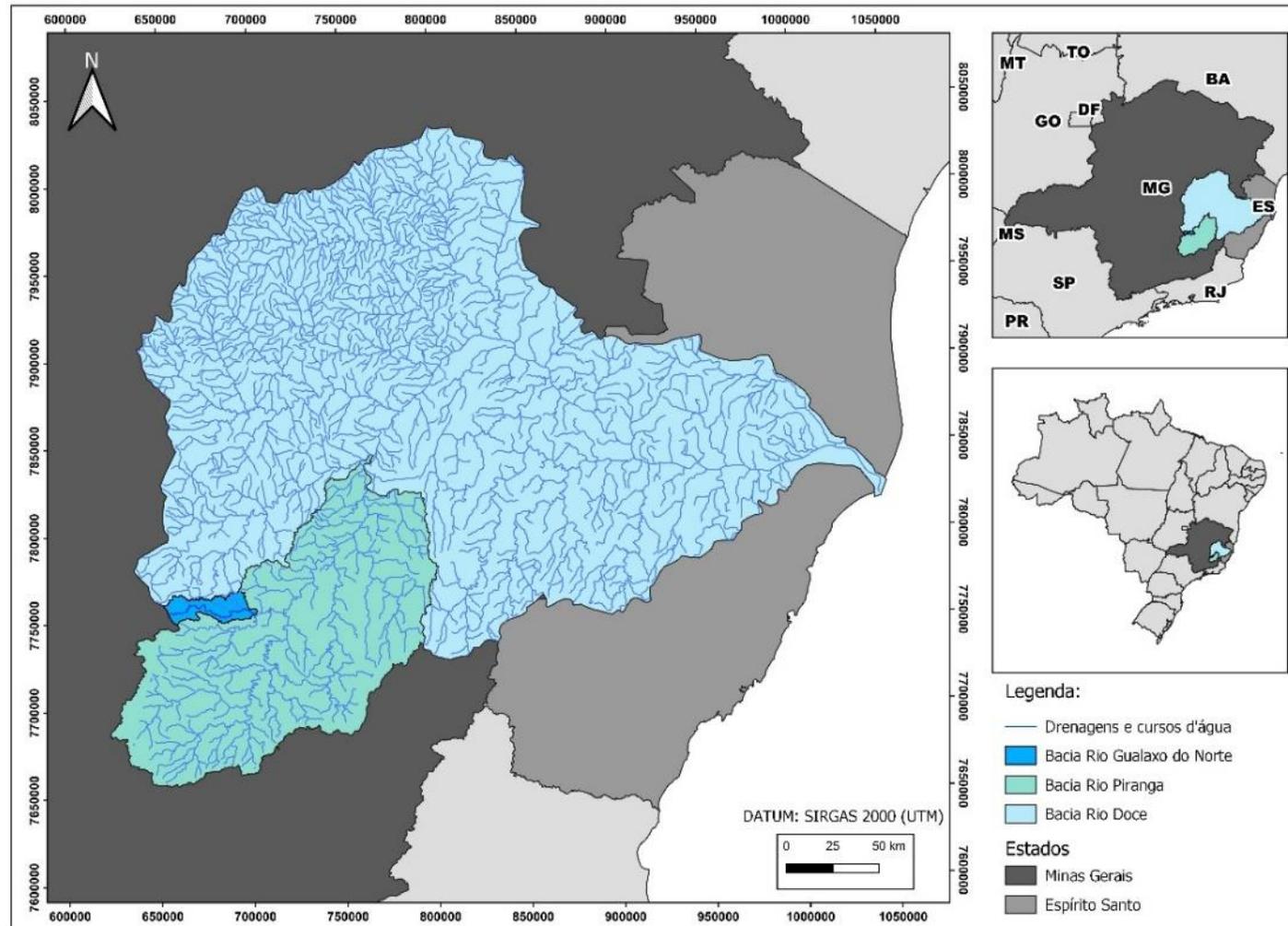


Figura 4.1 - Mapa de contextualização hidrográfica da microbacia do Rio Gualaxo do Norte. Elaborado pelo próprio autor a partir de bases públicas (IBGE & ANA, 2021).

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A bacia do rio Gualaxo do Norte é localizada na borda sudeste da denominada região do Quadrilátero Ferrífero (QF), que por sua vez, segundo Almeida (1977), está inserida na porção meridional do cráton São Francisco (Figura 5.2). O QF é uma das regiões de geologia pré-cambriana de maior relevância econômica e acadêmica do Brasil, abrigando importantes depósitos de ferro, ouro e outros recursos minerais em seus domínios.

O Cráton São Francisco e seus limites têm sido alvo de diversos rearranjos estruturais e de realocação desde a época em que foram propostos núcleos arqueanos no Sul e Centro-leste do escudo brasileiro, até que recentemente, mais especificamente do QF na porção central, a Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto divulgou um novo mapa que traduz detalhadamente as porções geológicas mapeadas neste contexto (Chemale jr, 1991).

O Quadrilátero Ferrífero consiste em unidades litoestratigráficas e litodêmicas de idades arqueanas, proterozoicas (paleo e meso) e cenozoicas, são eles os Complexos Metamórficos, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, Supergrupo Estrada Real, Grupo Barbacena, Supergrupo Espinhaço, e Unidades sedimentares do Paleógeno ao Holoceno (Endo *et al.* 2020). A Figura 5.1 e a Figura 5.2, a seguir, apresentam a coluna estratigráfica e mapa geológico do quadrilátero ferrífero atualizado por Endo *et al.*(2019b). respectivamente.

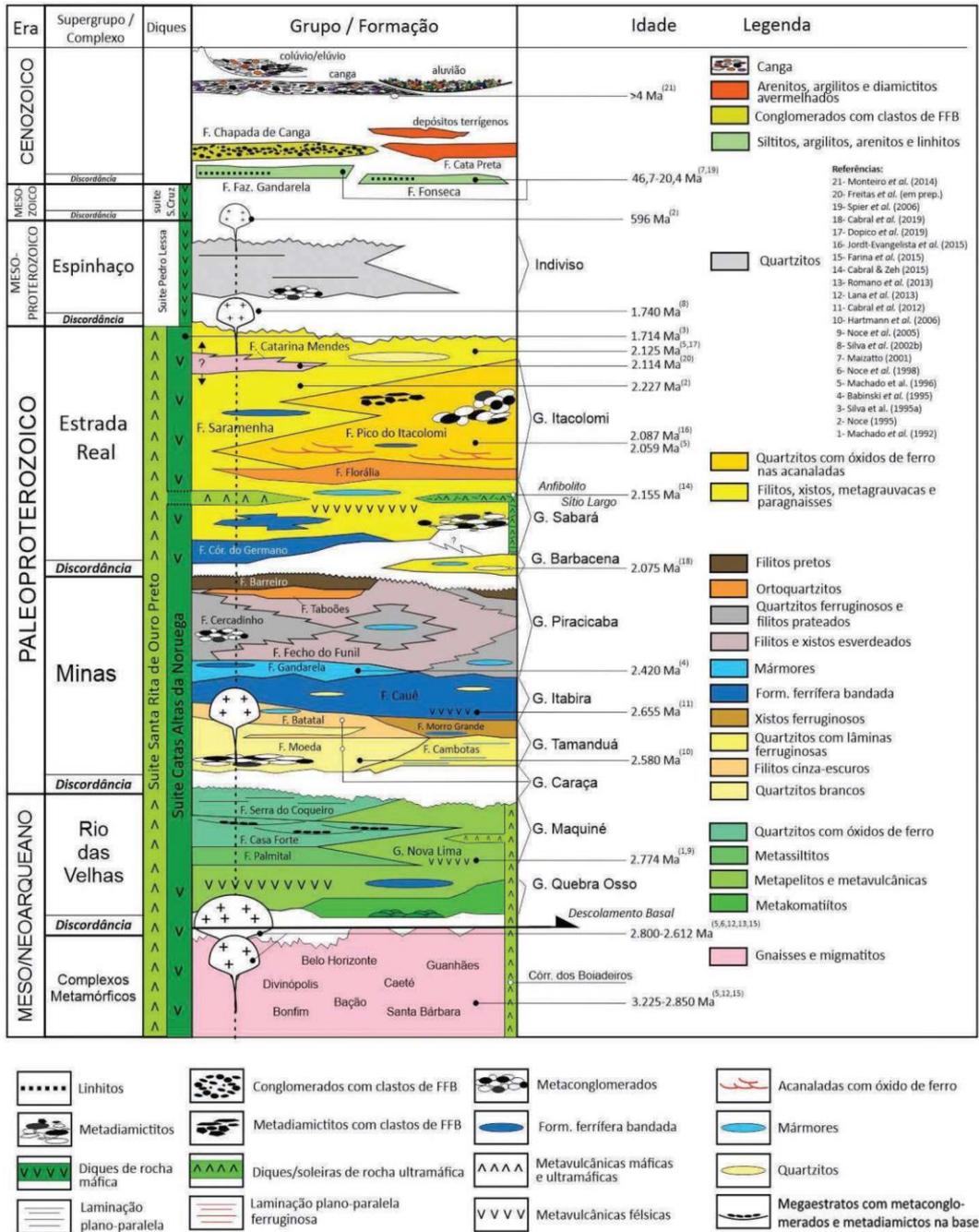


Figura 5.1 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2019b).

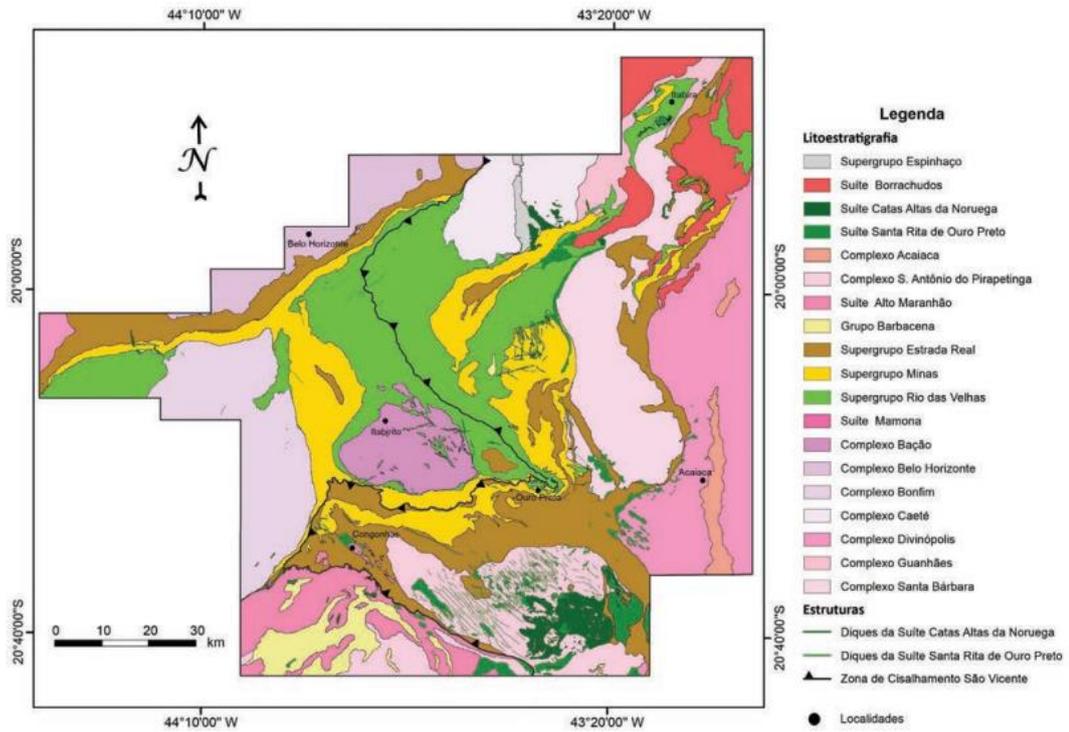


Figura 5.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019a).

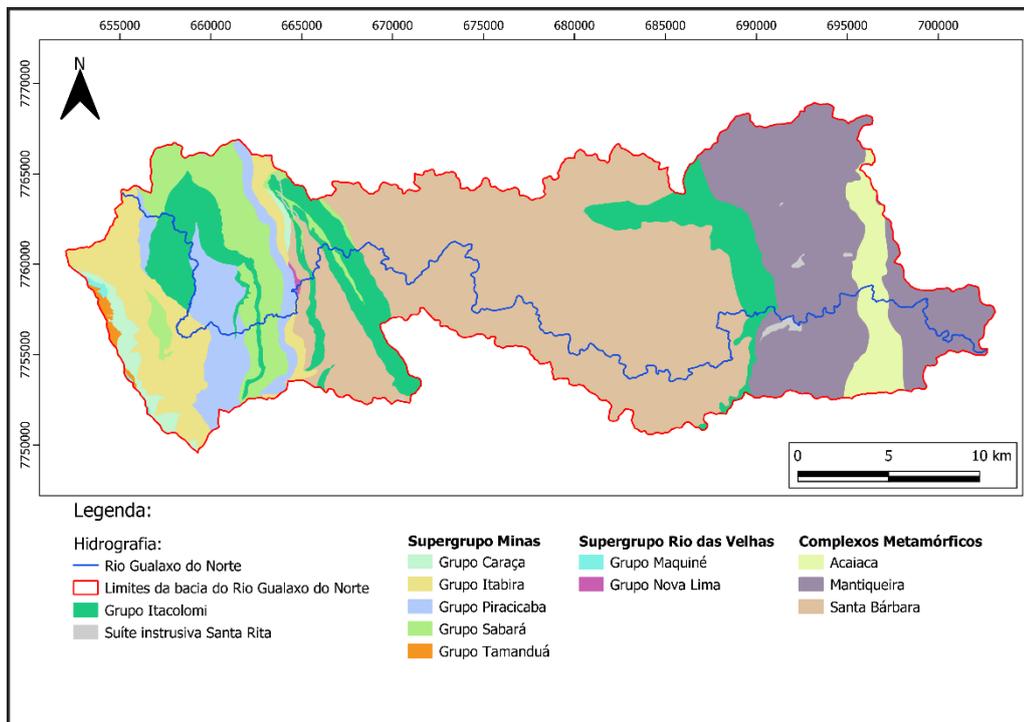


Figura 5.3: Mapa geológico da bacia do Rio Gualaxo. Elaborado pelo autor, fonte: (Endo *et al.* 2019a).

5.1 QUADRO ESTRATIGRÁFICO

A área da bacia do rio Gualaxo do Norte é marcada pela ocorrência de rochas que vão desde a base da coluna do Quadrilátero Ferrífero até o Supergrupo Estrada Real. Como pode ser observado anteriormente no mapa da Figura 5.3, no médio e baixo curso há a ocorrência do Complexo Santa Bárbara, da Província Geotectônica São Francisco, e os Complexos Acaiaca e Mantiqueira da Província Geotectônica Mantiqueira. (Costa, 2001).

5.1.1 Unidades do embasamento

O embasamento do Quadrilátero Ferrífero compõe-se de gnaisses de composição TTG (tonalito-trondhjemito-granodiorito), granitos, anfibolitos e migmatitos que apresentam idades arqueanas e proterozóicas (Schorscher, 1992). Esses domínios apresentam morfologia dômica, recebendo denominações locais.

5.1.2 Complexos metamórficos

O Complexo Metamórfico Mantiqueira consiste em uma sequência de gnaisses, predominantemente ortoderivados e com composições variadas. Esses gnaisses são frequentemente migmatizados e/ou apresentam intercalações de anfibolitos e metagrabados (Brandalise, 1991)

O Complexo Metamórfico Acaiaca, apresenta-se na área de estudos como uma faixa composta principalmente por rochas de alto grau metamórfico, incluindo chanockitos, enderbitos e gnaisses kinziginiticos, bem como gnaisses de biotita-anfibólio e migmatitos. Além disso, também são encontrados granitoides que foram intrudidos na sequência metamórfica (Evangelista, 1984; CPRM, 1993).

O Complexo Santa Bárbara é constituído por gnaiss tonalítico e trondhjemítico, comumente apresentando bandas. Além disso, há a presença de uma rocha granítica que injeta o gnaiss trondhjemítico bandado, e um granito mais claro que ocorre na interface dos litotipos mencionados anteriormente, sendo considerado uma fase diferenciada posterior (CPRM, 1993). Na região estudada, o embasamento é predominantemente formado por gnaisses tonalíticos e migmatitos, com a presença de intrusões de basaltos ultramáficos, anfibolitos e esteatitos (Roeser, 1977).

5.1.3 Supergrupo Rio das Velhas

Sobre o embasamento encontram-se rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas associadas a metassedimentos químicos e clásticos, agrupadas no Supergrupo Rio das Velhas.

As datações nestas fornecem idades entre 3,0 e 2,7 Ga. (Chemale jr. *et al.*, 1994) interpretadas como uma seqüência tipo “Greenstone Belt”. Essa unidade é subdividida nos Grupos Quebra Osso, Nova Lima (seqüências basais) e Maquiné (seqüência de topo).

O Grupo Quebra Ossos, classificado por Silva *et al.* (1995) na base do Supergrupo Rio das Velhas, é constituído por rochas metaultramáficas, principalmente tremolita-actinolita xistos, talco xistos, esteatitos e serpentinitos. Essa unidade tem ocorrência de afloramentos restrita à parte leste do Quadrilátero Ferrífero, no flanco nordeste da Serra do Caraça.

O Grupo Nova Lima é constituído principalmente por xistos e filitos, quartzitos, BIF’s, metaconglomerados, metagrauvas e metavulcânicas (Dorr, 1969). Sobre uma discordância angular e erosiva encontra-se o Grupo Maquiné, uma seqüência clasto-psamítica, subdividida também por discordância em duas formações: Palmital e a mais nova Casa Forte. A primeira é constituída principalmente por quartzo-sericita filitos e a outra por quartzitos sericíticos com intercalações de metaconglomerados polimíticos) (Baltazar & Zucchetti 2007 apud Endo *et al.* 2020).

5.1.4 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas apresenta-se em discordância sobre o Supergrupo Rio das Velhas e suas rochas possuem idade de deposição entre aproximadamente 2.584 Ma e 2.420 Ma. Este Supergrupo é subdividido, da base para o topo, nos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba, e suas rochas registram um dos estágios de evolução de uma bacia de margem passiva (Barbosa, 1968; Dorr, 1969; Endo & Machado, 2020). Os grupos Tamanduá e Caraça representam a fase rifte e de transição da bacia Minas e são compostos por quartzitos, quartzitos ferruginosos, xistos quartzosos e argilosos, xistos ferruginosos, formação ferrífera dolomítica, quartzitos sericíticos, filitos, metaconglomerados, formações ferríferas bandadas, metacherts, filitos grafitosos e mármore dolomíticos (Dorr, 1969; Alkmim & Martins-Neto, 2012).

Já o Grupo Itabira consiste em rochas metassedimentares marinhas e é representado por itabiritos, itabiritos anfíbolíticos e dolomíticos, e em menor quantidade filitos, quartzitos e mármore (Alkmim e Marshak, 1998; Alkmim & Martins-Neto, 2012). O Grupo Piracicaba, por sua vez, é constituído de rochas metassedimentares marinhas e é subdividido em quatro formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. As rochas presentes neste Grupo são quartzitos ferruginosos, filitos prateados, dolomitos, xistos sericíticos e metaconglomerados, filitos dolomíticos e metassiltitos, entre outras (Dorr, 1969).

5.1.5 Supergrupo Estrada Real

Esta Unidade é subdividida nos grupos Sabará e Itacolomi, são rochas metassedimentares marinhas e continentais, respectivamente (Endo *et al.*, 2020). O grupo Sabará é composto pelas formações Saramenha, Córrego do Germano e Catarina Mendes, entre as rochas presentes estão clorita xistos, mica xistos intercalados com metagrauvas, quartzitos, BIFs, metapelitos, metassiltitos, filitos grafitosos, dolomitos, entre outras (Alkmim & Marshak, 1998).

O Grupo Itacolomi é composto pelas formações Florália e Pico do Itacolomi. A primeira é representada por ortoquartzitos e a segunda consiste em quartzitos com estruturas sedimentares preservadas, metaconglomerados, itabiritos, filitos e granito (Dorr, 1969; Endo *et al.*, 2020).

5.2 ARCABOUÇO ESTRUTURAL E MODELO EVOLUTIVO

O Quadrilátero Ferrífero foi retrabalhado por diversas vezes por eventos geodinâmicos, onde suas marcas estão registradas pela geologia e descritas por diversos autores ao longo da história. Como pioneiro da área, Guimarães (1951) elabora um modelo geotectônico que incorpora a teoria da deriva continental, onde a província borborema e o Cráton São Francisco são contemplados pelo “Arqui Brasil” que, no processo evolutivo, culmina na orogênese Penoqueana. Alkmim & Marshak (1989), descreve a bacia de margem passiva e depois a colisão e inversão no final da sucessão dos domos, onde estão registradas na deposição do grupo itacolomi que se relacionam ao orógeno paleoproterozóico da Bahia.

Para Dorr (1969), o QF é trabalhado por três eventos: O primeiro, onde há a atuação no Supergrupo Rio das Velhas com direção de deformação progressivo de leste a oeste (deformação pós-Rio das Velhas & Granitogênese). O segundo marca um período diastrófico no período de formação do Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi, tendo como registro a deformação no sentido W-SW e, por fim, o último evento que é responsável pelas estruturas sinformais e antiformais, com algumas inversões de flancos. O autor salienta que não há um trend estrutural dominante por conta dos obstáculos causados por fenômenos de ascensão das massas graníticas no evento intermediário. Endo *et al.* (2020), propõem um modelo evolutivo distintos dos demais autores, onde a deformação principal (paleoproterozóica), está armazenada na forma de duas nappes, onde a nappe curral envolve o embasamento em dobra, que se movimenta no sentido Norte-Noroeste, com uma outra nappe com movimentação de NE-SSW, sendo ele o sistema de nappes de Ouro Preto. O mapa da Figura 5.4, a seguir, apresenta o modelo de nappes mencionado.

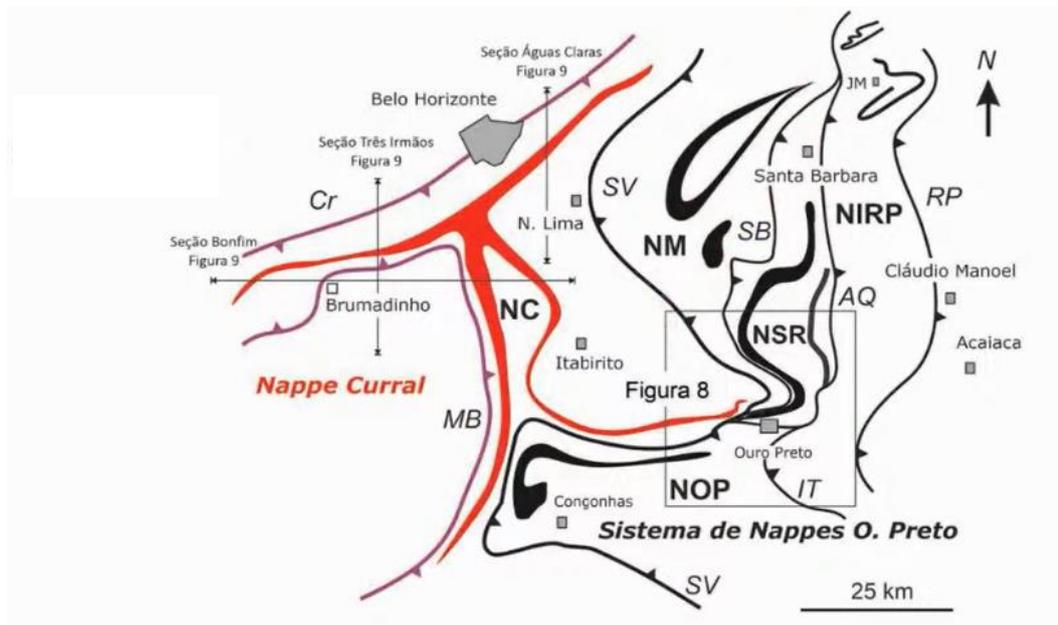


Figura 5.4 - Modelo de Nappes do QF, apresentando falhas e dobras (Endo *et al.*, 2020).

6.1 ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDOS

Na bacia do Rio Gualaxo do Norte, a mineração é uma atividade proeminente, especialmente nas áreas mais a montante, próximas às cidades de Mariana e Ouro Preto, onde estão localizadas várias minas de minério de ferro. Essas minas desempenham um papel significativo na economia da região, com a extração mineral ocorrendo em larga escala ao longo das encostas das montanhas e nas proximidades do rio.

Por outro lado, a agricultura predomina em áreas de planície aluvial ao longo das margens do Rio Gualaxo do Norte e em seus afluentes. Municípios como São Gonçalo do Rio Abaixo e Barão de Cocais possuem extensas áreas de terras férteis dedicadas ao cultivo de culturas como café, milho, feijão e hortaliças. Nessas áreas, é comum encontrar propriedades agrícolas familiares e cooperativas que sustentam a produção agrícola local.

Enquanto a atividade industrial é concentrada em áreas específicas, geralmente em torno das minas de minério de ferro, a agricultura é mais difundida ao longo das áreas de várzea e planícies aluviais, aproveitando as terras férteis e a disponibilidade de água para irrigação fornecida pelo Rio Gualaxo do Norte e seus afluentes, conforme pode ser observado, a seguir, no mapa da Figura 6.1.

Essa distribuição espacial das atividades de mineração e agricultura na bacia do Rio Gualaxo do Norte reflete os padrões históricos de ocupação e uso da terra na região, bem como as características geográficas e climáticas que influenciam as práticas agrícolas e extrativas.

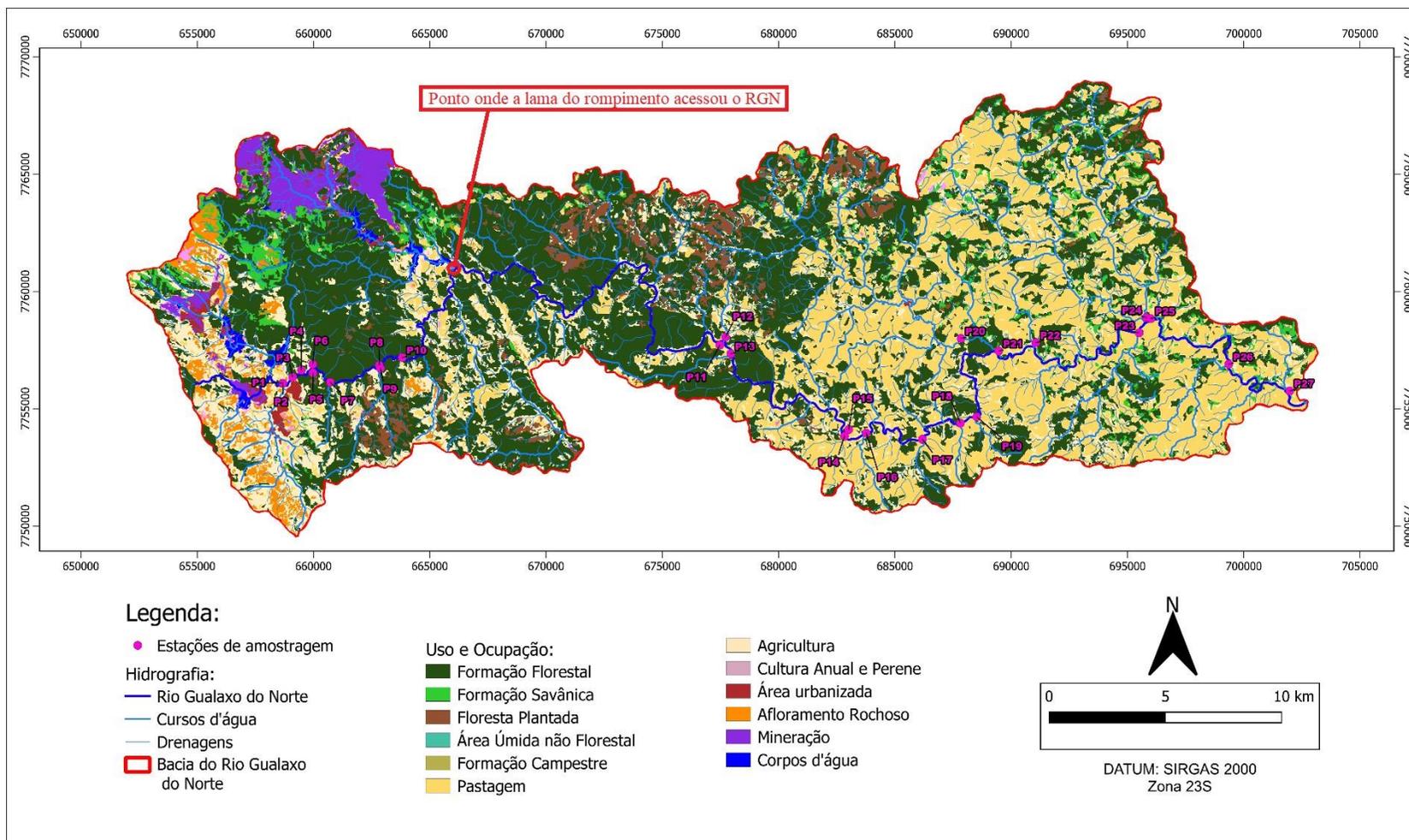


Figura 6.1: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Rio Gualaxo do Norte. Fonte: (MapBiomas, 2019).

6.2 DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DOS METAIS PESADOS NA ÁREA DE ESTUDOS

Conforme abordado anteriormente, o mapeamento de elementos potencialmente tóxicos em sedimentos de fundo de rio é uma ferramenta essencial para avaliar a contaminação e os riscos ambientais associados a esses elementos em ambientes aquáticos. A seguir, serão apresentados os mapas de distribuição geoquímica dos elementos estudados neste trabalho, referentes aos sedimentos ativos de drenagem coletados ao longo da bacia do Rio Gualaxo do Norte, baseando-se em métricas utilizadas por Rodrigues (2015).

6.2.1 Arsênio (As)

O arsênio é um semi-metal (metaloide) de símbolo 'As' e número atômico 33. Ele possui várias formas alotrópicas, sendo a forma cinza metálica a mais estável. Sua densidade é de 5,727 g/cm³ e seu ponto de fusão é de 817 °C sob uma pressão de 28 atm. A forma cinza, caracterizada por ser quebradiça e possuir brilho metálico, é a mais comum. O arsênio forma compostos com oxigênio, enxofre e cloro, além de reagir com a maioria dos não-metais, formando compostos binários. Ele apresenta afinidade com enxofre, sendo classificado como um elemento calcófilo segundo a classificação de Goldschmidt (Goldschmidt, 1923).

Na crosta terrestre, o arsênio é encontrado em concentrações médias de aproximadamente 1,5 ppm, variando entre 1,0 e 4,8 ppm de acordo com diferentes estudos (Rudnick & Gao, 2003). Sua presença nos corpos hídricos está frequentemente associada à atividade de mineração, o que representa um risco significativo tanto para a saúde humana quanto para a biodiversidade. Além disso, o arsênio também pode ser introduzido no meio ambiente por meio de pesticidas, efluentes industriais e produtos derivados de refinarias de petróleo (Gonçalves & Costa, 2010; Anirudhan & Unnithan, 2007).

O arsênio é comumente encontrado em minerais sulfetados, como arsenopirita (FeAsS) e realgar (As₄S₄), sendo especialmente abundante em áreas de mineração e depósitos hidrotermais. No contexto do Rio Gualaxo do Norte, a principal fonte de arsênio é a exposição de minerais sulfetados devido à atividade mineradora (Gonçalves *et al.*, 2010).

Industrialmente, o arsênio tem um uso significativo na produção de pesticidas, herbicidas e compostos preservantes de madeira. Além disso, ele é utilizado na fabricação de semicondutores e em ligas metálicas para aumentar a resistência à corrosão e à dureza dos materiais (Anirudhan & Unnithan, 2007).

No Rio Gualaxo do Norte, a presença de arsênio no ambiente é preocupante devido ao seu alto potencial tóxico. As concentrações de arsênio nos sedimentos variaram de valores abaixo do limite de detecção (LID) até 118,10 ppm no período chuvoso, e até 353,60 ppm no período seco. O ponto de concentração máxima foi registrado na estação P1, localizada a montante da área diretamente afetada pelo rompimento da barragem. Comparado ao background geoquímico calculado de 64,20 ppm, essa estação apresentou uma faixa significativamente elevada, com a estação P5 sendo a única a registrar um valor ligeiramente superior, de 65,10 ppm, durante o período chuvoso (Costa, 2015).

De acordo com a Resolução CONAMA 454/2012, todas as amostras coletadas a montante do rompimento foram classificadas como Nível 2, tanto nos períodos seco quanto chuvoso, indicando concentrações acima de 17 ppm. À jusante, no período seco, seis pontos foram classificados como Nível 1, com valores entre 5,9 e 17,0 ppm, a estação P18 foi classificada como nível 2 no período chuvoso, enquanto os demais pontos apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção. No período chuvoso, dois pontos à jusante alcançaram a classificação de Nível 2, e quatro pontos foram classificados como Nível 1, com os restantes abaixo do limite de detecção.

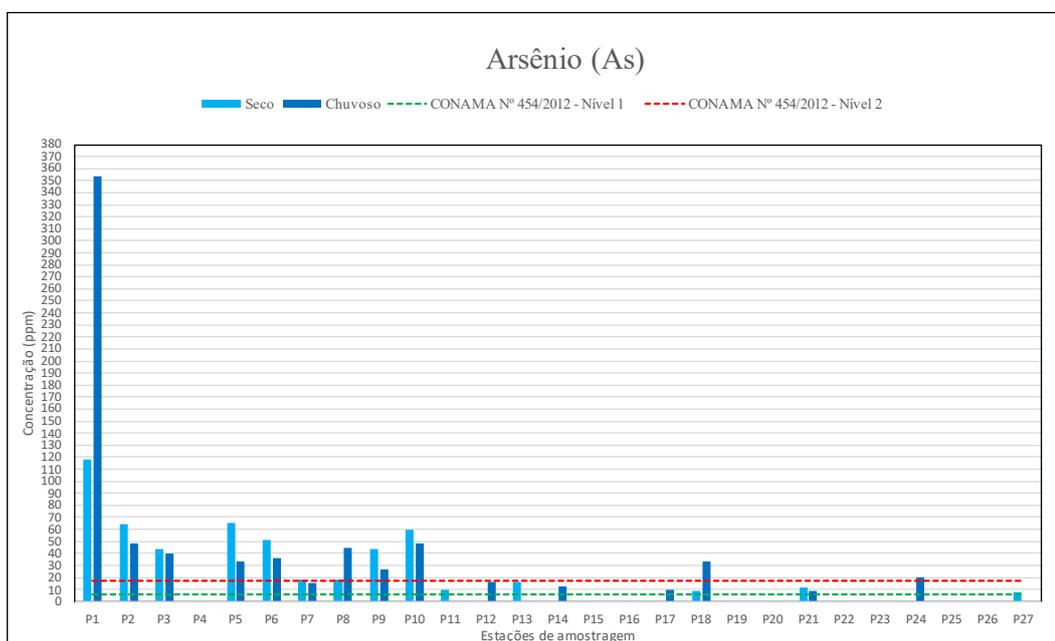


Figura 6.2: Gráfico de comparação da distribuição do Arsênio nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.

A exposição ao arsênio pode resultar em uma série de problemas de saúde, incluindo câncer de pele, pulmão, bexiga e fígado. Além disso, podem ocorrer lesões na pele, neuropatia

periférica, diabetes e doenças cardiovasculares. A forma inorgânica do arsênio é a mais prejudicial e pode ser adquirida principalmente pela ingestão de água contaminada (Abernathy *et al.*, 1998; Gonçalves *et al.*, 2010).

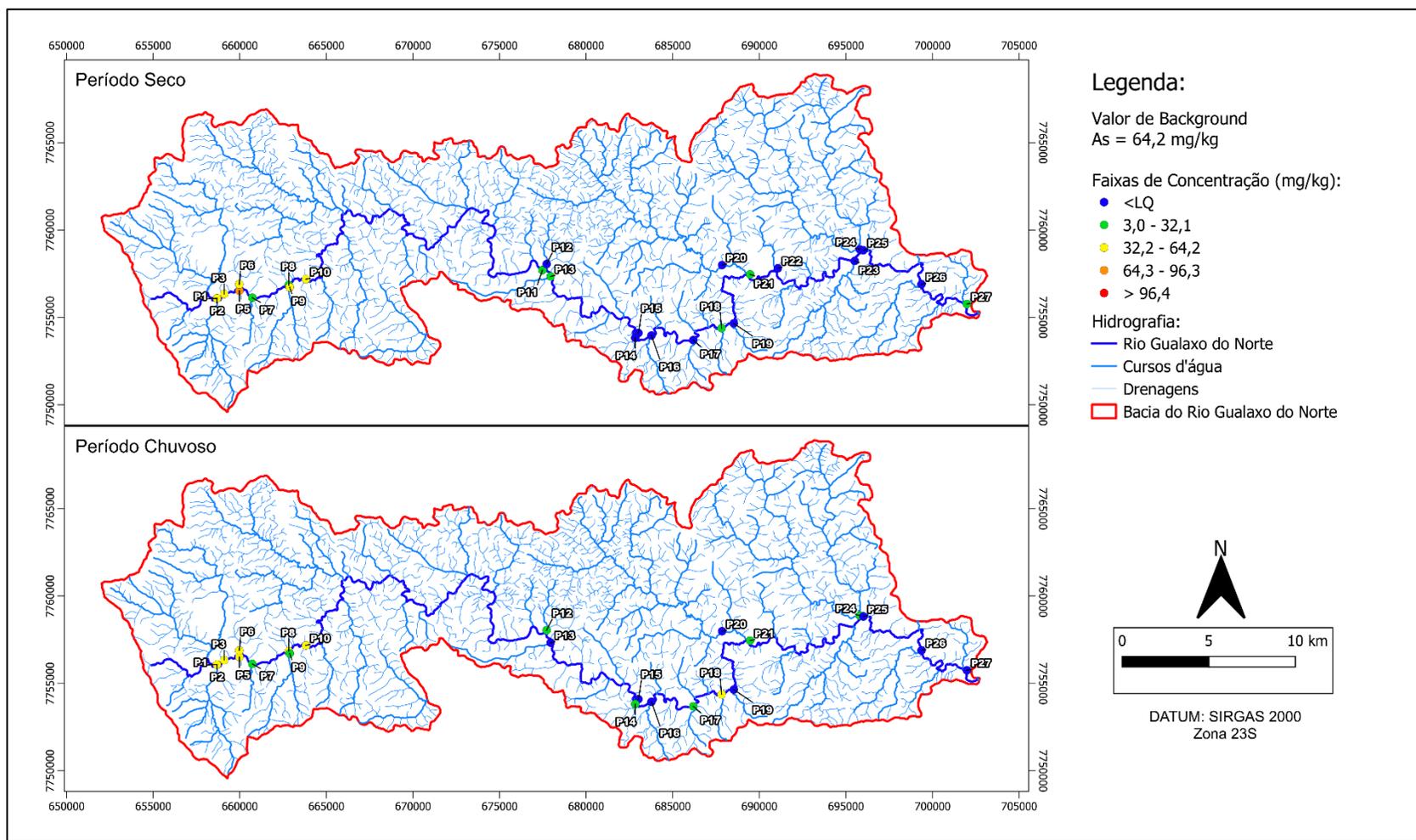


Figura 6.3: Mapas da distribuição geoquímica do arsênio nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.

6.2.2 Chumbo (Pb)

O chumbo é um metal pesado com número atômico 82 e uma densidade de 11,34 g/cm³. É um material maleável e apresenta baixa mobilidade no meio ambiente. De acordo com Kabata-Pendias & Szteke (2015), o chumbo é classificado como um elemento litófilo, o que significa que tem afinidade com oxigênio e se encontra associado a minerais de rochas da crosta terrestre.

A concentração média de chumbo na crosta terrestre é estimada em aproximadamente 17 ppm, conforme Rudnick & Gao (2003). Ele é comumente encontrado em minerais como galena (PbS), anglesita (PbSO₄) e cerussita (PbCO₃), que são os principais minérios de onde o chumbo é extraído. No Rio Gualaxo do Norte, a galena é o mineral mais frequente, e sua presença está fortemente associada à mineração de metais, onde o intemperismo e a exposição de rochas sulfetadas elevam as concentrações de chumbo (Malavolta, 1994).

O chumbo possui grande importância econômica, sendo amplamente utilizado em baterias de automóveis, pigmentos, munições e em diversos processos industriais (Azevedo *et al.*, 2004). Apesar de suas aplicações, o chumbo é altamente tóxico para o meio ambiente e para a saúde humana.

No estudo da área do Rio Gualaxo do Norte, as concentrações de chumbo variaram de valores abaixo do limite de detecção (LID) até 48,20 ppm durante o período seco. No período chuvoso, os valores variaram entre o limite inferior de detecção e 31,00 ppm. A maior concentração foi registrada na estação P20, localizada em um efluente a jusante da área de rompimento, no Ribeirão Águas Claras. No entanto, mesmo essa concentração máxima, observada no período seco, está próxima do valor de background do elemento, que foi estabelecido em 43,80 ppm.

O Ribeirão Águas Claras drena uma área caracterizada principalmente por pastagens e atividades agrícolas, sem a presença significativa de indústrias ou mineração de grande porte. A única área urbanizada da região é o distrito de Águas Claras, pertencente ao município de Mariana, MG. As rochas predominantes na área são ortognaisses tonalíticos, granitos e migmatitos, que fazem parte do Complexo Santa Bárbara. Dessa forma, a quantidade de chumbo encontrada nos sedimentos da estação P20 é consistente com as características geológicas e de uso do solo da região.

De acordo com a Resolução CONAMA 454/2012, o limite de concentração de chumbo para a classificação Nível 1 é de 35,0 ppm. A estação P20 foi a única a exceder esse limite,

sendo classificada como Nível 1 apenas durante o período seco, com uma concentração de 48,20 ppm. Todas as outras estações apresentaram concentrações abaixo desse valor, tanto no período seco quanto no chuvoso.

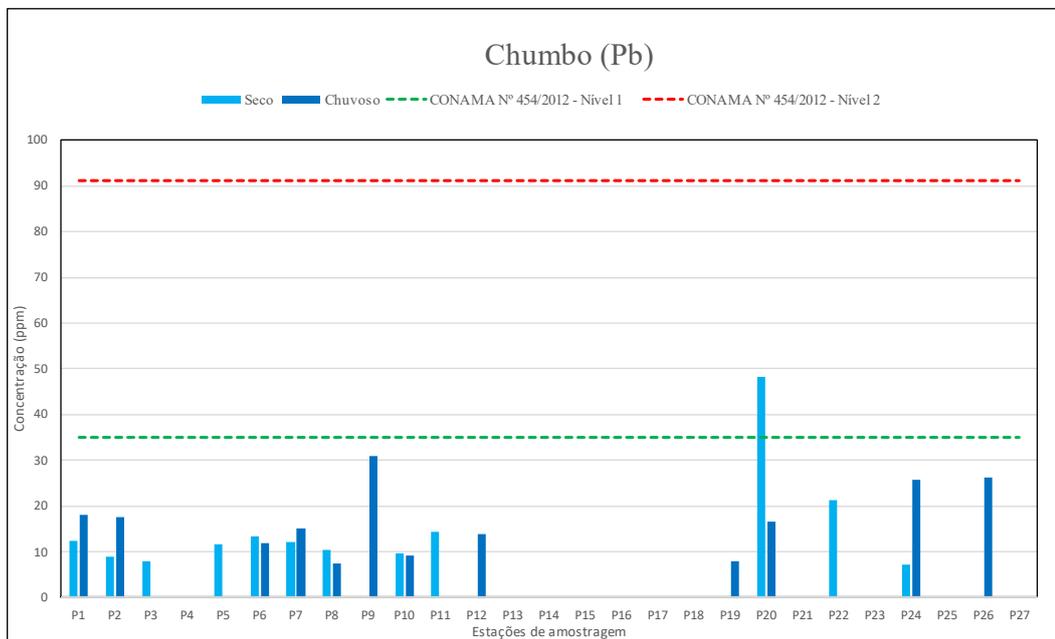


Figura 6.4: Gráfico de comparação da distribuição do Chumbo nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.

A exposição ao chumbo representa sérios riscos à saúde, especialmente por ser um neurotóxico potente. Os efeitos da intoxicação por chumbo incluem encefalopatias, anemia, disfunções renais e deficiências cognitivas, com maior impacto em crianças, que são mais vulneráveis a esses efeitos (Moreira & Moreira, 2004).

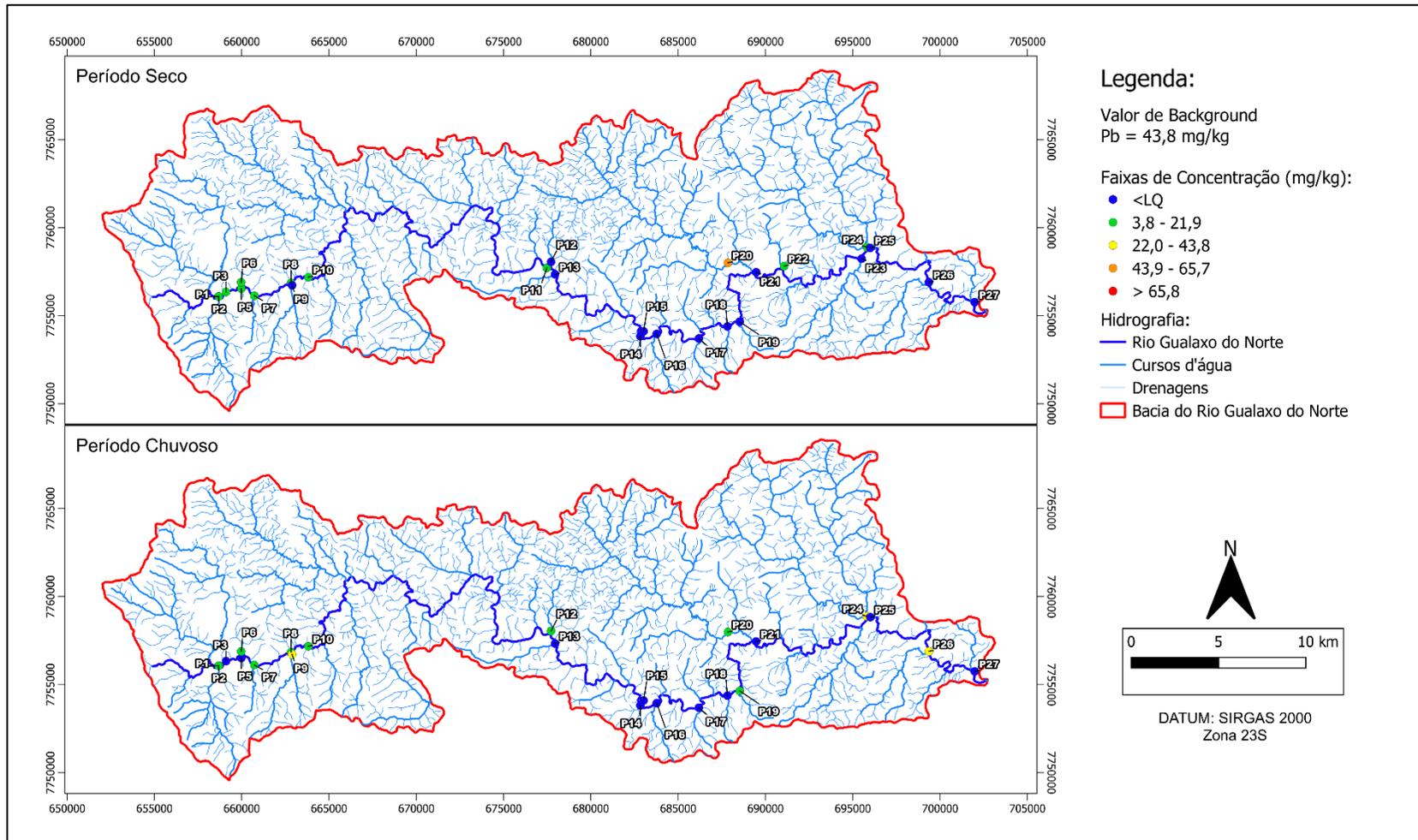


Figura 6.5: Mapas da distribuição geoquímica do chumbo nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.

6.2.3 Cobre (Cu)

O cobre é um metal conhecido por sua alta condutividade térmica e elétrica. Possui número atômico 29 e uma densidade de 8,96 g/cm³. De acordo com a classificação de Goldschmidt, o cobre é considerado um elemento Calcófilo.

Na crosta terrestre, o cobre é encontrado em concentrações médias de 50 ppm, estando principalmente presente em minerais como calcopirita (CuFeS₂) e bornita (Cu₅FeS₄), ambos associados a depósitos hidrotermais e atividades mineradoras. Wedepohl (1978) destaca que esses minerais são as principais fontes de extração de cobre em áreas de mineração em todo o mundo. No Rio Gualaxo do Norte, a exposição desses minerais sulfetados durante a mineração representa uma potencial fonte de contaminação hídrica, uma vez que o intemperismo e a erosão dessas rochas podem liberar cobre no ambiente.

A importância econômica do cobre é inegável. Ele é amplamente utilizado na fabricação de ligas metálicas e fios elétricos, além de produtos químicos, como pigmentos. Sua alta condutividade faz com que ele seja essencial em indústrias eletrônicas e de construção, sendo utilizado em diversos produtos industriais (Bradl, 2005).

No contexto da área de estudo, as concentrações de cobre variaram desde valores abaixo do limite de detecção (LID) até 54,70 ppm durante o período seco. No período chuvoso, os valores permaneceram na mesma faixa, alcançando um máximo de 66,10 ppm. É relevante notar que os valores mais elevados registrados nas estações de amostragem se aproximam do valor de background estabelecido de 48,30 ppm, o que sugere que a maioria das amostras apresenta concentrações dentro dos níveis naturais para a região. Contudo, as estações P1 e P2 apresentaram valores superiores ao background. A estação P1 está localizada no Rio Gualaxo do Norte, enquanto a P2 está situada no córrego Água Suja, ambas na região de Antônio Pereira, próximo às barragens de Timbopeba, Natividade e Doutor.

A distribuição geoquímica do cobre na bacia do Rio Gualaxo do Norte segue um padrão semelhante ao observado para o arsênio, com uma área de possível contaminação identificada na cabeceira da bacia, onde há maior influência de atividades antrópicas. Isso sugere que a extração de minerais e a presença de barragens de rejeitos podem estar contribuindo para o aumento das concentrações de cobre nessas regiões específicas.

Conforme a Resolução CONAMA 454/2012, o limite de classificação para o Nível 1 é de 35,7 ppm. Durante o período seco, apenas as estações P1 e P7 foram classificadas como Nível 1, com concentrações variando entre 35,7 e 197,0 ppm. No período chuvoso, além das

estações P1 e P7, a estação P2 também foi classificada como Nível 1, enquanto as demais estações mantiveram-se com concentrações inferiores a 35,7 ppm, indicando níveis menos preocupantes de contaminação.

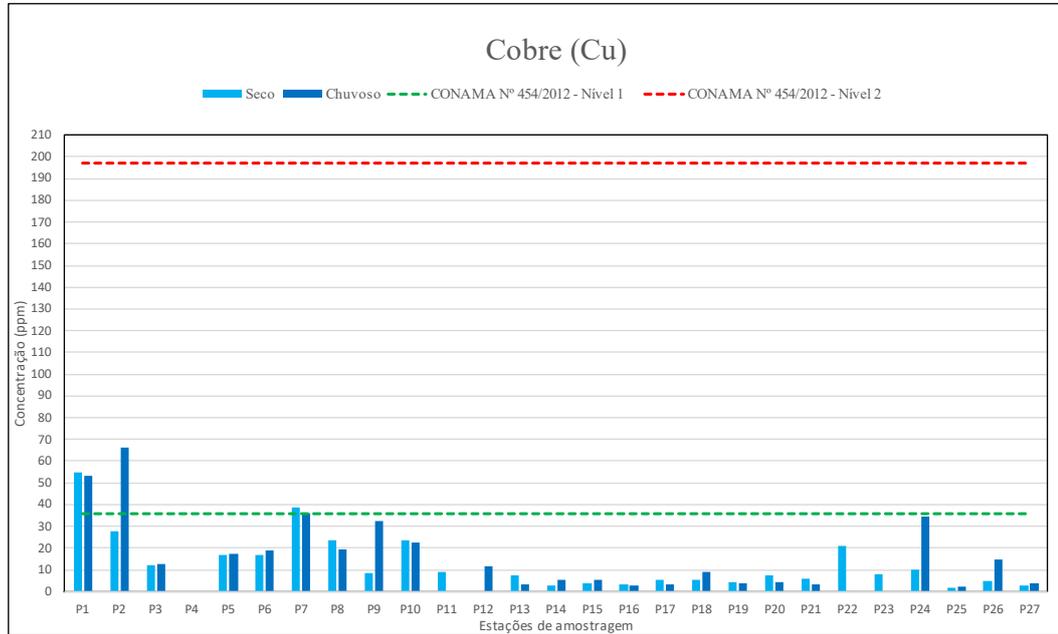


Figura 6.6: Gráfico de comparação da distribuição do Cobre nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.

Em termos de saúde ambiental, o cobre pode ser tóxico para organismos aquáticos quando presente em concentrações elevadas. Rand (1995) destacou que níveis elevados de cobre podem causar danos bioquímicos e fisiológicos, afetando processos metabólicos em organismos e representando um risco significativo para a fauna local. A toxicidade do cobre em sistemas aquáticos se dá pela sua capacidade de se ligar às enzimas e proteínas, interferindo no metabolismo celular.

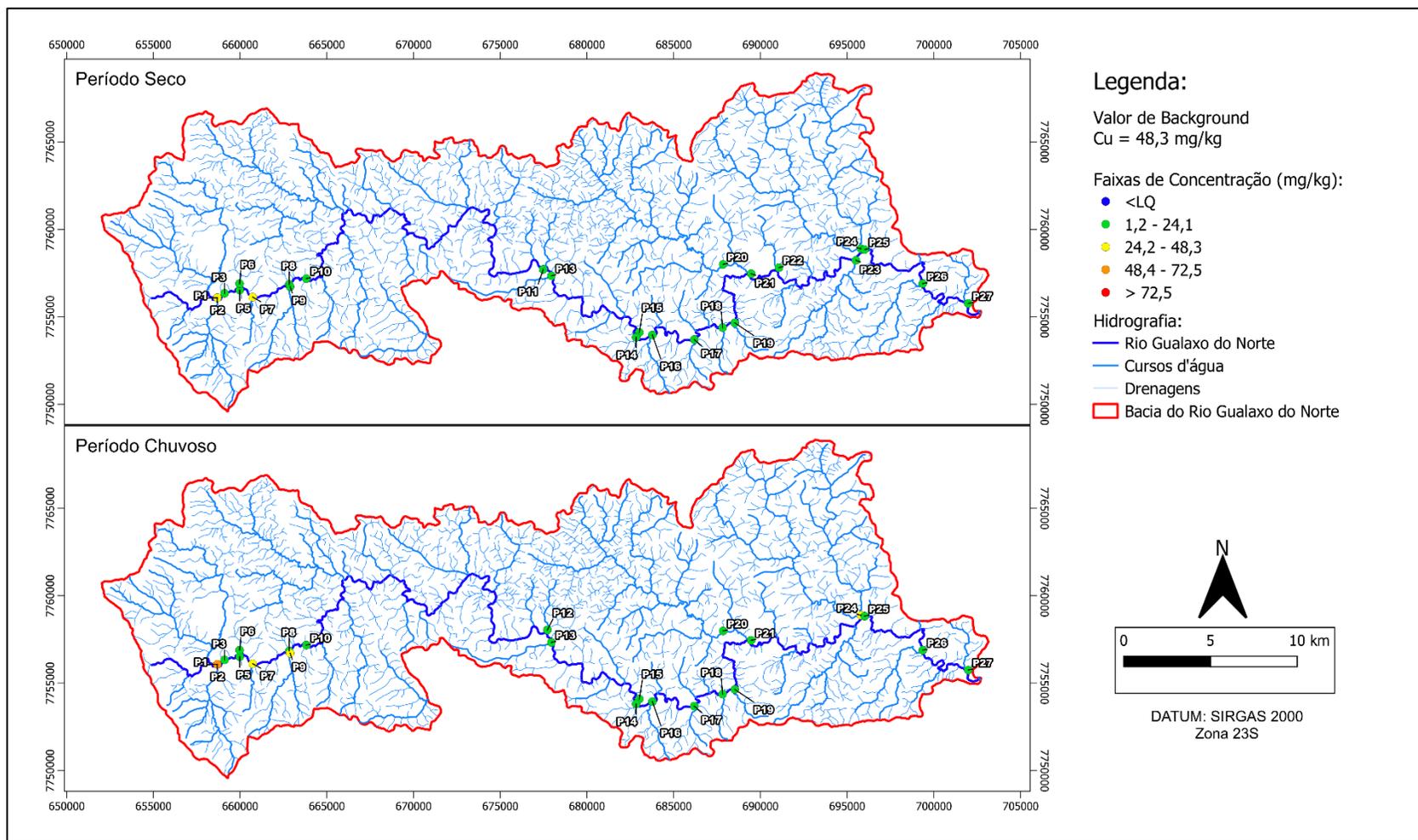


Figura 6.7: Mapas da distribuição geoquímica do cobre nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.

6.2.4 Cromo (Cr)

O cromo não ocorre livre na natureza, sendo a cromita (FeCr_2O_4) o seu principal mineral, amplamente distribuído pela superfície terrestre. De acordo com Wedepohl (1978), a cromita é a principal fonte de cromo e é comum em depósitos ultramáficos. As anomalias associadas aos depósitos de cromita geralmente se manifestam como vestígios residuais ou detríticos desse mineral em solos e sedimentos, como observado por Reimann e Caritat (2012).

A mobilidade do cromo é notavelmente baixa em uma variedade de ambientes, sejam eles oxidantes, redutores, ácidos, neutros ou alcalinos. Essa baixa mobilidade atua como uma barreira geoquímica significativa, limitando a dispersão do cromo em sistemas naturais. De acordo com a classificação de Goldschmidt (1923), o cromo é considerado um elemento litófilo, o que significa que ele tem afinidade por minerais formadores de rochas e geralmente se associa a minerais de rochas ígneas e metamórficas.

A concentração média de cromo na crosta terrestre é de 92 ppm, sendo principalmente encontrado em minerais como a cromita (FeCr_2O_4), que está presente em rochas ígneas ultramáficas (Rudnick & Gao, 2003). No Rio Gualaxo do Norte, o cromo é mobilizado durante o intemperismo das rochas, mas, de acordo com Reimann e Caritat (2012), ele não atinge concentrações alarmantes na região.

O cromo tem uma grande importância industrial. Ele é amplamente utilizado na fabricação de componentes de motores, tintas, fertilizantes e outros produtos industriais. Sua durabilidade e resistência à corrosão fazem com que ele seja um elemento crucial para diversas aplicações, especialmente na indústria metalúrgica (Baggio, 2013).

Nas áreas de estudo do Rio Gualaxo do Norte, as concentrações de cromo variaram significativamente. O valor de referência estabelecido para a região é de 292,50 ppm, e nenhuma das estações de amostragem ultrapassou esse limite. Durante o período seco, a maior concentração registrada foi de 103,20 ppm na estação P7, enquanto no período chuvoso, o valor máximo registrado foi de 117,80 ppm na estação P24. Essas concentrações estão abaixo do valor de referência, sugerindo que o cromo, apesar de estar presente, não atinge níveis preocupantes na bacia estudada.

De acordo com a Resolução CONAMA 454/2012, as estações P7, P8 e P22 foram classificadas como Nível 2 durante o período seco, indicando concentrações superiores a 90,0 ppm. No período chuvoso foram classificadas como Nível 2 as estações P9 e P24. Além disso, sete outras estações foram classificadas como Nível 1, com concentrações variando entre 35,7

e 90,0 ppm. A maioria dessas estações está localizada a montante da área diretamente afetada pelo rompimento da barragem, com exceção da estação P11, situada a jusante, que também foi classificada como Nível 1. As demais estações apresentaram concentrações abaixo dos limites estabelecidos pela legislação.

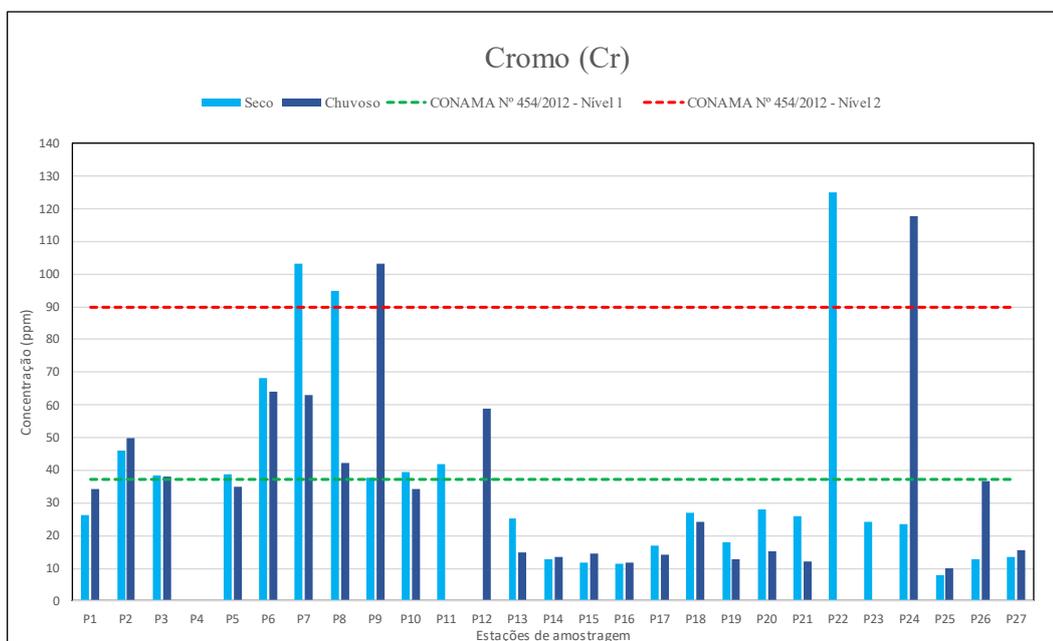


Figura 6.8: Gráfico de comparação da distribuição do Cromo nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.

Exposições prolongadas a altos níveis de cromo podem causar sérios problemas à saúde ambiental. De acordo com Masutti (2004), altos níveis de cromo no ambiente aquático podem interferir no crescimento e na reprodução de organismos aquáticos, além de causar danos bioquímicos. A toxicidade do cromo, especialmente na forma hexavalente (Cr^{6+}), é uma preocupação significativa, pois essa forma é altamente solúvel e pode ser absorvida por organismos, causando efeitos adversos à saúde.

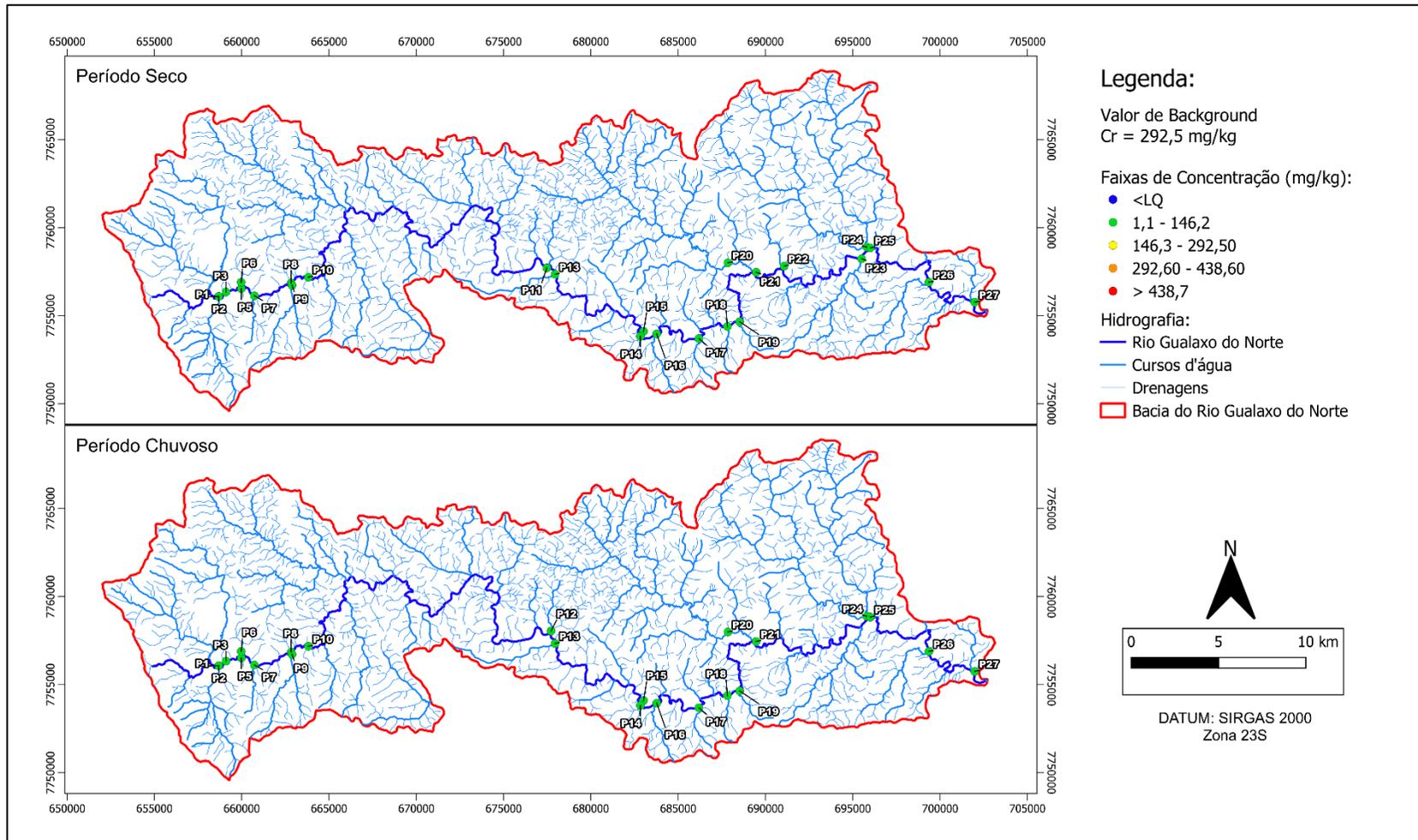


Figura 6.9: Mapas da distribuição geoquímica do cromo nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.

6.2.5 Níquel (Ni)

O níquel é um metal de transição, com número atômico 28 e densidade de 8,90 g/cm³. É classificado como um elemento siderófilo segundo a classificação de Goldschmidt, o que significa que ele tem afinidade por metais e é frequentemente encontrado em rochas máficas e ultramáficas, porém pode ser calcófilo ou litófilo dependendo do contexto na crosta terrestre. O níquel é amplamente utilizado em diversas indústrias devido à sua durabilidade e resistência à corrosão, sendo um componente essencial em ligas metálicas e em catalisadores de processos químicos (Poletto et al., 2011).

Na crosta terrestre, o níquel ocorre em concentrações médias de 47 ppm, sendo comumente encontrado em minerais como a pentlandita ((Fe,Ni)₉S₈) e a garnierita (NiSiO₃). Esses minerais são frequentemente encontrados em rochas máficas e ultramáficas, que são comuns em ambientes geológicos como o Quadrilátero Ferrífero. Além disso, o níquel também é encontrado em minérios lateríticos, resultantes do intemperismo de rochas, o que leva à sua concentração em óxidos de ferro e manganês, assim como em silicatos, como clorita, serpentina e esmectita (Ribeiro et al., 2019).

Economicamente, o níquel tem grande relevância devido à sua aplicação em ligas metálicas, como o aço inoxidável, e em processos industriais variados, incluindo a fabricação de combustíveis, lubrificantes e materiais galvanizados. Esses usos fazem do níquel um elemento fundamental nas atividades humanas e uma possível fonte de contaminação ambiental em áreas com atividades industriais intensas (Poletto et al., 2011).

Na área de estudo do Rio Gualaxo do Norte, os valores de concentração de níquel variaram significativamente entre os períodos seco e chuvoso. Durante o período seco, a estação P7 foi a única que registrou valores acima do nível de fundo, estabelecido em 39,00 ppm, com um valor máximo de 123,40 ppm. No período chuvoso, essa mesma estação apresentou uma concentração de 101,60 ppm. A estação P7 está localizada no Córrego do Lopes, que drena uma área predominantemente florestada, com a presença humana limitada a pastagens e algumas áreas agrícolas. Geologicamente, a região é composta pela Formação Cercadinho, do Supergrupo Minas, cujas rochas incluem quartzitos ferruginosos, filitos prateados e xistos róseos e sericíticos. Essas formações geológicas podem influenciar a mobilidade e concentração de níquel nos sedimentos da área.

A estação P1 também registrou valores próximos ao nível de fundo durante o período seco e ligeiramente superiores no período chuvoso, mas sem grandes variações. As demais

estações apresentaram concentrações entre o limite inferior de detecção (LID) e valores abaixo do nível de fundo para níquel em sedimentos, que é de 39,9 ppm.

De acordo com a Resolução CONAMA 454/2012, durante o período chuvoso, as estações P1, P6, P7 e P9 foram classificadas como Nível 2, com valores superiores a 35,9 ppm. A estação P2 foi a única classificada como Nível 1, com valores entre 18,0 e 35,9 ppm, enquanto as demais estações apresentaram concentrações abaixo de 18,0 ppm. No período seco, a estação P7 manteve-se classificada como Nível 2, enquanto as estações P1, P6, P8, P10 e P22 foram classificadas como Nível 1. As outras estações mantiveram valores abaixo do limite inferior de 18,0 ppm.

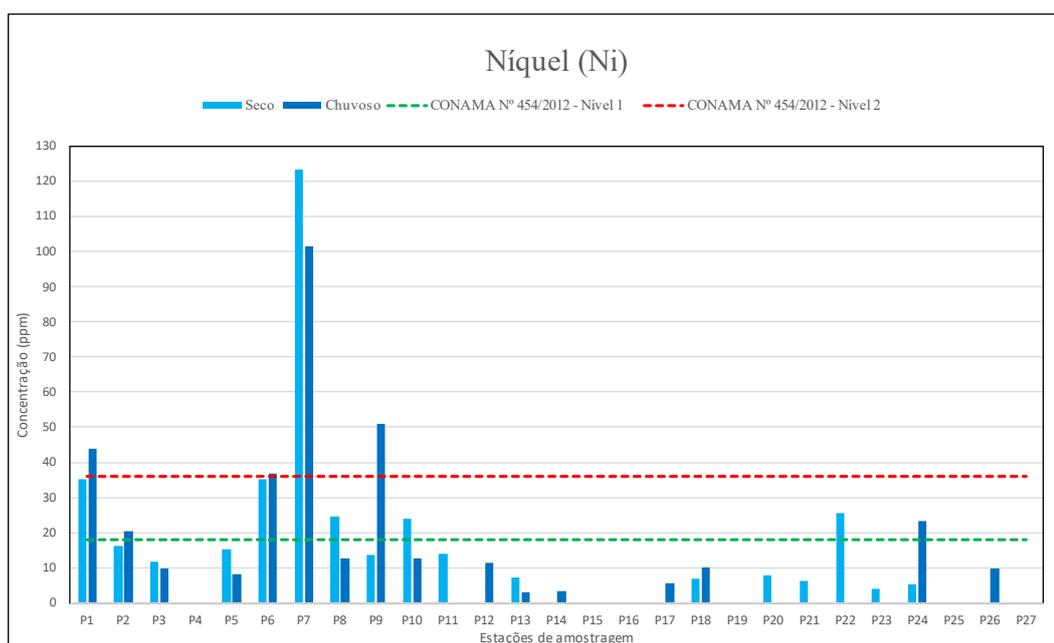


Figura 6.10: Gráfico de comparação da distribuição do Níquel nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.

O níquel, apesar de ser essencial em pequenas quantidades para algumas funções biológicas, pode ser tóxico em concentrações elevadas. Em níveis elevados, o níquel pode ser cancerígeno e causar a degeneração de tecidos humanos, além de outros efeitos adversos à saúde, como problemas respiratórios e dermatológicos (Favaro *et al.*, 2007).

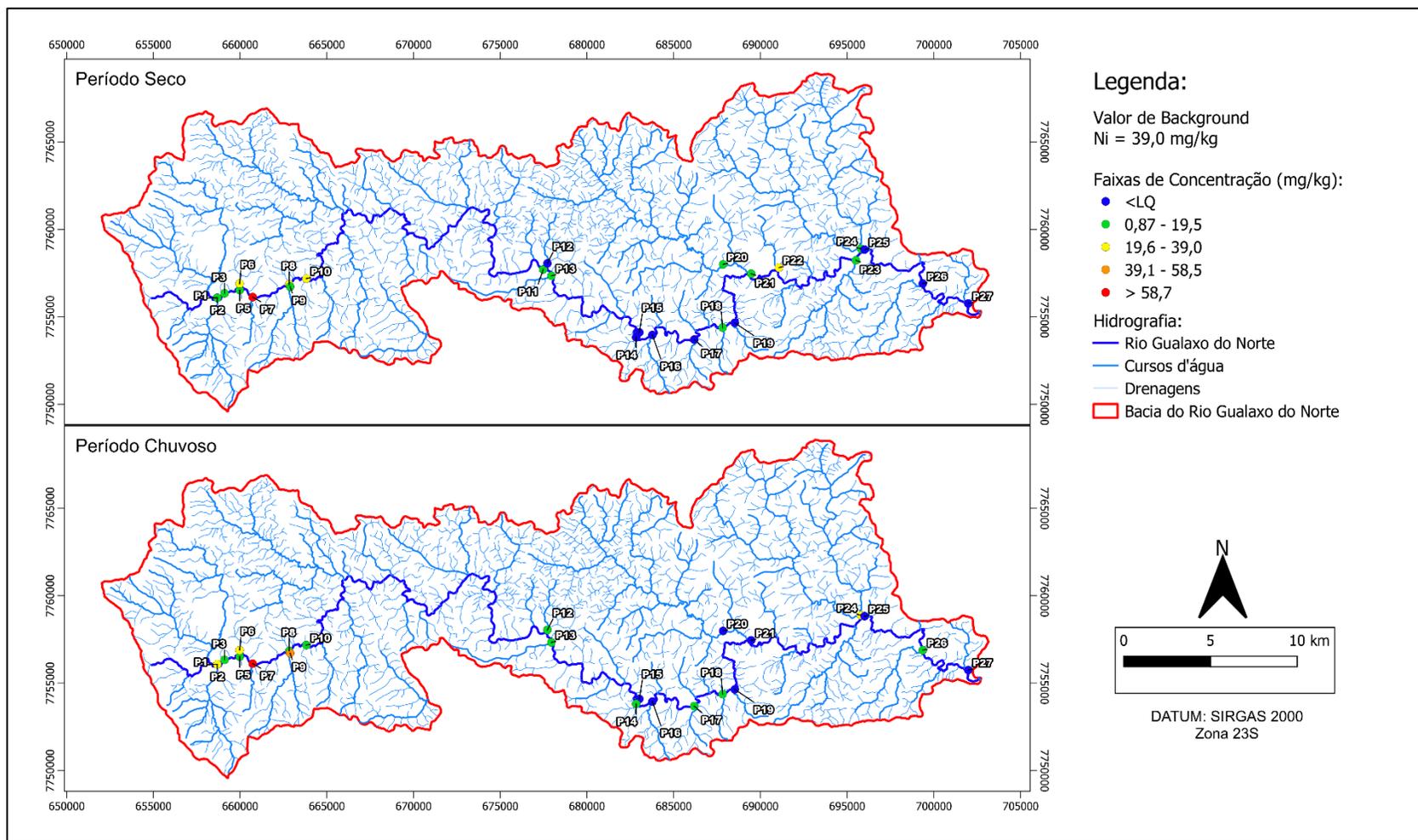


Figura 6.11: Mapas da distribuição geoquímica do níquel nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.

6.2.6 Zinco (Zn)

O zinco é um metal com número atômico 30 e uma densidade de 7,14 g/cm³, sendo classificado como um elemento calcófilo na classificação de Goldschmidt (1923). Sua presença no Rio Gualaxo do Norte (RGN) foi justificada por Rodrigues *et al.* (2013), que atribuiu as concentrações encontradas a anomalias geoquímicas geogênicas associadas à geologia local. Devido à sua afinidade por minerais sulfetados, o zinco é frequentemente encontrado em ambientes geológicos com atividade mineradora.

Na crosta terrestre, o zinco ocorre em concentrações médias de 67 ppm, sendo comumente encontrado em minerais como a esfalerita (ZnS), que é sua principal fonte. A esfalerita é amplamente distribuída em depósitos de minerais sulfetados, comumente associados a áreas de mineração de metais base. No Rio Gualaxo do Norte, a lixiviação de minerais como a esfalerita pode aumentar significativamente as concentrações de zinco na água e nos sedimentos, especialmente em áreas de atividade mineradora, conforme destacado por Silveira *et al.* (2010).

O zinco possui ampla aplicação econômica, sendo utilizado principalmente no processo de galvanização para proteger metais da corrosão. Além disso, o zinco é empregado na fabricação de pneus, lubrificantes e em vários produtos industriais, dada sua resistência à oxidação e suas propriedades químicas versáteis (Silveira *et al.*, 2010).

Na área de estudo do Rio Gualaxo do Norte, o valor de background para o zinco foi estabelecido em 65,3 mg/kg. Durante o período seco, as concentrações variaram de 20,8 mg/kg na estação P15 a 65,0 mg/kg na estação P7. A maioria das estações apresentou valores inferiores ou próximos ao background, sugerindo que a contaminação por zinco não é significativa sob condições normais de fluxo. No entanto, no período chuvoso, algumas estações, como a P9, registraram concentrações mais elevadas, chegando a 93,5 mg/kg, indicando um aumento na lixiviação de zinco a partir de áreas contaminadas, possivelmente exacerbado pelas chuvas intensas e pelo aumento do escoamento superficial. Esse fenômeno ressalta a mobilidade do zinco em condições de fluxo elevado, o que pode aumentar os riscos para a saúde aquática (Johnson & Hallberg, 2005).

De acordo com a Resolução CONAMA 454/2012, a estação P24 foi uma exceção notável durante o período chuvoso, com uma concentração de 402,9 ppm, bem acima do limite de 315,0 ppm para a classificação Nível 2. Todas as outras estações apresentaram valores

abaixo desse limite, demonstrando que a contaminação por zinco é pontual e mais associada a eventos de escoamento intenso em áreas localizadas.

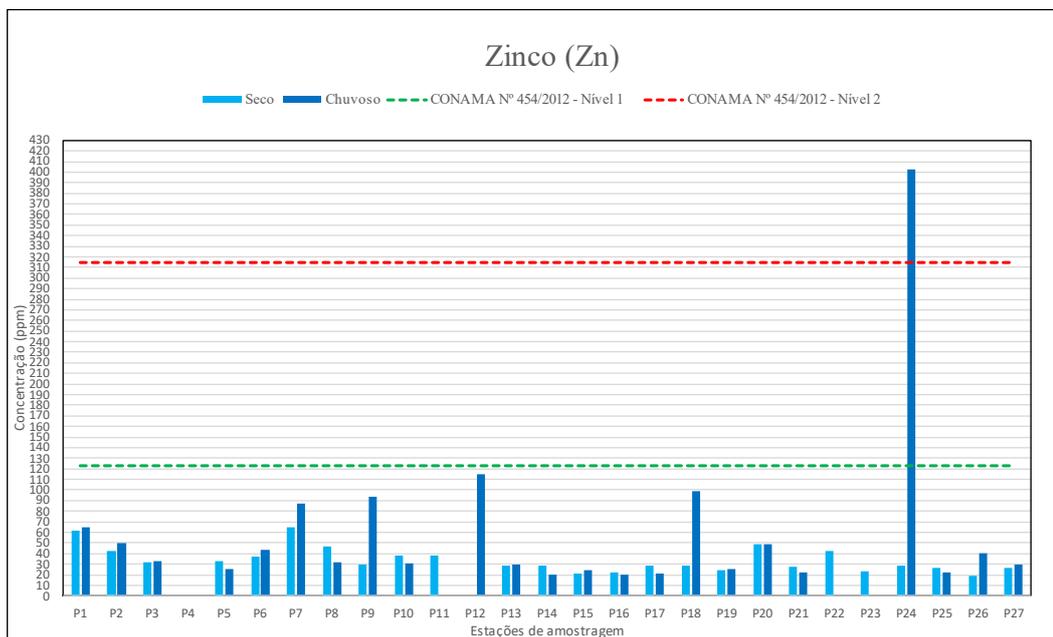


Figura 6.12: Gráfico de comparação da distribuição do Zinco nos sedimentos das estações amostradas com a norma CONAMA 454/2012.

Embora o zinco seja essencial para o metabolismo humano, estando envolvido em processos como a síntese de proteínas e a função imunológica, concentrações elevadas podem ser tóxicas. Exposições prolongadas a altos níveis de zinco podem causar sintomas como náuseas e anemia, além de comprometer a função de organismos aquáticos, afetando seu desenvolvimento e reprodução (Koljonen *et al.*, 1992).

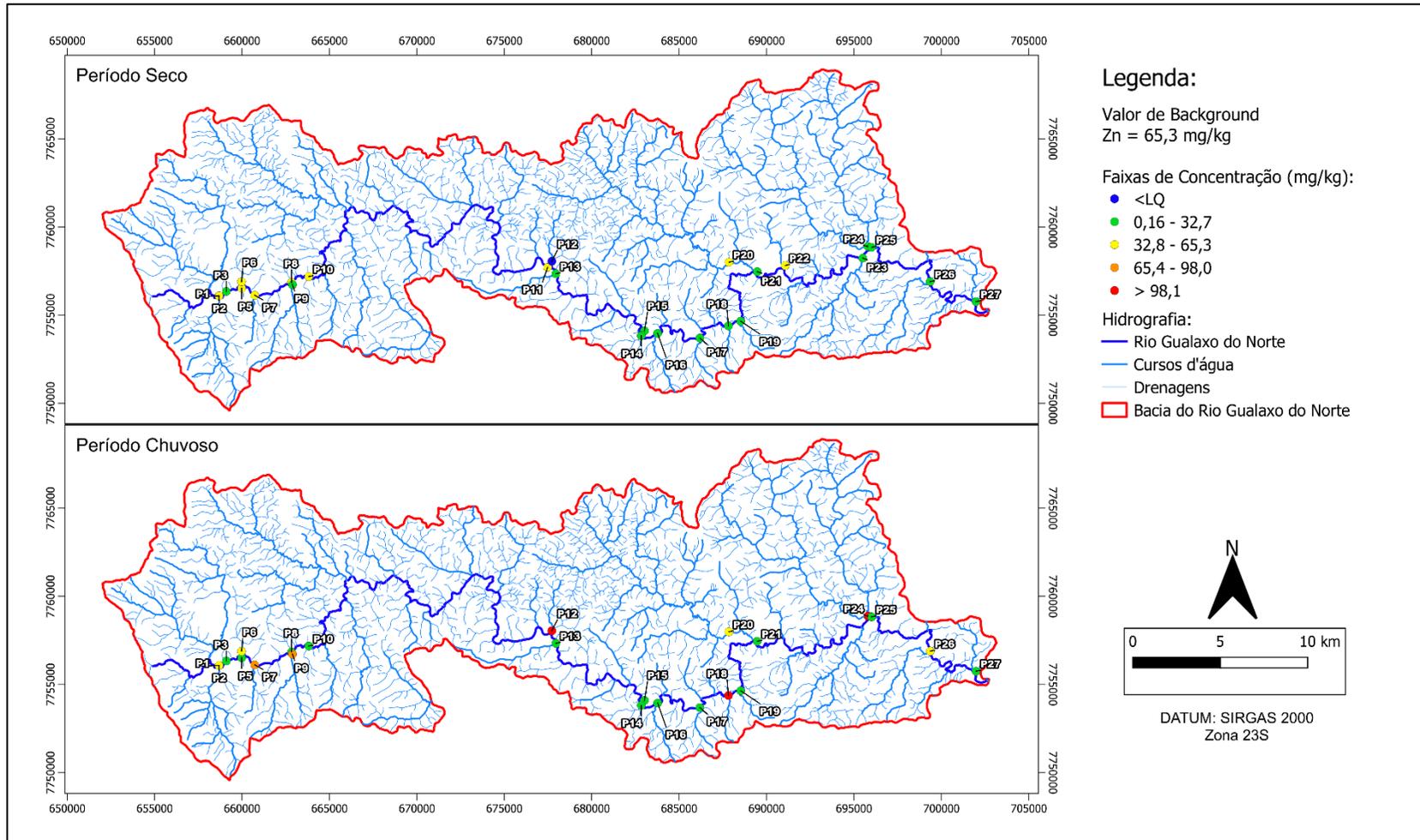


Figura 6.13: Mapas da distribuição geoquímica do zinco nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo, período seco e chuvoso.

6.2.7 Alumínio (Al)

O alumínio é um metal leve, com número atômico 13, densidade de 2,70 g/cm³ e um ponto de fusão de 660,32 °C. Ele é altamente resistente à corrosão, o que o torna um material amplamente utilizado em várias indústrias. Classificado como um elemento litófilo segundo a classificação de Goldschmidt (1923), o alumínio tem forte afinidade por minerais de silicato e é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre.

O alumínio representa cerca de 15,4% da crosta terrestre, sendo amplamente distribuído em diversas formações geológicas. Ele é comumente encontrado em minerais como a bauxita (Al₂O₃·2H₂O), que é a principal fonte de extração de alumínio na indústria. No contexto do Rio Gualaxo do Norte, a presença de minerais ricos em alumínio está associada ao intemperismo de rochas ricas em feldspatos, como os granitos, que são predominantes na região. De acordo com Rodrigues et al. (2013), a meteorização dessas rochas libera alumínio para o solo e para os sedimentos da bacia.

O alumínio tem uma enorme importância econômica, sendo amplamente utilizado na fabricação de ligas metálicas leves, que são empregadas em indústrias automotivas e aeronáuticas, além de embalagens e outros produtos industriais. A alta resistência à corrosão e sua leveza tornam o alumínio um material fundamental para essas aplicações industriais.

Na área de estudo do Rio Gualaxo do Norte, o valor de background para o alumínio nos sedimentos é de 1,8 g/kg. Contudo, durante o período seco, as concentrações de alumínio frequentemente excederam esse valor de referência. Na estação P2, por exemplo, a concentração máxima de alumínio atingiu 9,5 g/kg, o que pode refletir tanto o aporte natural de solos ricos em alumínio quanto a contribuição antrópica, principalmente devido às atividades de mineração na região. Durante o período chuvoso, as concentrações de alumínio aumentaram ainda mais, chegando a 13,0 g/kg na estação P20, devido ao aumento do transporte de partículas contendo alumínio impulsionado pelo maior fluxo de água durante as chuvas. Em contraste, a estação P12 registrou a menor concentração, com apenas 97,1 mg/kg, o que sugere uma área potencialmente menos afetada por atividades humanas.

Essas elevadas concentrações de alumínio ao longo da bacia do Rio Gualaxo do Norte requerem uma atenção especial em termos de gestão ambiental, especialmente em áreas onde o pH é baixo, o que pode intensificar a toxicidade do alumínio. Em sistemas aquáticos, o alumínio pode se dissolver mais facilmente em águas ácidas, aumentando seu potencial de causar danos a organismos aquáticos. A presença de alumínio em níveis elevados pode ser atribuída tanto ao

aporte natural da geologia local quanto à influência de atividades antrópicas, como a mineração e a indústria.

Em termos de saúde, o alumínio, embora seja um metal comum e amplamente utilizado, pode ser tóxico em concentrações elevadas. Exposições prolongadas a altos níveis de alumínio podem causar problemas neurológicos em humanos, além de afetar organismos aquáticos e o solo, interferindo na qualidade ambiental e nos ecossistemas (Koljonen et al., 1992).

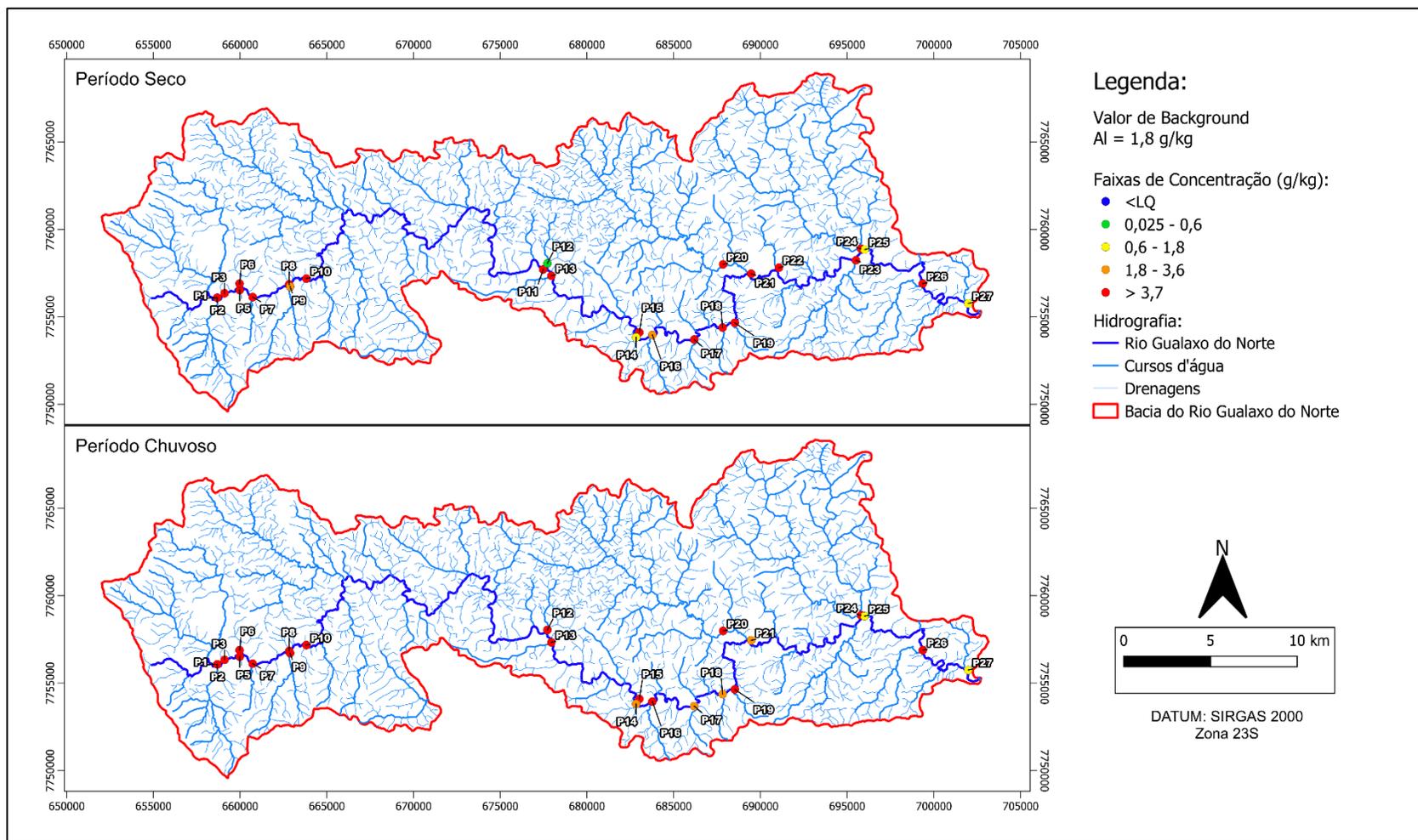


Figura 6.14: Mapas da distribuição geoquímica do alumínio nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo, período seco e chuvoso.

6.2.8 Ferro (Fe)

O ferro é um metal essencial para a vida e a indústria, com número atômico 26 e densidade de 7,874 g/cm³. Suas propriedades físico-químicas lhe conferem uma notável capacidade de acumular outros elementos em seus sedimentos, influenciada por fatores como o pH, a presença de substâncias químicas na água e a quantidade de matéria orgânica nos sedimentos. Essa capacidade de adsorção torna o ferro um importante acumulador de metais pesados, como chumbo, cádmio e zinco, além de nutrientes como o fósforo (Shrestha & Kazama, 2007). A fonte desses elementos pode incluir tanto atividades humanas, como a mineração e a agricultura, quanto processos naturais de intemperismo e erosão. A presença significativa de ferro nos sedimentos pode ter implicações importantes para a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos, influenciando a biodisponibilidade de metais e a ciclagem biogeoquímica.

De acordo com a classificação de Goldschmidt (1923), o ferro é classificado como um elemento siderófilo, o que significa que tem uma forte afinidade por se ligar a metais e se concentra principalmente no núcleo da Terra, mas pode ser calcófilo e litófilo na crosta terrestre. Na crosta terrestre, o ferro apresenta uma concentração média de 5,04% (Rudnick & Gao, 2003), sendo um dos elementos mais abundantes e amplamente distribuídos.

Os principais minerais de ferro são hematita (Fe₂O₃), magnetita (Fe₃O₄) e siderita (FeCO₃), os quais estão presentes em várias formações rochosas ricas em ferro. Na bacia do Rio Gualaxo do Norte, a hematita e a magnetita são os minerais mais comuns, associados ao intemperismo de rochas como quartzitos ferruginosos e filitos, que são características geológicas dominantes da região (Rodrigues et al., 2013). Essas formações são amplamente expostas à erosão e às atividades de mineração, que contribuem para o aumento da concentração de ferro nos sedimentos da bacia.

O ferro é um dos metais mais importantes para a economia global, sendo amplamente utilizado na produção de aço e ligas metálicas. Essas ligas são essenciais para a construção civil, a indústria automobilística e diversos outros setores industriais, devido à resistência e versatilidade do aço em várias aplicações. A produção de aço depende significativamente da extração de minerais de ferro, o que torna esse metal vital para as economias industriais.

Na área de estudo do Rio Gualaxo do Norte, os níveis de ferro nos sedimentos variaram consideravelmente. A análise dos dados, juntamente com o mapa da Figura 6.9, revelou que o ferro apresenta concentrações superiores ao valor de background em quase toda a extensão do

curso principal da bacia. Durante o período seco, a estação P3 registrou a concentração máxima de 30,37%, enquanto no período chuvoso, o valor mais alto foi de 25,54%, também na estação P3. A concentração mínima observada foi de 0,12%, registrada na estação P12, localizada no Córrego do Gama, durante o período seco. Esses resultados indicam que o ferro está presente em níveis elevados em várias partes da bacia, principalmente em áreas associadas à mineração e ao intemperismo natural das rochas da região.

Embora o ferro seja essencial em quantidades moderadas, causando anemia em caso de carência, em excesso ele pode causar problemas ambientais significativos. A contaminação de corpos hídricos e solos por ferro pode impactar a biota aquática, promovendo a bioacumulação de outros metais tóxicos, o que aumenta os riscos ecológicos. Em ambientes aquáticos, concentrações excessivas de ferro podem afetar a qualidade da água e prejudicar os processos biológicos, contribuindo para a degradação dos ecossistemas (Shrestha & Kazama, 2007).

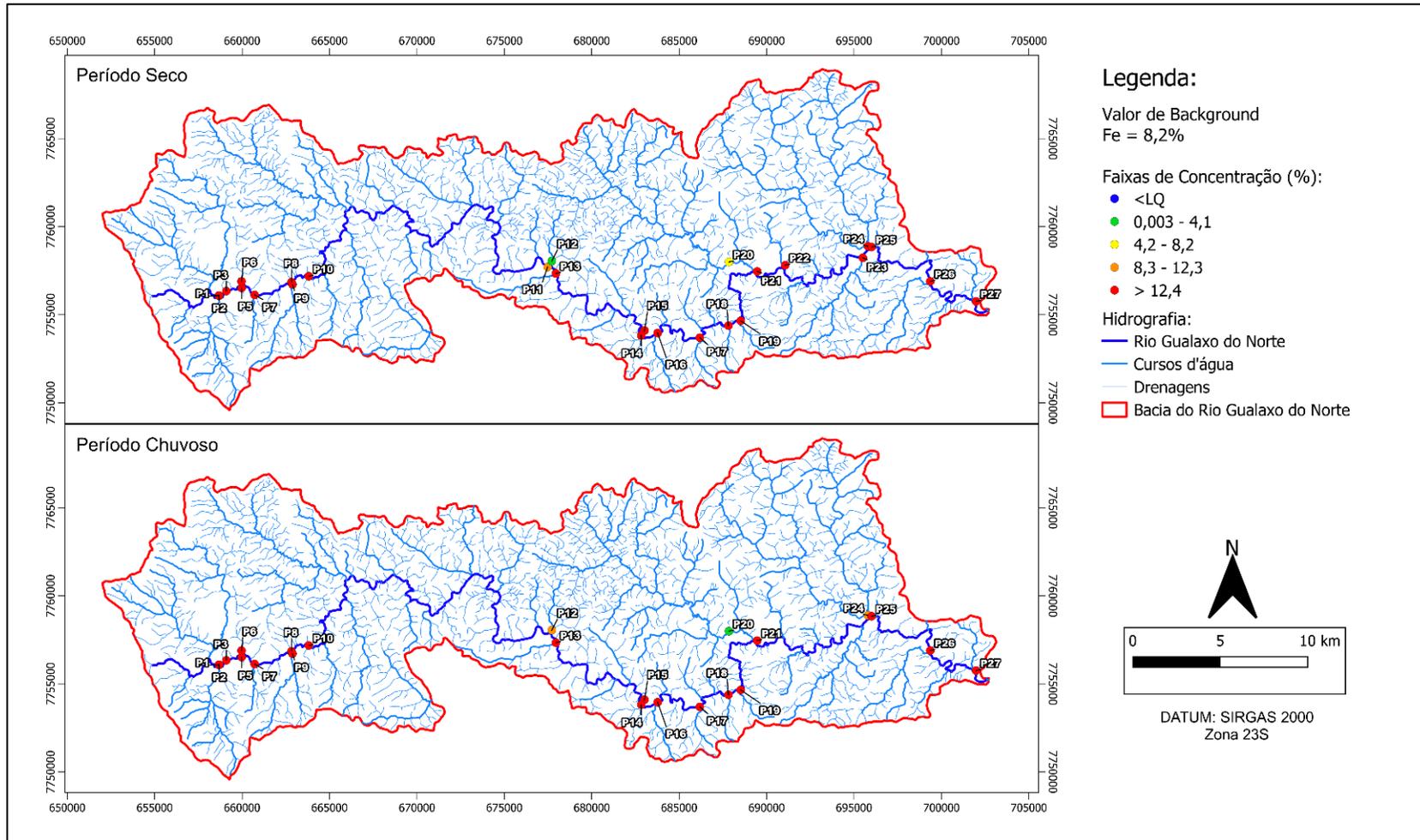


Figura 6.15: Mapas da distribuição geoquímica do ferro nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo do Norte, período seco e chuvoso.

6.2.9 Manganês (Mn)

O manganês é um metal essencial para a saúde humana e dos ecossistemas, com número atômico 25 e densidade de 7,21 g/cm³. Embora seja vital para vários processos biológicos, quando presente em concentrações elevadas pode se tornar tóxico (ATSDR, 2012). Na classificação de Goldschmidt (1923), o manganês é classificado como um elemento litófilo, o que significa que tem forte afinidade por minerais de rochas e é amplamente distribuído na crosta terrestre.

A concentração média de manganês na crosta terrestre é de aproximadamente 0,10% (Rudnick & Gao, 2003). Este metal é comumente encontrado em minerais como a pirolusita (MnO₂) e a rodocrosita (MnCO₃), que são suas principais fontes de extração. No contexto da bacia do Rio Gualaxo do Norte, as maiores concentrações de manganês estão associadas a depósitos sedimentares ricos em óxidos de manganês, que são geralmente formados pelo intemperismo de rochas ígneas básicas. Essas rochas, presentes na região, fornecem o manganês para o ambiente aquático por meio de processos naturais e antropogênicos (Vieira, 2015).

O manganês é amplamente utilizado em várias indústrias, sendo essencial na produção de ligas metálicas, especialmente no aço, o que o torna um recurso vital para a indústria siderúrgica. Além disso, o manganês é utilizado na fabricação de baterias e fertilizantes, contribuindo de forma significativa para a economia global e a produção agrícola (Siqueira, 1985).

Na área de estudo do Rio Gualaxo do Norte, o valor de background para o manganês nos sedimentos é de 1636 mg/kg. No entanto, as concentrações observadas durante o período seco variaram amplamente entre as estações. Na estação P1, foi registrada uma concentração extremamente elevada de 11410,1 mg/kg, muito acima do valor de background. Esse resultado sugere uma forte influência de fontes antropogênicas, possivelmente associadas a atividades industriais ou de mineração próximas. Em contraste, a estação P12 registrou uma concentração de apenas 5,9 mg/kg, significativamente abaixo do background, o que indica uma condição praticamente natural e minimamente impactada por atividades humanas.

Durante o período chuvoso, as variações nas concentrações de manganês continuaram notáveis. A estação P2 registrou a maior concentração, alcançando 18683,6 mg/kg, o que também superou amplamente o valor de background. Esse aumento pode ser atribuído à lixiviação e ao transporte de manganês dos solos e sedimentos, intensificados pelo aumento do fluxo de água durante as chuvas. A mobilidade do manganês em ambientes aquáticos é

altamente dependente das condições redox, o que afeta diretamente sua solubilidade e transporte, conforme observado por Kabata-Pendias e Szteke (2015).

Embora o manganês seja essencial para processos biológicos em plantas e animais, suas concentrações excessivas podem representar um risco significativo para a saúde ambiental e humana. A concentração mais alta observada na região a montante da área do rompimento da barragem sugere uma contaminação local preocupante, possivelmente associada à atividade mineradora, que é particularmente intensa na cabeceira da bacia do Rio Gualaxo do Norte. Esse aumento das concentrações de manganês pode gerar impactos negativos no ecossistema aquático local, promovendo a bioacumulação de outros metais tóxicos e afetando a qualidade da água.

Em termos de saúde humana, concentrações elevadas de manganês podem causar uma série de problemas neurológicos, como tremores, distúrbios do sono e danos ao sistema nervoso central. Além disso, a exposição prolongada a altos níveis de manganês pode afetar o desenvolvimento cognitivo em crianças, causando prejuízos ao aprendizado e à memória (Siqueira, 1985).

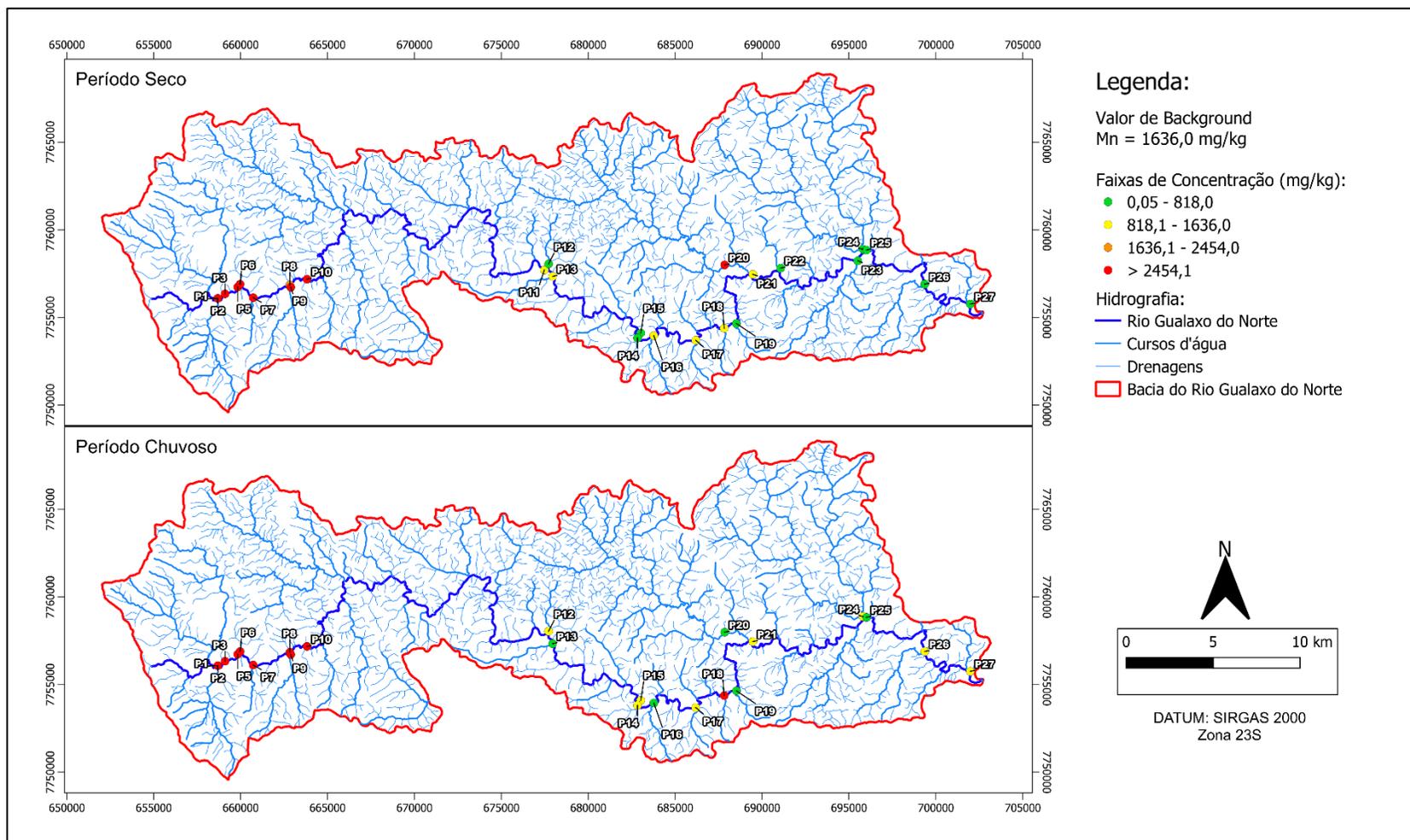


Figura 6.16: Mapas da distribuição geoquímica do manganês nas estações de amostragem na bacia do rio Gualaxo, período seco e chuvoso.

6.2.10 Mercúrio (Hg)

Embora os dados originais das estações monitoradas atualmente não incluam análises específicas de mercúrio, sua importância no contexto de contaminação ambiental na região do Rio Gualaxo do Norte é indiscutível. O mercúrio é amplamente reconhecido por sua toxicidade e por seus efeitos adversos à saúde humana e aos ecossistemas aquáticos, devido à sua capacidade de bioacumulação e biomagnificação. Historicamente, esse metal foi utilizado em grandes quantidades no processo de amalgamação durante o garimpo de ouro na região, o que resultou na sua liberação e acumulação nos sedimentos ao longo do tempo. Segundo a classificação de Goldschmidt (1923), o mercúrio pode ser classificado como calcófilo ou atmófilo, ou seja, que possui afinidade por permanecer na fase gasosa e tende a se concentrar na atmosfera. Esses elementos são caracterizados por sua capacidade de formar gases estáveis em condições terrestres.

Conforme estudos de Buscher (1992), as concentrações de mercúrio nos sedimentos do Rio Gualaxo do Norte, antes do rompimento da barragem, atingiam níveis alarmantes, com valores médios de 13 mg/kg nos sedimentos de fundo, provenientes principalmente do uso de mercúrio no garimpo. Mesmo com a atual predominância da mineração de ferro, a contaminação residual de mercúrio continua presente, particularmente em áreas como o Córrego Água Suja, onde as concentrações de mercúrio ainda excedem os limites adequados para a maioria dos usos previstos pelas normas ambientais.

Estudos mais recentes de Amade e Lima (2009) apontam que, apesar da continuidade de atividades clandestinas de garimpo nas cabeceiras do Rio Gualaxo, essas práticas não resultaram em aumentos perceptíveis nas concentrações de mercúrio nas águas monitoradas. Entretanto, a remobilização de sedimentos contaminados, especialmente durante o período chuvoso, pode contribuir para a redistribuição do mercúrio ao longo do sistema fluvial, aumentando seu impacto ambiental.

O mercúrio, sendo altamente tóxico, apresenta um risco substancial à saúde humana e ao meio ambiente. Quando liberado no ambiente, ele pode ser convertido em metilmercúrio, uma forma orgânica ainda mais tóxica, que é rapidamente absorvida pelos organismos aquáticos e se acumula nas cadeias alimentares. Esse processo de metilação, que ocorre principalmente em ambientes anaeróbicos com sedimentos ricos em matéria orgânica, amplifica os riscos de exposição para animais e humanos.

As concentrações de mercúrio registradas na bacia do Rio Gualaxo do Norte, variando entre 0,14 mg/kg e 0,53 mg/kg (Rhodes, 2010), estavam acima dos limites recomendados segundo amostragem realizada em 2008, para áreas não contaminadas.

De acordo com Fernandes et al. (2020), as concentrações de mercúrio nas amostras de água coletadas na bacia do Rio Gualaxo do Norte atualmente estão abaixo do limite de quantificação de 0,0002 mg/L, indicando que, nas condições atuais, o mercúrio não foi detectado em níveis mensuráveis nas águas superficiais. No entanto, a autora também destaca que o histórico de contaminação por mercúrio na região, principalmente devido ao garimpo de ouro, ainda é uma preocupação ambiental significativa, uma vez que o mercúrio pode estar presente nos sedimentos, sendo remobilizado durante eventos de chuva intensa. Fernandes reforça que, embora as atividades clandestinas de garimpo ainda ocorram nas cabeceiras do rio, elas não têm provocado aumentos expressivos nas concentrações de mercúrio nas águas monitoradas.

6.2.11 Comparação dos resultados do Gualaxo do Norte com a Bacia do Rio das Velhas

Os resultados apresentados neste capítulo confirmam a presença elevada de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) nos sedimentos do Rio Gualaxo do Norte, substâncias amplamente associadas às atividades mineradoras na região. Um estudo similar na Bacia do Rio das Velhas, também situada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, corrobora essa relação entre contaminação por metais pesados e exploração mineral.

De acordo com Costa et al. (2015), na Bacia do Rio das Velhas, as concentrações de arsênio variam entre 50,6 e 1.691 mg/kg, superando os valores de referência para sedimentos fluviais. De forma semelhante, no Rio Gualaxo do Norte, foram detectadas concentrações anômalas de arsênio a montante da área afetada pelo rompimento da barragem de Fundão, sugerindo que a contaminação é modulada pela natureza e extensão das atividades mineradoras em cada bacia.

Além disso, no Gualaxo, foram encontrados níveis elevados de chumbo e cobre, o que reforça as observações de Costa et al. (2015) na Bacia do Rio das Velhas, onde esses metais foram associados diretamente às atividades de mineração de ouro e ferro. A principal distinção entre os estudos é a remobilização de metais no Gualaxo do Norte, causada pelo rompimento da barragem, fenômeno não observado na Bacia do Rio das Velhas.

Na Bacia do Rio das Velhas, as análises geoquímicas indicaram concentrações anômalas de arsênio, chumbo, cádmio, cobre, cromo e zinco, frequentemente acima dos valores de

referência estabelecidos para sedimentos fluviais. Em áreas de drenagem associadas aos afloramentos do Grupo Nova Lima, as concentrações de arsênio variaram entre 50,6 e 1.691 mg/kg, refletindo tanto a geologia local quanto o impacto direto das atividades de mineração de ouro e ferro (Costa et al. 2015).

6.3 ÍNDICES AMBIENTAIS

6.3.1 Índice de Geoacumulação

O Índice de Geoacumulação (Igeo) foi utilizado neste estudo para avaliar o grau de contaminação dos sedimentos da bacia do Rio Gualaxo do Norte em relação aos elementos químicos analisados. Esse índice é amplamente empregado em estudos ambientais para classificar os sedimentos em diferentes níveis de poluição, desde "não poluída" até "muito poluída". A metodologia considera a comparação das concentrações atuais dos elementos com seus valores de background geológico, permitindo uma visão clara do impacto ambiental. Para o cálculo do Igeo, utiliza-se a fórmula desenvolvida por Müller (1969), que considera o logaritmo da razão entre a concentração medida do metal e o valor de background, ajustado por um fator de correção. A aplicação desse índice tem sido amplamente utilizada em bacias hidrográficas no Brasil, especialmente em áreas impactadas por atividades mineradoras.

As amostras analisadas para este estudo mostraram variações significativas entre os elementos. Cromo, Cobre e Chumbo foram consistentemente classificados como "não poluídos" em todas as estações, tanto no período seco quanto no chuvoso. Já o Alumínio, Níquel e Zinco apresentaram variações mais amplas, sendo classificados em alguns pontos como "moderadamente poluídos", especialmente em estações como P1 e P7 no período seco, e a estação P2 durante o período chuvoso. Os elementos mais associados à composição dos rejeitos minerários, como Alumínio, Manganês e Ferro, apresentaram as maiores acumulações ao longo da área estudada, atingindo níveis de "moderadamente a muito poluídos" em várias estações.

Esses resultados refletem a influência significativa dos rejeitos da barragem de Fundão, principalmente nas áreas a jusante do rompimento. Embora a geologia da região contribua naturalmente para a presença desses elementos, a liberação dos rejeitos industriais intensificou a sua acumulação nos sedimentos. Esse padrão é semelhante ao observado em outros estudos brasileiros em áreas de mineração, como o estudo realizado por Souza et al. (2017) na bacia do Rio Doce, que também identificou alta acumulação de Alumínio, Ferro e Manganês após o rompimento de barragens de rejeitos. Esses metais, associados aos rejeitos, refletem os impactos de longo prazo das atividades mineradoras na qualidade dos sedimentos fluviais. A

Tabela 6.1, a seguir, apresenta as classes de referência para qualidade do sedimento, enquanto a Tabela 6.2 apresenta os valores calculados no presente estudo.

Tabela 6.1: Tabela com as classes utilizadas para comparação - IGEO.

Classe	Qualidade do Sedimento
Igeo < 0	Não Poluído
0 < Igeo < 1	Não poluído a moderadamente poluído
1 < Igeo < 2	Moderadamente Poluído
2 < Igeo < 3	Moderadamente a muito poluído
3 < Igeo < 4	Muito poluído
4 < Igeo < 5	Muito a altamente poluído
Igeo > 5	Altamente poluído

Tabela 6.2: Valores calculados de geoacumulação através dos dados de período seco.

Estações	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Al	Fe	Pb
P1	0.204063	-2.81057	-0.28103	-0.51083	-0.45732	1.55903	0.72096	0.643923	-1.6674
P2	-0.41015	-2.25746	-0.96508	-1.29021	-0.83731	1.372987	1.258461	0.653002	-2.01035
P3	-0.79932	-2.43587	-1.78146	-1.60944	-1.12185	1.269187	0.4578	0.90378	-2.10566
P4									
P5	-0.39154	-2.42294	-1.44968	-1.34117	-1.08492	1.552074	0.721357	0.826176	-1.73409
P6	-0.62589	-1.86149	-1.47349	-0.50798	-0.97084	0.678351	0.786469	0.425818	-1.58984
P7	-1.6939	-1.44726	-0.62964	0.746404	-0.41007	1.295035	0.644288	0.75112	-1.69189
P8	-1.65512	-1.53216	-1.11321	-0.87035	-0.75148	-0.04583	1.599163	0.356937	-1.84329
P9	-0.79241	-2.45427	-2.16664	-1.45896	-1.20007	0.566213	-0.1192	0.775113	
P10	-0.48317	-2.41271	-1.13444	-0.89934	-0.9338	1.220437	1.115069	0.592582	-1.91297
P11	-2.32676	-2.34864	-2.10814	-1.42997	-0.93901	-0.74348	2.07154	-0.2733	-1.52484
P12						-6.00827	-3.32527	-4.65818	
P13	-1.75807	-2.86106	-2.30882	-2.10893	-1.24514	-0.67867	0.842142	0.457388	
P14		-3.5267	-3.36661		-1.23455	-1.18213	-0.64379	0.83331	
P15		-3.60739	-2.97456		-1.5495	-1.09002	0.813101	0.505103	
P16		-3.65032	-3.03013		-1.48436	-0.95397	0.227401	0.525003	
P17		-3.26255	-2.65366		-1.22062	-1.06699	0.572192	0.587663	
P18	-2.35919	-2.78809	-2.65366	-2.13751	-1.22062	-0.96419	0.328317	0.713769	
P19		-3.19356	-2.87191		-1.39398	-1.57202	0.91316	0.457055	
P20		-2.74816	-2.30882	-2.02781	-0.70083	0.266778	2.511269	-0.70681	-0.30974
P21	-2.14267	-2.82199	-2.47461	-2.24448	-1.25225	-0.68122	0.345453	0.73973	
P22		-1.25482	-1.23362	-0.83428	-0.82559	-1.4519	2.472728	0.048128	-1.12639
P23		-2.89758	-2.17876	-2.68273	-1.41898	-1.24639	1.155856	0.529563	
P24		-2.93119	-1.96051	-2.40132	-1.2416	-1.26777	0.980871	0.357116	-2.225
P25		-3.99207	-3.87743		-1.32252	-1.18267	-1.46342	0.896601	
P26		-3.53448	-2.75684		-1.6453	-1.57645	1.006443	0.423022	
P27	-2.46333	-3.48868	-3.25328		-1.30731	-1.34292	-0.54078	0.864776	

Tabela 6.3: Valores calculados de geoacumulação através dos dados de período chuvoso.

Estações	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Al	Fe	Pb
P1	1.300698	-2.5517	-0.30509	-0.28484	-0.41934	1.322222	1.257682	0.709131	-1.29473
P2	-0.68797	-2.17191	-0.09173	-1.05349	-0.66447	2.052177	2.042643	0.530413	-1.3172
P3	-0.8836	-2.44109	-1.74129	-1.78664	-1.10014	0.70489	0.575802	0.730481	
P4									
P5	-1.05294	-2.53144	-1.44382	-1.96489	-1.36959	0.902834	0.726295	0.603752	
P6	-0.97016	-1.92193	-1.34373	-0.46353	-0.80482	0.149892	0.73688	0.371043	-1.70856
P7	-1.8202	-1.9408	-0.69108	0.552017	-0.11168	1.203473	0.501426	0.326533	-1.4638
P8	-0.76303	-2.34151	-1.31248	-1.51958	-1.11872	1.068139	0.917949	0.720803	-2.1702
P9	-1.27534	-1.44823	-0.79858	-0.13524	-0.0465	0.055356	1.975767	0.124449	-0.75111
P10	-0.69419	-2.55463	-1.16053	-1.51958	-1.16673	1.117366	1.506511	0.443094	-1.97682
P12	-1.7763	-2.00639	-1.84055	-1.63541	0.158734	-0.74769	1.975464	-0.10158	-1.56043
P13		-3.39608	-3.11975	-2.93762	-1.18326	-1.83362	0.835257	0.276522	
P14	-2.01024	-3.48868	-2.63424	-2.84525	-1.59374	-0.629	-0.22079	0.354379	
P15		-3.40291	-2.5965		-1.38171	-0.85537	1.253535	0.339054	
P16		-3.60739	-3.28964		-1.58374	-1.20564	0.688711	0.408255	
P17	-2.32676	-3.44487	-3.08897	-2.36428	-1.53993	-0.93617	-0.27771	0.537062	
P18	-1.07704	-2.89758	-2.09685	-1.76644	0.005599	0.599477	-0.21876	0.504249	
P19		-3.5267	-2.92192		-1.34186	-1.8051	0.683882	0.270094	-2.10566
P20		-3.36924	-2.80129		-0.68653	-2.37158	1.57239	-1.12352	-1.38174
P21	-2.40415	-3.59902	-3.03013		-1.48888	-1.01646	-0.26348	0.669651	
P24	-1.58179	-1.31494	-0.73904	-0.92057	1.414231	-0.94022	1.955991	-0.24327	-0.93472
P25		-3.77139	-3.49444		-1.46209	-1.25629	-0.89603	0.72928	
P26		-2.47843	-1.60875	-1.7969	-0.88316	-1.06663	2.697444	0.08575	-0.91934
P27		-3.33666	-3.00196		-1.18995	-0.96255	-0.80885	0.983086	

A análise comparativa com outros estudos nacionais também reforça a conexão entre a mineração e a geoacumulação de metais pesados. No Rio Parauapebas, estado do Pará, Santos et al. (2018) identificaram altos níveis de Ferro e Manganês em sedimentos próximos a áreas de mineração de ferro, classificando esses elementos como "moderadamente a muito poluídos". Esse padrão reflete o observado no Rio Gualaxo do Norte, onde os valores de Igeo indicam uma contaminação de moderada a alta, especialmente nas estações próximas às atividades mineradoras. Esses resultados destacam o impacto contínuo da mineração na região, mesmo após o rompimento da barragem.

Ao analisar os resultados específicos para o Rio Gualaxo do Norte, observou-se que o Manganês e o Ferro apresentaram as maiores preocupações ambientais. Esses elementos atingiram níveis de "moderadamente a muito poluídos" em várias estações, como P1 e P3 no período seco. O comportamento desses metais é consistente com o encontrado em outros

estudos em Minas Gerais, como o de Silva et al. (2020), que reportaram elevados índices de geoacumulação de Manganês em áreas mineradoras, associando a presença desse metal ao transporte de sedimentos contaminados e à remobilização dos rejeitos de mineração, particularmente em períodos chuvosos.

Os resultados indicam que, embora alguns elementos apresentem valores dentro de faixas esperadas para áreas não contaminadas, como o Cromo, Cobre e Chumbo, outros, como o Alumínio, Manganês e Ferro, revelam um quadro de contaminação preocupante na bacia do Rio Gualaxo do Norte. A influência da mineração, tanto histórica quanto recente, deixou marcas profundas na qualidade dos sedimentos fluviais, especialmente após o rompimento da barragem de Fundão, que liberou grandes quantidades de rejeitos ricos em metais pesados para o sistema fluvial. Portanto, os resultados deste estudo reforçam a necessidade de medidas de mitigação e monitoramento contínuo para controlar a acumulação de metais nos sedimentos da região, evitando maiores impactos à qualidade da água e à saúde dos ecossistemas aquáticos.

6.3.2 Índice de potencial risco ecológico

O Índice de Potencial Risco Ecológico (IRE) foi calculado para avaliar a intensidade do risco ecológico associado aos elementos contaminantes presentes nos sedimentos da bacia do Rio Gualaxo do Norte. O IRE é uma ferramenta amplamente utilizada em estudos ambientais, principalmente para identificar os riscos que elementos tóxicos, como metais pesados, podem representar para os ecossistemas aquáticos. A metodologia considera tanto a toxicidade intrínseca de cada elemento quanto sua concentração nos sedimentos, classificando as áreas em diferentes níveis de risco, que vão desde baixo risco até muito alto risco.

Com base nos resultados deste estudo, a maioria das estações de coleta foi classificada como apresentando baixo risco ecológico, com valores de IRE abaixo de 150. Apenas algumas estações ultrapassaram esse limite, sendo classificadas como de risco moderado. No período seco, as estações P20 e P23 foram identificadas com risco moderado, apresentando valores de 206,47 e 196,83, respectivamente. Já no período chuvoso, as estações P1, P2 e P26 mostraram risco moderado, com valores de IRE de 165,66, 206,91 e 239,98, respectivamente. A variação entre os períodos está principalmente relacionada às flutuações nas concentrações de Alumínio, que apresentaram picos em algumas estações durante as chuvas, provavelmente devido à maior remobilização dos sedimentos.

É importante destacar que a estação P23 não foi coletada no período chuvoso, e a estação P20, que havia apresentado risco moderado no período seco, apresentou uma redução significativa no valor do IRE no período chuvoso, atingindo 78,60. Esses resultados sugerem que a distribuição dos elementos nos sedimentos é altamente influenciada pelas condições hidrológicas, o que reforça a importância de monitorar as variações sazonais ao avaliar o risco ecológico. O comportamento específico dos elementos ao longo do ano, como o Alumínio, pode ser explicado pela sua mobilidade durante o período chuvoso, devido à lixiviação dos solos e ao transporte de partículas finas carregadas de metais.

Tabela 6.4: Classificações de IRE.

Valores	Classificação
$RI \leq 150$	risco ecológico baixo;
$150 < RI \leq 300$	risco ecológico moderado;
$300 < RI \leq 600$	risco ecológico alto;
$Er > 600$	risco ecológico altíssimo.

Tabela 6.5: Valores calculados para ERI nos períodos seco e chuvoso.

Estações	Seco	Chuvoso
P1	111.8859	165.6604
P2	113.6554	206.9178
P3	80.08226	66.95704
P4		
P5	99.36058	71.9028
P6	76.01266	65.75127
P7	97.50388	82.8705
P8	103.1283	87.09573
P9	52.91121	144.3947
P10	101.4078	115.494
P11	135.0035	
P12	0.62901	127.4037
P13	55.31899	46.95752
P14	28.2195	30.09641
P15	49.55649	67.2917
P16	35.17778	44.06358
P17	43.74626	30.06425
P18	42.45887	47.1159
P19	51.70522	42.57963
P20	206.4718	78.60799
P21	44.49343	31.02924
P22	196.8314	
P23	64.43419	
P24	55.97089	134.4471
P25	24.76489	24.45443
P26	54.8905	239.9862
P27	30.56568	30.52582

Quando comparados a outros estudos brasileiros, os resultados são consistentes com os obtidos por Silva et al. (2019) em áreas de mineração na bacia do Rio Paraopeba, onde foi observado que as estações localizadas em áreas de maior remobilização de sedimentos durante o período chuvoso apresentaram um aumento no IRE para metais como Alumínio e Manganês. Em um estudo semelhante realizado por Andrade et al. (2020) na bacia do Rio Doce, valores de ERI moderados foram observados em estações próximas a áreas de mineração, onde a remobilização dos rejeitos durante os períodos chuvosos também resultou em um aumento no risco ecológico. Assim, os resultados do Rio Gualaxo do Norte refletem um padrão já identificado em outras bacias hidrográficas brasileiras, particularmente aquelas impactadas pela mineração, onde a variação sazonal afeta diretamente a concentração de metais nos sedimentos e, conseqüentemente, o risco ecológico.

O cálculo do IRE para o Rio Gualaxo do Norte revelou que, em geral, o risco ecológico associado aos contaminantes presentes nos sedimentos é baixo, com exceção de algumas estações em que o risco moderado foi identificado. A presença de Alumínio e Manganês, que estão diretamente relacionados à atividade mineradora, especialmente nos rejeitos da barragem de Fundão, foi a principal responsável pelos valores de IRE mais elevados em determinadas estações. Essa tendência é semelhante ao observado em outras áreas mineradoras do Brasil,

onde a atividade industrial afeta significativamente a qualidade ambiental dos ecossistemas aquáticos.

A tabela de valores de IRE mostra que, no período seco, as estações P20 e P23 se destacaram com os maiores valores de risco, enquanto no período chuvoso, as estações P1, P2 e P26 apresentaram os maiores índices de risco. A comparação entre os períodos hidrológicos demonstra a importância de considerar as variações sazonais na avaliação do impacto ambiental, uma vez que a mobilização dos sedimentos durante as chuvas pode aumentar a dispersão de contaminantes.

Este trabalho avaliou os níveis de contaminação por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nos sedimentos do Rio Gualaxo do Norte, usando os índices de geoacumulação (IGEO) e de risco ecológico potencial (IRE). A bacia, impactada pelo rompimento da barragem de Fundão em 2015, apresentou contaminação complexa, influenciada tanto pela geologia natural quanto pela presença de rejeitos.

Os resultados revelaram altas concentrações de alumínio, manganês e ferro nos sedimentos. A montante do rompimento, os níveis médios foram de 6.660,2 ppm para alumínio, 7.655,4 ppm para manganês e 24,1% para ferro. A jusante, essas concentrações foram de 8.729,6 ppm, 894,4 ppm e 19,2%, respectivamente. Esses metais foram considerados críticos devido à sua abundância nos rejeitos e nas rochas da região. Outros metais, como cromo, cobre e chumbo, apresentaram índices de contaminação baixos, sugerindo influência seletiva das atividades humanas.

O IGEO mostrou que os elementos alumínio, ferro e manganês apresentaram concentrações moderadas a muito poluídas em diversas estações, enquanto os demais elementos foram classificados como "não poluídos". Em relação ao Índice de Risco Ecológico Potencial (IRE), a maioria das estações apresentou baixo risco ecológico, com exceções nas estações P20 e P22 no período seco e nas estações P1, P2 e P26 no período chuvoso, onde o risco foi classificado como moderado. Essa variabilidade sazonal reflete a mobilidade dos contaminantes em períodos de chuva intensa, o que ressalta a importância de monitoramento contínuo, e periódico, em áreas com histórico de desastres ambientais e mineração.

A ausência de limites específicos para ferro, alumínio e manganês na Resolução CONAMA 454/2012 evidencia uma falha regulatória, já que esses metais, em concentrações elevadas, podem ser tóxicos sob certas condições. Portanto, os resultados deste estudo indicam a necessidade de uma reavaliação das diretrizes ambientais, de modo a incluir limites para elementos como ferro, alumínio e manganês, considerando as características locais de bacias impactadas por mineração. A criação de parâmetros mais específicos melhoraria a gestão ambiental e possibilitaria um monitoramento mais eficaz dessas áreas.

Recomenda-se monitoramento contínuo e ações corretivas, como a estabilização de sedimentos e controle de poluentes, para minimizar os impactos e recuperar a qualidade

ambiental da bacia. A colaboração entre órgãos reguladores, pesquisadores e comunidades locais é essencial para promover a recuperação sustentável dos ecossistemas afetados.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F.; MARSHACK, S. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998.

ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v. 33, n. 1, p. 127-139, 2012.

ALMEIDA, F. F. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.

ALLOWAY, B. J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer Science & Business Media, 2013.

AMADE, P.; LIMA, H. M. D. Desenvolvimento sustentável e garimpo: o caso do Garimpo do Engenho Podre em Mariana, Minas Gerais. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 62, p. 237-242, 2009.

ANIRUDHAN, T. S.; SENAN, P.; UNNITHAN, M. R. Sorptive potential of a cationic exchange resin of carboxyl banana stem for mercury (II) from aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*, v. 52, n. 3, p. 512-519, 2007.

AZEVEDO, F.; CHASIN, A. A. M. Metais: Gerenciamento da toxicidade. São Paulo: Ed. Atheneu, 2004.

BAGGIO, A. M. A Geologia de Fertilizantes: A influência dos elementos químicos no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 4, p. 1495-1512, 2013.

BARBIERI, M. The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. Rome, Italy: Department of Earth Science, Sapienza University of Rome, 2016.

BARBOSA, A. L. Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 1968.

BORBA, R. P.; SILVA, M. A.; FIGUEIREDO, A. M. Estudo geoquímico e de saúde pública em áreas de mineração. *Geochimica Brasiliensis*, v. 32, n. 2, p. 121-136, 2018.

BRADL, H. Heavy Metals in the Environment: Origin, Interaction and Remediation. Amsterdam: Elsevier, 2005.

BRANDALISE, L. A. Contribuição ao conhecimento petrográfico, geoquímico e geotectônico do complexo metamórfico Mantiqueira na região de Volta Redonda-RJ e suas

implicações tectônicas para a faixa de dobramentos Brasília. 1991. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

BRITO, M. C. W. D.; ALONSO, L. B. N.; BARBOSA, F. A. R.; LAUREANO, F. V.; MAY, P. H.; SÁNCHEZ, L. E.; KAKABADSE, Y. The fishing ban after the Fundão Dam failure: using the precautionary principle to restore fisheries in the Rio Doce Basin, 2019.

BUSCHER, D. P. Mercury in river systems from garimpeiro activities in the vicinity of Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. *Mines Theses & Dissertations*, 1992.

CAMÊLO, D. L.; MENDES, L. A.; MOREIRA, J. C. Mineralogical fingerprint and human health risk from potentially toxic elements of Fe mining tailings from the Fundão dam. *Science of the Total Environment*, v. 751, p. 141727, 2021.

CASTILHOS, Z. C.; RODRIGUES-FILHO, S.; CESAR, R. G. Mercury contamination in fish from gold mining areas in Amazon region. *Science of the Total Environment*, v. 368, n. 1, p. 320-325, 2006.

CHEMALE Jr., F. A. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Um modelo. *Pesquisas em Geociências*, v. 18, n. 2, p. 104-127, 1991.

CHEMALE Jr., F.; R. C. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, v. 65, p. 25-54, 1994.

CLARKSON, T. W.; MAGOS, L. The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Critical Reviews in Toxicology*, v. 36, n. 8, p. 609-662, 2006.

COSTA, A. T. Registro histórico de contaminação por metais pesados, associados à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do ribeirão do Carmo, QF: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto.

COSTA, J. M. Caracterização Geoquímica e Impactos Ambientais na Bacia do Rio Gualaxo do Norte. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

COSTA, R. D. V. F. D.; LEITE, M. G. P.; MENDONÇA, F. P. C.; NALINI Jr, H. A. Geochemical mapping of arsenic in surface waters and stream sediments of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 68, p. 43-51, 2015.

COSTA, R. F. C. Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero. Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS). Projeto DNPM/CPRM—Estudo de áreas de ocorrência de minerais metálicos e industrializáveis. Folha SE.23-Y-A-I—Rio Doce. Escala 1:100.000. Relatório final, 1993.

DE LIMA RODRIGUES, A. S.; JUNIOR, H. A. N.; COSTA, A. T.; MALAFAIA, G. Construção de mapas geoquímicos a partir de sedimentos ativos de margens oriundos do Rio Gualaxo do Norte, MG, Brasil. *Multi-Science Journal*, v. 1, n. 1, p. 70-78, 2015.

DESCHAMPS, E.; MATSCHULLAT, J. Arsênio: Propriedades Físico-Químicas e Ocorrência. *Revista Geoquímica Ambiental*, v. 32, n. 2, p. 50-65, 2007.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. B. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. N. Manual de métodos de análise de solo [Manual of soil analysis methods]. *Embrapa Solos-Documentos (INFOTECA-E)*, Rio de Janeiro, Brazil, 230 p., 2011.

DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 641-A, 1969.

DRISCOLL, C. T.; BAKER, J. P.; BISOGNI, J. J.; SCHOFIELD, C. L. Effect of aluminum speciation on fish in dilute acidified waters. *Nature*, v. 284, n. 5752, p. 161-164, 1980.

DUDKA, S.; ADRIANO, D. C. Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review. *Journal of Environmental Quality*, v. 26, n. 3, p. 590-602, 1997.

ENDO, I. M. Estratigrafia e arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota explicativa do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, MG: Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP, 2019b.

ENDO, I.; MACHADO, R.; GALBIATTI, H. F.; ROSSI, D. Q.; ZAPPAROLI, A. D. C.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F. D. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Ouro Preto: Escola de Minas - UFOP, 2020, p. 70-113.

EVANGELISTA, H. Geologia e petrologia dos gnaisses e rochas granitóides da área Sudeste da Serra do Espinhaço, Quadrilátero Ferrífero, MG. 1984. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

FAVARO, D. I. T.; RIBEIRO, F. C.; SAIKI, M. Determinação de metais pesados em áreas de mineração por ativação neutrônica. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 1, p. 32-40, 2007.

FAKAYODE, S. O. Impact assessment of industrial effluent on water quality of the receiving Alaro River in Ibadan, Nigeria. *AJEAM-RAGEE*, v. 10, p. 1-13, 2005.

FÖRSTNER, U. Traceability of sediment analysis. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, v. 23, n. 3, p. 217–236, 2004.

FOSTER, I. D. L.; CHARLESWORTH, S. M. Heavy metals in the hydrological cycle: Trends and explanation. *Hydrological Processes*, v. 10, n. 2, p. 227-261, 1996.

GOLDER ASSOCIATES. Programa de Caracterização Geoquímica de Rejeitos, Solos e Sedimentos. Relatório Técnico. 2017.

GUIMARÃES, D. Arqui-Brasil e sua evolução geológica. *DNPM-DFPM*, Boletim 88, 1-314 p., 1951.

HAKANSON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Quality Laboratory Uppsala*, Sweden: The National Swedish Environment Protection Board, 1980.

HARADA, M. Minamata disease: Methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution. *Critical Reviews in Toxicology*, v. 25, n. 1, p. 1-24, 1995.

HERZ, N. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. In: *United States Geological Survey Professional Paper 641-B*. Washington, DC: Government Printing Office, 1970.

HERZ, N. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, n. 3, p. 949-973, 1970.

HOODA, P. S. (Ed.). Trace Elements in Soils. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2010.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997: Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: IBGE, 1997.

JOHNSON, D. B.; HALLBERG, K. B. Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of the Total Environment*, v. 338, n. 1-2, p. 3-14, 2005.

KABATA-PENDIAS, A.; SZTEKE, B. Trace elements in abiotic and biotic environments. Taylor & Francis, 2015.

KOLJONEN, M. L.; SANDSTRÖM, H.; HÅKANSSON, B. Zinc bioaccumulation in different tissues of aquatic organisms. *Environmental Pollution*, v. 76, p. 34-45, 1992.

MALAVOLTA, E. Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos. São Paulo: Produquímica, 1994.

MASUTTI, M. B. Distribuição e efeitos de cromo e cobre em ecossistemas aquáticos: uma análise laboratorial e in situ (experimentos em micro e mesocosmos). 2004. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

MÜLLER, G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veränderungen seit 1971. *Umschau*, v. 79, n. 24, p. 778–783, 1979.

MOREIRA, M. C. C.; MOREIRA, J. C. Impactos da poluição por chumbo: Um estudo de revisão. *Revista de Saúde Pública*, v. 38, n. 1, p. 18-24, 2004.

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

PENG, J. F.; SONG, Y. H.; YUAN, P.; CUI, X. Y.; QIU, G. L. The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 161, n. 2-3, p. 633-640, 2009.

POLETO, C.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Qualidade da água e metais pesados: Impacto da urbanização e da mineração. *Geochimica Brasiliensis*, v. 24, n. 1, p. 12-23, 2011.

RAND, G. M. Fundamentals of Aquatic Toxicology: Effects, Environmental Fate, and Risk Assessment. Boca Raton: CRC Press, 1995.

REIMANN, C.; DE CARITAT, P. Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist. Springer Science & Business Media, 2012.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P. Background and threshold: Critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, v. 346, n. 1-3, p. 1-16, 2005.

REIS, D. A. Contaminação química e microbiológica em águas e sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, sub-bacia do rio Doce, submetida a fatores de pressão antrópicos e ao rompimento da barragem de Fundão. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

REZENDE, P. S. et al. Arsenic and mercury mobility in Brazilian sediments from the São Francisco River Basin. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 22, n. 5, p. 910-918, 2011.

RHODES, V. D. P. Distribuição de mercúrio e arsênio nos sedimentos da área afetada por garimpo de ouro–Rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG. 2010.

RIBEIRO, A. P.; MONTEIRO, F. A.; MATTOS, A. C. P. Geoquímica de níquel e cobalto em solos derivados de rochas máficas. *Geochimica Brasiliensis*, v. 33, n. 2, p. 80-91, 2019.

RODRIGUES, A. S. D. L.; MALAFAIA, G.; COSTA, A. T.; NALINI JUNIOR, H. A. Adequação e avaliação da aplicabilidade de um Protocolo de Avaliação Rápida na bacia do rio Gualaxo do Norte, Leste-Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, v. 7, p. 231-244, 2012.

RODRIGUES, S. M.; PEREIRA, M. E.; DUARTE, A. C. The legacy of lead and zinc contamination in sediment cores from a lake adjacent to the Rio Gualaxo. *Environmental Science and Technology*, v. 47, n. 2, p. 512-520, 2013.

ROESER, H. M. P. Petrographische - Geochemische Untersuchungen der Metamorphen Gesteinsserien im Südöstlichen Grenzbereich des Eisernen Vierecks, Minas Gerais, Brasilien. 1977. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Clausthal, Alemanha, 341 p.

RUDNICK, R. L.; GAO, S. Composition of the continental crust. In: R. L. Rudnick (Ed.), *The Crust: Treatise on Geochemistry*, v. 3, p. 1-64. Elsevier, 2003.

SCHORSCHER, J. Arcabouço petrográfico e evolução crustal de terrenos Precambrianos do Sudeste de Minas Gerais, Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Meridional e domínios granito-gnáissicos adjacentes. 1992. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
SHRESTHA, S.; KAZAMA, F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, n. 4, p. 464-475, 2007.

SIQUEIRA, M. E. P. B. D.; MORAES, E. D. C. F. Aspectos toxicológicos da exposição ao manganês. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, p. 28-36, 1985.

SOLIMAN, N. F. Potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Mediterranean coast, Egypt. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, v. 13, p. 1-12, 2015.

TAYLOR, S. R.; MCLENNAN, S. M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1995.

VIEIRA, L. B. Caracterização morfológica de ocorrência de manganês por meio de dados geofísicos. 2015.

WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, n. 7, p. 1217-1232, 1978.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.

ZUCCHETTI, M.; BARBOSA, O. Estratigrafia. In: CPRM. *Projeto Rio das Velhas: Texto explicativo do mapa geológico integrado*, escala 1:100.000. Belo Horizonte: DNPM/CPRM, p. 13-42, 1996.